

地学教育

第64巻 第3号(通巻 第331号)

2011年5月

目 次

原著論文

七輪でマグマをつくる—身近なものを用いてマグマ形成過程を観察する—

……………下岡順直・三好雅也・馬渡秀夫・吉川 慎・山本順司・渡辺克裕・

齋藤武士・杉本 健・山田 誠・三好まどか・竹村恵二…(53~69)

教育実践論文

教員養成系大学における反射望遠鏡作製実習……………中野英之…(71~81)

学会記事 (83)

お知らせ (91)

日本地学教育学会

263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉大学教育学部理科教育教室内

日本地学教育学会 会長・副会長・評議員・常務委員・監事名簿（平成 23 年 4 月）

会 長 牧野 泰彦（茨城・平成 23 年度）
 副 会 長 馬場 勝良（東京・平成 23 年度）
 同（全国大会担当） 名越 利幸（岩手・平成 23・24 年度）・林 武広（広島・平成 23 年度）

評 議 員（*印は、会則第 11 条 3 項の評議員）

任 期	平成 23・24・25 年度	平成 23・24 年度	平成 23 年度
地 区（定員）			
北海道・東北（3）	茂庭 隆彦（岩手）	木下 温（北海道）	中村 泰久（福島）
関 東（9）	山本 和彦（千葉）	相原 延光（神奈川）	渋谷 紘（埼玉）
	荒井 豊（埼玉）	円城寺 守（東京）	米澤 正弘（千葉）
	小尾 靖（神奈川）	濱田 浩美（千葉）	松森 靖夫（山梨）
中 部（3）	遠西 昭寿（愛知）	熊野 善介（静岡）	藤岡 達也（新潟）
近 畿（3）	廣木 義久（大阪）	戸倉 則正（京都）	澁江 靖弘（兵庫）
中国・四国（3）	野瀬 重人（岡山）	林 武広（広島）	秦 明德（島根）
九州・沖縄（3）	湊 啓輔（熊本）	八田 明夫（鹿児島）	三次 徳二（大分）
	*高橋 修（東京）	*林 慶一（兵庫）	*馬場 勝良（東京）
	*加藤 圭司（神奈川）		*五島 政一（東京）
	*青野 宏美（岐阜）		*松川 正樹（東京）
	*荻原 彰（三重）		*宮下 治（神奈川）
	*伊藤 孝（茨城）		*岡本 弥彦（神奈川）
	*宮脇 亮介（東京）		
	*名越 利幸（岩手）		

評議員 兼 常務委員長

松森 靖夫（山梨）

常務委員（**印は、評議員兼務）

任 期	平成 23・24 年度	平成 23 年度
	清水 政義（東京） 加藤 尚裕（埼玉） 南島 正重（東京） 内記 昭彦（東京）	
	相場 博明（東京） **馬場 勝良（東京） **岡本 弥彦（神奈川） **林 慶一（兵庫）	
	**松川 正樹（東京） **加藤 圭司（神奈川） **五島 政一（東京） **林 武広（広島）	
	**宮下 治（東京） **渋谷 紘（埼玉） **米澤 正弘（千葉） **濱田 浩美（千葉）	
	**遠西 昭寿（愛知） **宮脇 亮介（東京） **伊藤 孝（茨城） **廣木 義久（大阪）	
	**高橋 修（東京）	

監 事 渡辺 嘉士（東京・平成 23・24 年度）・小川 忠彦（東京・平成 23 年度）

七輪でマグマをつくる

—身近なものを用いてマグマ形成過程を観察する—

Observation of Magma Formation Using Portable Clay Cooking Stove
and Familiar Products

下岡 順直^{*1}・三好 雅也^{*1, *6}・馬渡 秀夫^{*1}・吉川 慎^{*2}・山本 順司^{*1}

渡辺 克裕^{*3}・齋藤 武士^{*4}・杉本 健^{*5}・山田 誠^{*1, *7}

三好 まどか^{*1, *8}・竹村 恵二^{*1}

Yorinao SHITAOKA, Masaya MIYOSHI, Hideo MAWATARI, Shin YOSHIKAWA,
Junji YAMAMOTO, Katsuhiko WATANABE, Takeshi SAITO,
Takeshi SUGIMOTO, Makoto YAMADA, Madoka MIYOSHI
and Keiji TAKEMURA

Abstract: Practical training in the observation of magma formation helps students to comprehend on the basis of the undulating and changing land of Japan. Although it is not too difficult to make magma with specialized scientific instruments, such closed system experiments impede full appreciation of the magma formation process. Thus, both teachers and students are challenged to simulate making magma using readily available products. In order to melt a rock completely, its temperature must exceed the liquidus temperature, which is defined as the maximum temperature above which the rock will be in a completely liquid phase. It is therefore appropriate to use a mixture of a siliceous rock and fluxes as a starting material because the liquidus temperature of the siliceous rock is relatively low and falls by addition of the fluxes. The experimental process we designed was successful in melting the material completely under an open system in combination with a portable clay cooking stove and commercial wood charcoals. The application of a dryer as bellows helped to bring the temperature enough for the complete melting.

The following four aspects of this training were identified as important: safety, accessibility, efficiency, and scientific accuracy. According to results of a questionnaire completed by the students after the experiment, they correctly comprehended the process and temperature of magma formation.

Key words: magma, teaching materials, portable clay cooking stove (Shichirin), familiar products

^{*1} 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 ^{*2} 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター ^{*3} 別府市立境川小学校 ^{*4} 信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点 ^{*5} 地熱エンジニアリング株式会社 ^{*6} (現所属) 東京大学地震研究所 ^{*7} (現所属) 奈良女子大学共生科学研究センター ^{*8} (現所属) 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設

2011年1月14日受付 2011年5月31日受理

1. はじめに

日本列島において普遍的に存在する火成岩の成因を理解することは、火山活動やそれに伴う地震や津波などの自然現象が多発する土地に居住する筆者らにとって、大地の成り立ちを考え、そして将来の災害などに対して警告や心構えを備えるためにもたいへん重要である。また一方で、火成活動は温泉などの恩恵ももたらしている。

学校教育における火山などの学習は、小学校学習指導要領では6年生理科で、単元「土地のつくりと変化」において「土地やその中に含まれるものを観察し、土地のつくりや土地のでき方を調べ、土地のつくりと変化についての考えをもつようにする」(文部科学省, 2008a)と挙げられている。また、中学校理科第2分野では、単元「大地の成り立ちと変化」で、「火山の形、活動の様子及びその噴出物を調べ、それらを地下のマグマの性質と関連付けてとらえるとともに、火山岩と深成岩の観察を行い、それらの組織の違いを成因と関連付けてとらえること」(文部科学省, 2008b)という項目が設けられており、大地の成り立ちやその変化について学習する機会がある。

火山やマグマ(以下、本報告では流動状態の溶岩も便宜的にマグマと称する)の教育現場における問題点の一つは、火山活動や火山深部のマグマだまりなどを実際に観察することがほぼ不可能ということである。従来の教材としては、噴火様子の映像や写真などの資料が専らであろう。最近では、歯科用印象材を用いた教材開発(多和田ほか, 2009)やキッチン火山学として、チョコレートや小麦粉、パン粉などを用いて火山噴火による溶岩の流れの様子や溶岩ドームの形成などを模擬的に再現できる工夫もなされてきている(例えば、西来ほか, 2010など)。これら映像や模擬アナログ実験による自然現象の可視化は火山噴火現象の機構を安全に理解する手段としては有効であろう。しかし、実際の火山噴火は高温のマグマや火山ガスが関与するためたいへん危険であり、甚大な被害をもたらすものである。例えば、雲仙普賢岳噴火(1990~1995年)では43人が犠牲になり、三宅島噴火(2000年~)では住民が全島避難を余儀なくされた。従来の写真や映像による授業やアナログ実験のみでは、これら火山活動の迫力を伝えることや一種の怖さを感じさせるためには十分ではないだろう。そこで、筆者らは直観的に理解を助ける方法として、実際に火成岩を高温

で溶融してマグマを作ることができる実験装置の開発を行い、従来困難であった教育現場で高温のマグマをつくり、観察するという実験を成功させた。本稿では、マグマ生成実験装置の教材開発について紹介する。これらは本来、大学の遠隔地研究施設が施設一般公開や地域主催事業が行うアウトリーチのための教材開発として始めたが、学校現場でも製作して実施できるように、より身近で安価な物品で、より安全に行うためにさまざまな改良と工夫を行った。そして、小学校における教育実践を行い、教材としての効果を確認することができた。その結果も併せて報告する。

2. マグマの生成実験に関わる条件

(1) マグマの生成実験を容易にするための3方法

マグマとは、「地下に存在する岩石の溶融体」(荒牧, 2005)を指す。一般的にマグマはケイ酸塩鉱物が溶融することにより生成するが、岩石は異なる融点を持つケイ酸塩鉱物やガラス質成分の混合物であるため、溶け始める温度(ソリダス)と溶けきる温度(リキダス)に幅がある。岩石を完全に溶かすには、加熱容器は放熱などの影響を受けるため、リキダス以上の温度にする必要がある。リキダスに到達させるための工夫として、「リキダスの低い岩石を用いる」、「リキダスを下げる」および「リキダス以上に加熱する」の3方法が考えられる。これらの項目について詳述する。

(2) リキダスに到達させるための工夫

・リキダスの低い岩石を用いる

地球の岩石をその主成分であるケイ酸塩含有量で区別した場合、ケイ酸塩成分が少ない玄武岩はリキダスが1,200℃程度と高いが、花崗岩のリキダスは900℃程度である(Spera, 2000)。それゆえ、マグマ生成実験にはケイ酸塩成分が多い岩石を用いればよい。例えば、花崗岩の風化残留土砂であるマサ土や花崗岩質堆積岩などが適している。

・リキダスを下げる

岩石の溶融は、微視的に見ると構成鉱物の化学結合の切断を意味する。したがって、鉱物の化学結合を切りやすくする物質を加えれば岩石のリキダスを下げられる。昨今の地球科学的議論で取り上げられることが多い岩石の融点降下物質は水である(Kushiro, 1983)。しかし、筆者らが目的とする常圧開放系でのマグマ生成実験では水を融剤として使うことはできない。常圧において岩石の融点降下を伴う実験法としてよく見る

ものはガラスビードの作製が挙げられる。これは蛍光エックス線を用いた岩石の化学組成分析において、粉末試料の粒度や不均質性による影響を軽減させるために粉末岩石試料を加熱しガラス化させる作業である。その際に一般に用いられる融剤は、炭酸ナトリウム (Na_2CO_3 , 融点 851°C) や四ホウ酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 融点 878°C) などがある。

・リキダス以上に加熱する

一般的な岩石のリキダスは上述したように $900\sim 1,200^\circ\text{C}$ である。融剤を加えることによりリキダスは低下するが、ある程度の体積を持つ岩石試料を開放系で加熱溶解させた場合、試料の熱を逃がさぬ工夫が必要である。加熱により岩石がソリダスに到達すると、部分熔融メルトが粒間に浸透し、熱媒体の役割を果たし始めるが、それまでの加熱段階では外界の冷たい空気による冷却や熱源からの熱伝導効率に注意を払わねばならない。例えば、ルツボに入れた岩石試料を加熱する場合、ルツボと試料との熱伝導効率を上げるために岩石試料を微粒粉末に加工したり、ルツボの上面からも加熱できる実験配置にしたりすることが方法として挙げられるであろう。

(3) 学校現場における制約

上述した方法を用いてマグマ生成実験は可能になる。しかし、学校教育現場でこのマグマ生成実験のために、授業時間確保などによる時間の制約や実験準備に時間が割けないほか、多額の資金を投入して実施することは非常に困難である。したがって、生徒や学生が実験状況を容易に理解できるよう、なるべく身近で安価な器具を用いる工夫が必要となる。ただし、実験器具が高い頻度で破損したり爆発したりするようでは安全面からみて使えない。それに加え、マグマ生成実験を地学教育の一環として行う場合、岩石試料の熔融過程の観察も重要な要素となるため、なるべく開放系で行うことが望ましい。

筆者らは、これらの制約の中から安全確保を第一に考えつつも、以上の条件を満たすよう工夫を積み重ねた。

3. マグマ生成実験装置の教材開発

ここでは、マグマを安全に、かつ効率良く作成する教材開発にあたって重ねたさまざまな工夫の行程を、開発の実験段階を追って記述する。

(1) マッフル炉を用いたマグマ生成実験

2章で挙げたようにさまざまな条件に記した「リキ

ダスに到達させるための工夫」を達成させるために、当初筆者らは下記のような条件で実験を行った。

・リキダスの低い岩石

大分県別府市では、活火山である鶴見岳由来のデイサイト質火山岩が多産するため、これらを粉末 ($1\sim 2\text{ mm}$ 程度) にして試料とした。デイサイト質溶岩は珪酸塩成分が多いため、比較的低いリキダスが期待できる。

・リキダスを下げる

融剤には、蛍光エックス線分析におけるガラスビード作成に用いた薬剤 (Na_2CO_3 および $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) を用いた。

・リキダス以上に加熱

$1,000^\circ\text{C}$ 程度まで温度を制御しながら安全に加熱できる装置として、鉄クロム線ヒーターを用いたマッフル炉を採用した。

上記の薬剤や器具は学校現場で手軽に利用できるものではないが、マグマを効率良く安全に作成するための条件「リキダスに到達させるための工夫」を達成させるための叩き台として採用した。実験手順を記す。

1. ハンマーで岩石を破碎した後、乳鉢で粉末にした岩石試料を 15 g 用意。
2. 融剤として Na_2CO_3 を 18 g と $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ を 36 g 用意。
3. 高純度アルミナルツボ (200 ml) に試料と融剤を入れてよく混ぜ合わせる。
4. マッフル炉にルツボを入れて、 $1,000^\circ\text{C}$ まで加熱。

この手順で実験を行うと、マッフル炉内温度が $1,000^\circ\text{C}$ に到達した後 30 分程で試料は完全に熔融した。

このマグマ生成実験方法を用いて、大分県教育庁主催の事業「おおいたっ子科学マインド育成事業」(2007年2月実施)で模擬実験を行った。図1は、マグマ生成実験の様子である。筆者らは当初の目標であった本物のマグマを見せることに成功したが、下記の課題を残した。

- ・マグマが生成される過程を見せられなかった。
- ・マグマが持つ高い温度を実感させることができなかった。
- ・身近なもので実験することができなかった。
- ・この予備実験段階ではあったが、アルミナルツボが炉内で破壊され、炉材を熔融した (図2)。



図1 マグマ生成実験の様子
(大分県教育庁主催の事業「おおいたっ子科学
マインド育成事業」(2007年2月実施))

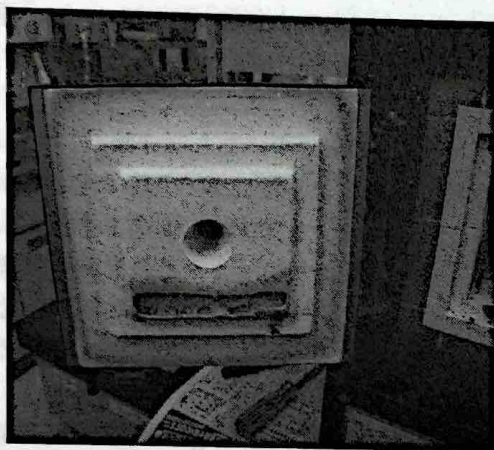


図2 マグマ生成中にアルミナルツボが炉内で破壊
され、マッフル炉の炉材が溶融した状況(開
扉中央下部付近)。

(2) 七輪を用いたマグマ生成実験

マッフル炉を用いたマグマ生成実験は、実施場所が屋内であれば安全を確保(火事や酸欠を防止)するには最善の選択である。しかし、マグマが生成される過程を見せるという次の段階へは開放系で実験を行わなければならない。その場合、マッフル炉ではなく別の方法で岩石を加熱しなければならなかった。

筆者らにとって、比較的身近で開放系の高温発生機器としてまず着想した機器は、工事現場などで使われるアセチレンバーナーであった。しかし、より身近で気軽に利用できる開放系高温発生機器としてアセチレンバーナーは不適であり、次に着目したのは七輪(七輪は市販されているものを用いた。例えば、(株)キンカのケイ藻土製七輪(大型9号)である。)である。七輪は一般的な木炭を使用した場合、七輪上方の温度はおよそ750℃とされるが、七輪の中心温度は

1,450℃に達し、送風により七輪上方の温度を850℃以上に上げることが可能である。送風させるメカニズムとして、古代より行われているたたら製鉄で用いられた鞆の原理を応用し、より強い送風によって七輪内部の高温領域を上方へ押し上げることを試みた。図3は、市販の木炭を燃焼させている七輪に、送風口からドライヤーで強制的に空気を送り込んでいる状態である。この時点において、七輪上に設置したアルミナルツボの外部温度を1,000℃まで加熱することに成功したが、岩石の完全溶融のためにリキダス以上の温度を出すには至らなかった。図4は、京都大学地球熱学研究施設本部(別府)の施設一般公開(2010年7月に実施)での実験風景である。使用した岩石試料と融剤は、マッフル炉を用いた実験と同様である。アルミナルツボ外部の温度は1,000℃まで加熱されているが、試料表面からの放熱、および木炭の消費のため岩石試料をリキダスまで加熱させることができなかった。そこで、やむをえずガスバーナーで試料表面を加熱することによりマグマを生成させた。これにより、マグマが生成される過程を直接観察可能になり、さらにマグマが持つ高い温度を実感させることはできた。

この時点で、この段階の目標であった開放系でのマグマ生成実験には成功したことになるが、ガスバーナーを併用したことによってなるべく身近な道具で行うという目標までには至らなかった。また、この方式による実験には以下2点の課題が残った。一つ目に、七輪で1,000℃の高温で加熱中にアルミナルツボ周辺

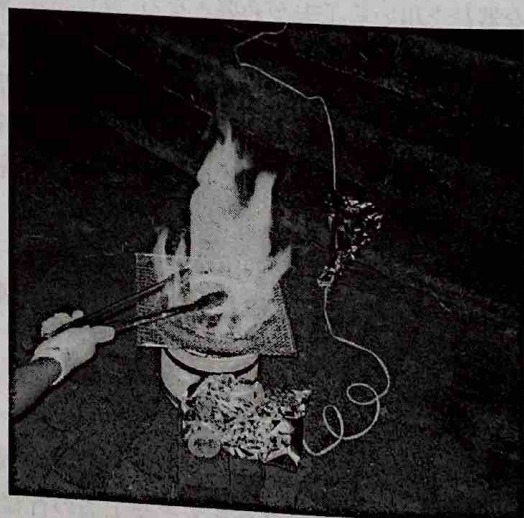


図3 七輪の下部にある送風口からドライヤーで強制的に空気を送り込んでいる状態
火粉からドライヤーを保護するために本体をアルミホイルで覆っている。



図4 七輪を用いたマグマ生成実験の様子（京都大学地球熱学研究施設本部（別府）の施設一般公開（2010年7月に実施）
上部よりガスバーナーで試料表面を加熱している。



図5 1,000℃の高温で加熱した結果、溶断された鉄製金網
溶断された鉄線部分がこぶ状になっている。



図6 加熱実験中に生じたアルミナルツボの破壊状況
奥側が破損前、手前が破損後の状態。

の鉄製金網が溶断され（図5）、アルミナルツボが七輪中に落下することが起こった。金網の素材とされる銑鉄の融点は1,200℃程度であるが、金網の溶断は加熱による軟化とルツボの重みによるクリープ変形が生じた結果と考えられる。二つ目に、加熱実験中にアルミナルツボの破壊（図6）が生じる場合がある。急速な加熱によるアルミナルツボ内外の急激な温度差から生じた内部応力が起因したためと思われる。このような破壊は、かさ密度の低いものを使えばある程度防ぐことは可能であるが、常温から数分で1,000℃を超えるような加熱を行った場合、アルミナルツボでは耐えられない。

マッフル炉の代わりに七輪を用いることで、岩石試料の溶融過程を見せることが可能となったが、安全性や効率、経済性の面で課題を残した。

(3) 安全、身近、安価

次に克服を目指した課題は、下記5点である。

- ・金網の代替品を探す。
- ・破壊されない加熱容器を使う。
- ・より長時間の加熱を安全に行う。
- ・ガスバーナーを使用せずに岩石試料を加熱する。
- ・より身近で安価な素材ですべて構成する。

1) 金網の代替品

金網の溶断は、上述の理由のほか、素材自体のクリープ強度の低さ、線材の細さによる熱容量の小ささ

や舞い上がる炭の粒子が付着することによる浸炭の影響も無視できないように思われる。そこで筆者らは、一般的に耐熱性が期待できる、磁石につかない(18-8)ステンレス（オーステナイト系ステンレススチール、SUS304）を線材とした金網の使用を試した。銑鉄を使用していたときに比べ、オーステナイト系ステンレススチールの溶断の程度は大幅に軽減されたが、繰り返し実験に耐えるほどではなかった。また、ステンレス製金網の入手は困難ではないが決して安価とはいえないため使用を断念した。次に考案した改善策は、より太い線径のステンレス線を用いることである。これは太いステンレス線を用いた金網の使用という意味ではない。こういった金網を使った場合、線材からの放熱や吸熱により加熱効率が低下する可能性がある。筆者らが目指したのは1本の太いステンレス線を折り曲げ、ルツボを支えるという方策である（図7）。これならば加熱による溶断や加熱効率の低下も起こらず、かつ安価である。

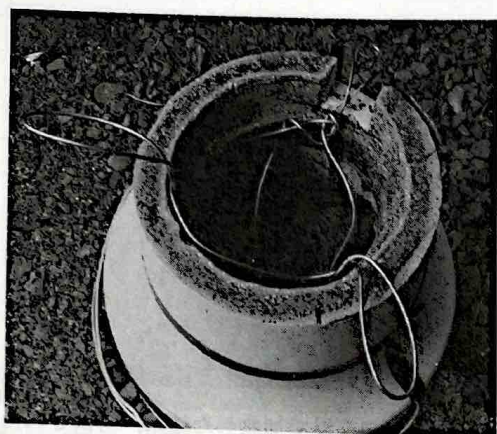


図7 1本の太いステンレス線を折り曲げ、ステンレス製の加熱容器を支える金具を七輪に設置した状況。

2) 破壊されない加熱容器

これまで試料の受け皿として、融点が十分高いアルミナ製ルツボを一貫して使用してきた。しかし、身近なものを用いるという方針に従い安価なアルミナルツボを用いると、ルツボに不純物として含まれているケイ酸塩成分が融剤と反応し、加熱実験中にアルミナルツボ自体が溶融を起こすことがたびたびあった。しかし、高純度アルミナルツボは非常に高価であり、さらに熱衝撃に耐えるように調整されたセラミック容器や、チタン製や白金製のルツボは高い融点であるという面では使用の可能性も考えられたが、より高価である。ところが、ステンレス製の容器を理化学品として探すと高価であるが、ステンレス製のコップは日用雑貨として販売されている（筆者らが用いたのは、105円/個で購入したエコー金属(株)のステンレス手付ボール（内径約13cm））。安価なステンレス製素材の使用により、筆者らは実験をより身近で、かつ安全に行うことが可能となった。

3) 七輪による加熱時間の持続

次の課題は、七輪による加熱時間の持続方法である。筆者らは燃料とする木炭の量を増加することで解決させることにした。木炭をこれまで以上に使うには、二つの方策が考えられた。一つは加熱中に補充することであるが、補充するには大きな補充口を設けなければならない。補充口からの放熱により加熱効率の低下が懸念される。そのため、二つ目の方策として七輪を大きくすることにした。図8は、改良された加熱炉である。より安価な素材を目標としているため、七輪の底を刃の径が大きい高速カッターで切断して上下逆さにし、七輪を二段重ねにすることによって一度の木

炭の投入量を大幅に増やすことを可能にした。

この方策により、課題である試料上部からのガスバーナーを用いた加熱も不必要となった。上下逆さにして七輪を二段重ねにしたことにより、七輪を重ねた部分からの放熱も少なく、加熱炉の上端は七輪の底面のため面積が狭く、金網の代替品として採用したステンレス線の支えとステンレス製加熱容器を七輪内部に押し込むことにより、容器の外面全体を加熱することができるようになった。また、これまでの加熱では試料容器の加熱には寄与しない火柱が立っていた（図9(a)）が、この方式ではより効率的な加熱が可能である。図9(b)は、加熱中の新型加熱システムである。使用した素材は、融剤を除きほぼすべて身近でかつ安価なものである。加熱炉となる七輪は、10回以上の加熱実験を行ったが装置の破損は一度も起こっていない。また、非常に効率良く試料容器を加熱することが



図8 二つの七輪の一方を上下逆さにして二段重ねにして作製した加熱炉
上側の七輪の底を切断し、そこにステンレス製の加熱容器を七輪内部にはめ込むようにした。

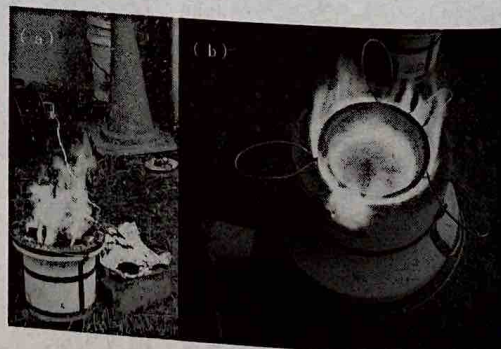


図9 七輪を用いた加熱炉の改良前(a)と改良後(b)
改良後(b)は改良前(a)に比べて加熱炉の外部に広がる火粉が減り、効率的な加熱が可能になった。

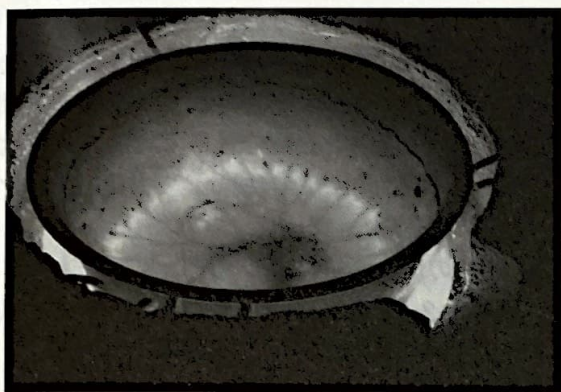
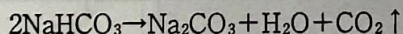


図10 マグマがステンレスカップ容器内で対流している様子
(カラー写真は、http://www.vgs.kyoto-u.ac.jp/InetHome/shitaoka/地学教育2011/Figure10_web.tifで公開しているので参照されたい。)

でき、木炭への着火から15分程度で熔融したマグマ状態を作ることができる(筆者らが使用した前述のケイ藻土製七輪に基づくデータであり、市販されているさまざまな仕様の七輪を用いた場合の安全性については要確認である)。完全開放型のマグマ生成実験であり、マグマが容器内で対流している様子まで観察できる(図10)。

4) より安価な融剤の選択

以上で課題と考えてきた項目については解決した。しかし、使用する融剤 Na_2CO_3 と $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ はより身近な物質とは言い難い。そこで、これらの代替品を探した結果、食品添加物として用いられる重曹(NaHCO_3)と、殺虫剤やスライム製作に使われるホウ砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)は比較的身近な物質であり、食料品店や薬局などで入手可能である。重曹は加熱すると下記の化学反応を生じ、炭酸ナトリウムを生製することができる。



また、ホウ砂は 400°C くらいまで加熱すると無水物、つまり $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ になる。実際に市販の重曹とホウ砂を融剤として用いたマグマ生成実験を行ってみたところ、上記のような反応のため昇温する時間を余分に要したが、投入した木炭をすべて消費する前にマグマを生成することができた。実験時間に制約がある場合は、事前に融剤だけを加熱精製しておけばよいであろう。

5) 実験装置と手順の整理

以上をもとに、教材開発したマグマ生成実験装置を用いた「七輪でマグマをつくる」実験の方法手順につ

いて以下記述する。実験のねらいは、「火山活動の迫力や一種の怖さを直観的に理解することを手助けし、大地の成り立ちやその変化について学習する」ことである。

・実験装置と安全上の主な注意点

使用する材料と道具にかかわるものの一覧およびそれらに関する留意点を表1に示す。加熱装置本体は、市販の七輪を加工して作製する。本実験で用いた七輪はケイ藻土製のものを使用しているため、加工が容易である。また、同じ仕様の二つの七輪の開口部同士を重ね合わせることににより、七輪の接合部分の隙間を最小限にし、炎や火の粉の飛び散りを防ぐ。しかし、加熱装置の作製にあたっては、事前の十分な予備実験の実施が必要である。また、加熱装置である七輪は一般的な使用温度を超えて高温であり、さらにステンレス製加熱容器も実験後長時間にわたって高温状態を保つことなど認識しておく必要がある。実験者も防護メガネや耐熱性手袋、長袖を着用するなど十分な装備を心がけるべきである。やけどなど万が一の事態に備えて、水を入れたバケツや消火器なども手元に置いておくなど入念な安全対策が求められる。

・実験手順

1. ステンレス製加熱容器には、岩石試料と融剤 Na_2CO_3 と $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ をあらかじめ入れて混ぜ合わせておく(岩石試料、 Na_2CO_3 、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ の割合は重量比でおよそ1:1:2)。
2. 七輪の一段目に木炭を入れて着火する。
3. 着火を確認後、二段目の七輪を乗せてその中に木炭を挿入し、七輪の上にステンレス線の支えと試料を入れたステンレス製加熱容器を設置する。
4. 一段目の七輪の送風口から、ドライヤーを用いて送風する。このとき、ドライヤーを火の粉から保護するため、本体にアルミホイルなどを被せるとよい。
5. マグマ状態になるまで観察する。試料は10~15分程度で熔融する。
6. 後述の授業実践では、生成したマグマを水槽付スロープの上に流し、マグマの流れる様子と、マグマと水の接触反応の様子を観察させた。この部分が児童にはより深い印象を与えたが、かなり高温であることや水の突沸、固結試料の収縮破碎などの危険もあるので、無理に実験手順に組み込む必要はない。ステンレス容器内にお

けるマグマの対流の観察のみでも、火山活動の迫力を伝えるという当初の目的は十分達成できると考えられる。

4. 小学校での授業実践例

この教材の有効性や教育効果を確認するために、学校教育現場におけるマグマ生成実験の実施を試みた。以下に、小学校で実施した授業実践結果の詳細について述べる。

(1) 小学校での課外授業実施経緯

筆者らが京都大学地球熱学研究施設本部（別府）の施設一般公開（2010年7月30日に実施）で七輪を用いたマグマ生成実験を実施した際、見学者の一人であった渡辺（本稿第6著者：大分県別府市立境川小学校）からの出前課外授業の依頼により実施したものである。境川小学校が位置する大分県別府市は、鶴見岳や由布岳という第四紀活火山と多くの温泉が存在するため、児童にとって火山や温泉、地震などは身近な存在である。したがって、筆者らが開発した教材をこの単元に組み込むことにより、自分たちの住む土地が火山の恩恵を被っていることを児童に実感させられる教

育的效果が期待できると考えた。そこで、6年生68名を対象に、2010年11月9日、11日に授業実践を行った。授業は3時間分を設定して、まず事前授業（1時間目）で基礎的な知識の習得と実験への意欲づけを行い、2・3時間目（2時間分）で七輪によるマグマ生成実験を行った。

(2) 授業の流れ（学習指導案）

1時間目と2・3時間目の授業の流れの概略を以下に、詳細な授業展開は図11-1, 2に示す。

・1時間目

1. 大分県、特に別府は火山や温泉が多いのはなぜか（導入）(10分)
2. 火山活動と大地の成り立ちについて説明する(15分)
3. マグマの温度は何度か、高温状態をつくり出すための方法やマグマをつくる実験方法などについて班で話し合って考えさせる（アイデアとその検証実験方法への意欲づけ）(20分)

授業中に児童が考えた実験方法などについて、ワークシート（図11-3）に記入させた。

表1 実験「七輪でマグマをつくる」に使用する材料と道具の一覧および留意点

品名	個数・量	概要や安全上の注意点など
七輪	2	片方の七輪の底を高速カッターなどで切断して、二つの七輪を重ねる
市販の木炭	一箱	備長炭よりも樗類のもので十分高温になる
ドライヤー	1	送風量を調整して、加熱しすぎないように注意する
アルミホイル	1	ドライヤーを火の粉から保護する
ステンレス製容器	1	オーステナイト系ステンレススチールの容器を選択した方がよい
ステンレス線	1	三角架のように折り曲げる。ステンレス製容器のぐらつきを防ぐ
Na_2CO_3	50 g	重曹（ NaHCO_3 ）で代用可能
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	100 g	ホウ砂（ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ）で代用可能
溶岩片	50g	粉碎しておく
放射温度計	1	熔融していく過程の温度計測
はかり	1	秤量用
計量スプーン	1	秤量用
手袋	人数分	防熱性および耐熱性のものがよい
防護メガネ	人数分	赤外線透過しないものがよい
火ばさみ	1	木炭やステンレス容器を扱うときに使用
トング	1	木炭やステンレス容器を扱うときに使用
木づち	1	木炭を細かくする
着火剤	1	木炭の火おこし用
水	1	やけどや延焼に備えるため
消化器	1	延焼に備えるため

土地の変化 3 時間

くうち 2 時間 京都大学 地球熱学研究施設の講師を招聘した授業>

目標

- 土地は地球内部の活動や、火山活動、大きな地震によって変化することについて興味・関心をもち、土地の変化について進んで調べようとする。
- 土地は火山活動や大きな地震による大きな力のはたらいて変化してきたことについて、多面的に考えることができる。
- 土地の変化を実験によって調べ、まとめることができる。
- 土地は長い年月で火山活動や大きな地震の大きな力によって変化してきたことを理解する。

展開：マグマの温度はいったい何度になるか。事前に仮説と実験方法を考える。(1 時間)

時	学習活動	児童の反応例 ●児童 ○講師・教師	評価・留意事項
	私達が住む大分県。特に別府は火山や温泉が多いと聞く。なぜだろうか？		
(10分)	① 別府と火山、温泉について話し合う。	● 別府市は温泉で有名。火山があるから温泉が出る聞いたことがあるから。 ● 地下にたくさん温泉があるから。	火山噴火のしくみなど、理解の難しいものに深入りしないようにする。土地のようすが変化したことを中心にまとめさせる。
(15分)	② 火山活動で大地ができたという話を伝える。	● 地下にマグマがあるから。 ○ マグマは岩石がドロドロに溶けたもの。 ○ マグマはいったい何度くらいなのだろうか？	
	マグマの温度はいったい何度なのだろうか。身近に調べる方法はあるか。		
(20分)	③ マグマを作る実験の方法を考える。	● 温度計を入れて測る。 ● 気温の温度計では100度までしか測ることができない。 ● マグマは火山にあって身近にはない。	高い温度の炎を作るための手段を思いついたら、意見をまとめ、実験の方法とする。
	学校のこの場でマグマを作ることはできないか。		
		● マグマが冷えて固まったものが岩石。逆に岩石を高温にすることができたらマグマにならないだろうか。	
	実際に石を高温に熱してみよう。マグマのように溶けるだろうか？		
	次の時間に専門家と一緒に実験をして、実際に確かめよう。		

図 11-1 小学校 6 年生理科で行ったマグマ生成実験授業の展開 (1 時間目)

展開：運動場の砂は何度でマグマとなるか、実験と考察（2時間）

時	学習活動	児童の反応例 ●児童 ○講師・教師	評価・留意事項
(40分)	学校の石を高い温度にしたら、マグマのように溶けるだろうか？		
	① 石を高温にしてみよう、溶かせるか？	○石を高温にして溶かしてみる。 ●なかなかうまくいかない。	
	石ではうまく溶けなかった石を細かく砕いた砂はどうだろうか？		
(35分)		●溶かすには石よりも細かい砂がよさそう。 ○チョコレートやカレーのルーなども細かくした方が溶けやすい。 ●前の授業で砂は岩石が砕けたものと聞いた。（意見が出ない場合は教師がうながす） ○身近な運動場の砂ではどうだろうか。	1000℃の高温になる安全を第一に児童の行動を終始見守る教師の指示を守るなどの約束を徹底する。
	運動場の砂は何度でマグマのように溶けるのだろうか？		
	② マグマを作る実験の方法を考える・	●自由に予想をたてる。 ●炭と七輪だけでは砂が溶ける気配はない。 ○まだ砂を手で触ることができる。 ●温度計で測ると砂は30℃くらい。 ○別のやり方、方法は？ ○七輪が炉のように温度が高くなる方法を紹介する。 ●時間があれば、非科学的なおまじないグッズの類いも紹介。折りで温度をあげるなどで興味をそそる。	並べている実験サンプル道具から、砂が高い温度になるための方法を考えさせる思いつき次第順番に試す。
(10分)	運動場の砂は1000℃でマグマになる		
	④ 実験から言えそうなことをまとめる。	<結果> 運動場の砂はおよそ1000℃で液状となりマグマになったことから、砂は火山活動の結果できたマグマが冷えて、長い時間をかけてかたまり石となり、細かくくだけたものが土地をつくったものと考えられる。 大分（別府や湯布院）に温泉が多いのは、地下水がマグマの熱によって温められているからである。 時間があれば、講師による補足解説、土地への想いなどを語る。	講師による土地のつくりについてまとめをする。 今回は授業の中で行った実験であり、子どもたちだけで「火遊び」になるようなことは絶対にしてはいけない！という指導を付け加える。

図 11-2 小学校6年生理科で行ったマグマ生成実験授業の展開（2・3時間目）

・2・3時間目 (2時間連続)

授業は室外で行い、安全柵を設けるなどして児童に火の粉がかからないように、また溶融途中のマグマを見る場合に赤外線による目のトラブルを極力抑えるために、遠くから観察できるようにモニターも設置した(図12)。児童の引率は理科担当が行い、講師役一人のほかに、安全管理(記録や実験補助などを含む)として三人を配置して授業を行った。

土地の 名前 ()	できた ()	6年 ()	組 ()
<めあて> 高温のマグマの温度はいったい何度なのだろうか？ 身近な道具でマグマを作り、温度を測ることはできないだろうか？ <マグマを作るために必要な道具> 思いついたものを自由に書こう！			
<マグマは何度か？どうやって温度を測るか>			

図11-3 マグマ生成実験授業の1時間目(事前授業)に使用したワークシート

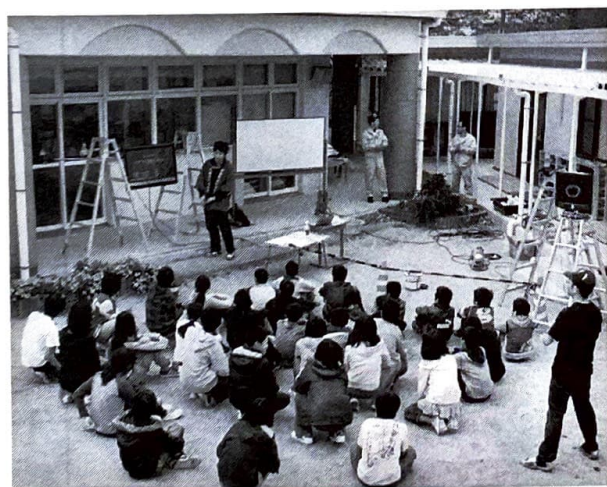


図12 マグマ生成実験の授業風景(2・3時間目)
右端のモニターが、遠くから実験風景を観察できるように設置したモニターである。

1. アイディアの検証(40分)

1時間目に児童が考えた高温状態をつくり出すための方法や岩石試料を溶融するための方法のうちいくつかを取り上げて実験を行う

2. 七輪によるマグマ生成実験の実演(35分)

開発製作したマグマ生成実験装置で実演を行う。高温状態になった時点における炎や、岩石試料が溶融して液状のマグマになっていく様子を観察させた。

3. 授業のまとめ(10分)

児童の理解度とマグマ生成実験への関心度や安全面などへの感想などを聞き取るために、授業後に事後評価アンケート(図13-1)を実施した。

(3) ワークシート、アンケートの結果解析と授業評価

1) ワークシートの集計結果

1時間目のワークシートの集計結果では、マグマ生成のための方法として「虫めがねで太陽光を集めて温度を上げる」、「岩石にガスバーナーをあてて直接燃やす」、「カセットガスボンベ式コンロを使う」、「酸性水溶液をかけて燃やす」、「バーベキューに使う金網と炭を使って燃やす」、「天ぷら油に浸して燃やす」、「石をハンマーで砕いて細かくしてから加熱してやる」などの意見が児童から挙がった。児童にとって、水の沸騰温度以上に温度が上昇するという点について具体的にどのようなイメージが曖昧であり、温度をより高温に上昇させるためにどのような方法が考えられるかがまだ認知されていないと思われる。しかし、「バーベキューに使う金網と炭を使って燃やす」や「石をハンマーで砕いて細かくしてから加熱してやる」という意見が児童から挙がっているのは非常に興味深い。次に、岩石試料が液状に溶融してマグマになる温度について質問したところ、「100℃」「500℃」「1,000℃」「1,500~3,000℃」「5,000℃」「10,000~20,000℃」といった意見が挙げられた。

2) 1)を受けて取り組んだ授業でのマグマ生成実験

2時間目以降に行った、児童が提案したアイディアは、時間の制約上すべてを行うことができなかったため、筆者らの実験装置へ導入することも鑑みて、「バーベキューに使う金網と炭を使って燃やす」と「石をハンマーで砕いて細かくしてから加熱してやる」について簡単に実演し、これだけでは岩石試料を溶かしてマグマにするまでの温度に至らないことを証

土地の変化 — マグマの温度を測ろう —

みなさんと一緒にマグマ実験ができてとても楽しかったです。みなさんの反応を知りたいので、アンケートをとらせて下さい。あてはまるものに○をつけて下さい。気軽に答えて下さいね。

1 マグマについて新しいこと（自分の知らなかったこと）を知ることができましたか？

1 もっと知りたい 2 できた 3 できなかった 4 わからない

2 授業の中で、どんな内容に一番興味を持ちましたか？

1 砂が溶けてゆく様子 2 いろんな工夫で七輪の火力が強くなったこと

3 温度計の温度 4 色々なものの温度あてクイズ 5 マグマが流れて水に入る様子

3 温泉とマグマの関係について理解できましたか？

1 理解できた 2 まだ理解できていない

4 マグマの温度は何度でしたか？

() °C

5 溶けた砂（マグマ）を見てどう思いましたか？（いくつ選んでもOK）

1 おもしろかった 2 つまらなかった 3 不思議だった 4 きれいだった

5 こわかった 6 わからない()

6 七輪でマグマを作る実験についてどう思いましたか？（いくつ選んでもOK）

1 わくわくした 2 たいくつだった 3 炎がこわかった 4 また見たい

5 その他()

7 講師の先生のお話はどうでしたか？

1 おもしろかった 2 まあまあだった 3 もう少し（イマイチ！） 4 わからない

8 研究者と渡辺先生がいっしょに授業を行うことについてどう思いますか？

1 楽しい 2 勉強になる 3 いつもよりたいくつ

9 渡辺先生に、また研究者といっしょに授業をやってほしいですか？

1 またやってほしい 2 もういい 3 わからない

10 研究者の先生の話聞いて、自分も将来研究をしたいと思いましたか？

1 何かの研究を試してみたい 2 研究したいと思わない 3 わからない

11 その他、質問や感想があれば何でも自由に書いて下さい。

ご協力ありがとうございました。

京都大学・地球熱学研究施設（三好・山本・下岡・馬渡）

図 13-1 授業後に児童に配布した授業評価アンケート

明した。次に、「もっと七輪の火力を上げて高温状態をつくるためにどうすればよいか」という質問を児童に対して行い、「炭の量を増やす」、「強い風を送る」という回答を得ることができた。そして、これら回答を満たした方法として、ドライヤーを用いて強制的に送風することで高温状態をつくり、それを持続させるために一度に投入する木炭の量を増やすために七輪を二つ重ねることによって筆者らが開発した加熱炉を紹介した。そして、ハンディタイプの放射温度計を用いて適宜温度を測定し、表示温度の変化を児童に観察させた。強力な送風により七輪の炎の勢いはより増幅した。そのときの温度を数値で示すことによって、岩石試料が溶融して液体のマグマとなった「約1,000℃」の高温を児童に実感させることができた。完全に溶融した後は、ステンレスカップ中でマグマが対流する様

子も観察することができ、マグマの熱や流動性などを直接伝えることができた。その後、水槽付スロープにマグマを流し、マグマの流れる様子と、マグマと水の接触反応の様子を観察させた。マグマがスロープを流れ、冷え固まる様子に感動した児童は多く、授業終了後も固化したマグマを観察する児童がいた。

3) 授業後アンケートの結果解析と児童の授業評価
授業後に実施したアンケート結果を図13-2に示す。まず、マグマとなる温度について(質問4)は、94%の児童が約1,000℃と回答した。そのほかは、100~900℃が3%、10,000℃が3%と回答している。2時間目最後の授業のまとめ(図11-2)において扱った「マグマと温泉の関係について理解できたか」(質問3)との問いに対して、「理解できた」が94%であったことから、本実験は効果的であったと考える。

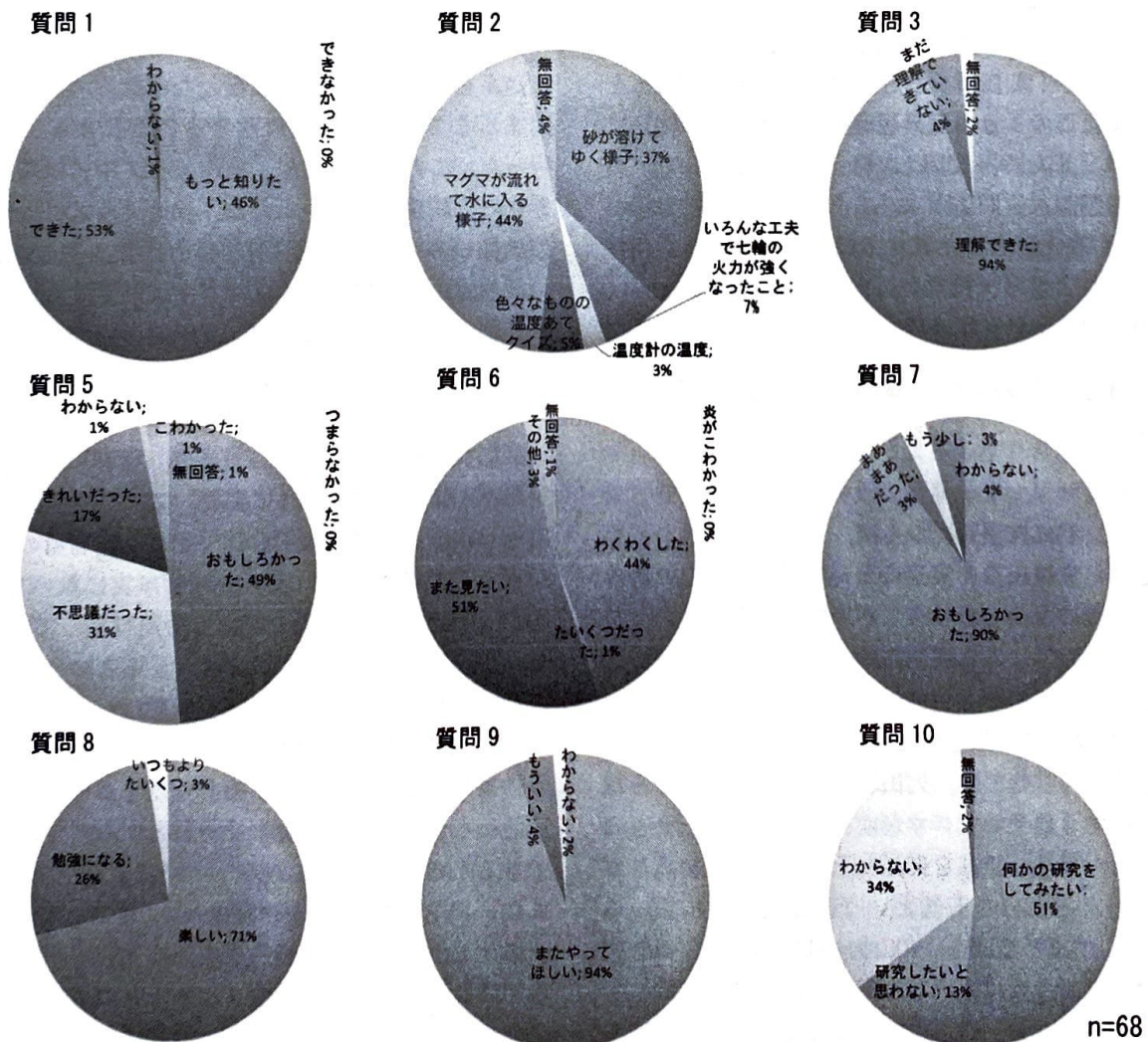


図13-2 アンケート(質問1~3, 質問5~10)の結果
質問4の結果は、本文中に記載した。 n は被験者数を示す。

七輪を用いたマグマ生成実験について(質問6)は、「わくわくした」や「また見たい」が大半を占めた。また、「炎がこわい」と回答した児童がいなかったことから、現時点で小学6年生以上であればこのような実験も可能であるだろう。そして、溶けたマグマについて(質問5)は、「おもしろかった」「不思議だった」「きれいだった」の回答が大半であった。それと同時に「こわかった」と回答した児童も一人であるが、これは、火山噴火による災害を伝えるためや防災意識の向上にも役立つ可能性があり、今後の課題であろう。マグマ生成過程について印象に残ったこと(質問2)では、「マグマが流れて水に入る様子」が一番多く、続いて「砂が融けていく様子」、「さまざまな工夫で七輪の火力が強くなったこと」の回答であった。岩石が液状に融けてマグマになることを観察させることが主眼であったが、その後に行うマグマが流れる様子をいかに観察させることも今後の課題であろう。これについては、5章で後述する。児童の反応(質問8)は、「楽しかった」「勉強になる」が97%を占め、またこのような課外授業を望むか(質問9)については「またやってほしい」が94%であった。自由記載の感想(質問11)にも、「また来てほしい」や「マグマ生成実験をまた見せてほしい」といった回答もあったことから、授業実践は肯定的な結果であり、授業の目的は十分達成できたと考える。

5. 教材としての実験装置の今後の発展と展開の可能性

開発したマグマ生成実験装置を地学関連授業やアウトリーチなどに採用したならば、火山やマグマなどを題材とした実験授業や実演において最も説得力のある説明が可能になるであろう。本章では、生成したマグマの応用実験例による展開の紹介および実験の発展性について述べる。

(1) マグマの冷却速度と結晶の形成

地学関係の書籍では、火山岩の顕微鏡下における特徴について「地下でマグマがゆっくり冷却したときに形成された大きな結晶を斑晶、その他の細粒結晶とガラスからなる部分を石基という」と説明されている(例えば、高橋, 2005)。火山岩中にみられるガラスは、マグマが地表に噴出した際に急冷され、形成したものである。マグマが急冷によってガラスになる理由は、固化までの時間が短すぎて結晶が成長できなかったためであるが、その内容を一般の人たちに説明し、

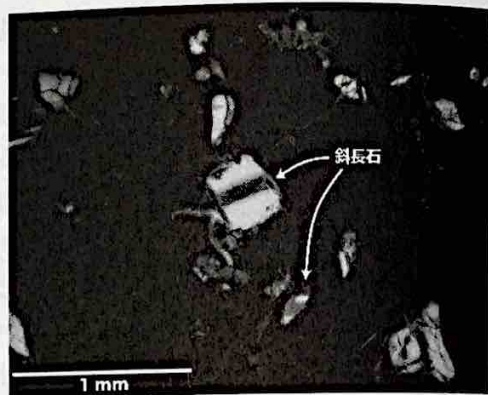


図14 マグマ生成後の徐冷によって成長した斑晶の偏光顕微鏡写真(クロスニコル)
斜長石が観察できた。黒い部分はガラスである。

イメージさせて理解を得ることは容易ではない。筆者らはこれら内容説明の視覚的効果を向上させる目的で、実験生成マグマの徐冷を行い、その生成物と急冷ガラスの比較を試みた。マグマ生成後ドライヤーによる送風を停止し、七輪に設置した状態でマグマが冷え固まるまで数時間以上放置することによって徐冷を行った。この比較の結果、急冷ガラス中には結晶らしきものは観察されなかったが、徐冷ガラスには斜長石の結晶がみられた(図14)。この比較実験結果から、冷却速度の制御により生成マグマの結晶度を変化させることが可能であることと、マグマの冷却・固化の速度による結晶成長程度の差異を再現することが可能であることを示した。

京都大学地球熱学研究施設本部(別府)の施設一般公開(2010年7月30日に実施)でマグマ生成実験を実施した際、聴衆の大部分は「溶融した岩石の固化物がガラス質になった」という観察事実に驚いていた。また、例えば「火山灰」という用語は知っていても、それが急冷マグマのガラス破片であるという事実を知らない場合が多い。このような実験は、そのような地学の知識に乏しい一般の人たちの認識を高めるためにも効果的であろう。将来、冷却速度をより細かく制御可能になれば、岩石学分野を教材とする教育にも貢献できると考えられる。

(2) マグマの水中破碎実験

風化・浸食以外の堆積物形成機構として、マグマの水冷破碎が挙げられる。マグマと水との接触は、地球上で普通に生じる現象である。例えば、ハワイ島キラウエア火山では恒常的にマグマが海へ注がれている。このマグマは破碎され、破碎物は海洋底あるいは砂浜



図15 生成したマグマをスロープに流し、水槽へ注いだ後の状況

陸上のスロープ斜面では、流れたマグマの固化物は低粘性のパホイホイ溶岩のような表面形状を示し、水中に流れ込んだマグマの固化物は破碎し、ガラス質角礫片となった。挿入図は、水の中から取り出したガラス質角礫片。

の構成要素となる。水中で破碎したマグマのガラス質角礫片からなる“ハイアロクラスタイト” (Kokelaar, 1986) がその証拠である。高温のマグマは水との接触による急冷と、急激な体積収縮による破碎によってガラス質角礫片となる。しかし、この内容を一般の人たちに口頭で説明し、理解してもらうことは容易ではない。そこで、4章でも行ったマグマの水冷破碎実験によるハイアロクラスタイト形成の観察結果を報告する。

本実験では、ステンレス製のスロープと水槽を用意し、スロープの先端に水で満たした水槽を設置した(この際、スロープに水滴がついていると小爆発が生じる危険性があるので、スロープがよく乾燥していることを確認することが安全上重要である。)。そして生成したマグマをスロープに流し、水槽へ注いだ。図15に実験の結果を示す。陸上のスロープ斜面では、流れたマグマの固化物は低粘性のパホイホイ溶岩のような表面形状を示す。一方、水中に流れ込んだマグマの固化物は破碎し、ガラス質角礫片となった。これらの産状の違いは、野外で観察される陸上、水中溶岩の産状の差異と類似している。したがって本実験によって、水中に流れ込んだマグマの冷却・破碎という通常

目にすることが困難な現象をうまく再現できるであろう。

(3) マグマの粘性と温度の関係

マグマの粘性は火山の形や噴火形態、溶岩台地の形成など「土地のつくり」に関連する要素である。また、地層の褶曲やマントル対流を考える際にも粘性(または塑性変形)を理解することは重要となる。一般的に液体の粘性は温度と負の相関を持つことが知られており(アンドレドの式)、生製したマグマの温度を変えることにより粘性の変化を見せることが可能である。また、マグマの粘性はマグマ中の元素の結合状態に依存するため、実験に用いる岩石や融剤の分量を変えることにより制御することも可能である。生成したマグマの粘性の変化を明示する方途としては、例えば、ルツボ内のマグマを高融点物質(ステンレス製の棒など)で攪拌することや、粘土で生製した火山模型に流してみることが挙げられよう。この実験は今回実施できなかったため、今後の課題である。

これら(1)~(3)で記述した実験例は、生成したマグマを用いた応用実験例の一部である。生成したマグマは、火山学・岩石学分野における再現実験に幅広く適用することも可能であろう。今後、上述の粘性実験のほかに密閉空間におけるマグマ-水接触実験によるマグマ水蒸気爆発の再現や、マグマの徐冷による節理の発達過程再現実験等への応用を試みたい。

(4) サーモグラフィーによる温度映像の教材化

火山活動の観察において赤外画像(サーモグラフィー)の利用は、現象によって生じる温度を可視的に理解し、活動状況の危険度を瞬時に把握するためにたいへん有効である(例えば、寺田, 2009など)。このように可視的に温度を観察することができるサーモグラフィーを用いた理科教育での教材化の議論はすでに盛んに行われており(例えば、川上ほか, 2010; 山田ほか, 2010など)、授業実験へのサーモグラフィーの導入は既存のものである。しかし、どのような実験に用いられるかといった教材開発は前途の課題である。今回、マグマ生成実験中の温度上昇を、サーモグラフィー(NEC三栄社製: TH7200)を用いて測定した。測定中の温度データは、ラップトップPCのHDDにフレームレート10fpsで記録した。測定では、サーモグラフィーを三脚に固定し、それをステンレス製加熱容器よりなるべく高い位置に設置して、容器内部のマグマ生成過程における温度変化を的確にとらえられるよう注意した。さらに、実験中の温度変化



図 16 サーモグラフィーを用いたマグマ生成温度観察用の熱画像例（岩石試料が溶融したときの熱画像）

（カラー写真は、http://www.vgs.kyoto-u.ac.jp/InetHome/shitaoka/地学教育2011/Figure16_web.jpg で公開しているので参照されたい。）

の範囲は、常温から約 1,100℃ と幅広く、0～800 レンジが使用できなかったため、低温域がカットされた 200～2,000 レンジを使用した。撮影した熱画像の例を（図 16）に示す。今回小学校で行ったマグマ生成実験の授業実践では、おもに放射温度計を用いて温度の上昇を児童に把握させたが、実際には七輪からの炎の勢いに児童の意識がとられる可能性もあり、より客観的に岩石試料が溶融していく状態を観察させるためにはサーモグラフィーを用いた熱画像が有効であると考えられる。また、小学校段階では、水の沸騰する状況と今回のマグマ生成実験の状況を比較させることにより、1,000℃ を超える高温状態についてより実感させることができるであろう。さらに、溶融した後のマグマが対流する様子を、サーモグラフィーを用いることで、より温度変化への関心を高め、理解させることが容易になると考える。

謝 辞 本研究を行うにあたり、初期段階で海洋研究開発機構の鈴木勝彦氏からご教示いただいた。アイデア（七輪の使用と輔原理の応用など）の一部は、奈良教育大学で西村誠治氏、森本国宏氏、大西香葉氏、長友恒人氏ほかが行った青銅鏡製作実験によるものを含む。また、京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設および火山研究センターの皆様からアド

ヴァイスをいただいた。別府市立境川小学校の諸先生、6年生の皆様には授業実践においてご協力いただいた。匿名の査読者からいただいたコメントにより、本稿は改善された。末尾ながら、記して感謝申し上げる。

引用文献

- 荒牧重雄 (2005) : マグマ。地学団体研究会(編), 地学事典, 平凡社, 東京, p. 1251.
- 川上紳一・山田茂樹・酒井 茂 (2010) : 小中学校の理科授業におけるサーモグラフィーの活用と「理科教材データベース」の開発—現状と今後の展望—。岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学), **34**, 49–52.
- Kokelaar, B. P. (1986) : Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanics. *Bulletin of Volcanology*, **48**, 275–290.
- Kushiro, I. (1983) : On the lateral variations in chemical composition and volume of quaternary volcanioc rocks across Japanese arcs. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, **18**, 435–447.
- 文部科学省 (2008a) : 小学校学習指導要領, 東京書籍, 京都, p. 69.
- 文部科学省 (2008b) : 中学校学習指導要領, 東山書房, 東京, p. 66.
- 西来邦章・下司信夫・宝田晋治 (2010) : 地質情報展 2009 おかやま「キッチン火山実験」—小麦粉溶岩で火山を作ろう!—。地質ニュース, **672**, 31–34.
- Spera, F. J. (2000) : Physical properties of magma. Haraldur Sigurdsson (Editor-in-Chief), *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, p. 176.
- 高橋正樹 (2005) : 火山岩。地学団体研究会(編), 地学事典, 平凡社, 東京, p. 230.
- 多和田有紗・武藤正典・東條文治・川上紳一 (2009) : 火山噴火現象と地層のつき方を関連づける実験教材の開発と中学校での授業実践による予察の評価。岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学), **33**, 17–24.
- 寺田暁彦 (2009) : 阿蘇火山中岳第一火口の熱活動—2008年度の位置付け—。第 4 回阿蘇火山の集中総合観測 (平成 20 年 4 月～平成 21 年 3 月), 京都大学理学研究科地球熱学研究施設火山研究センター, 105–117.
- 山田茂樹・樹下安雄・拓殖一輝・川上紳一 (2010) : サーモグラフィーやサーモインクを活用した理科教材の開発とその指導の在り方。教師教育研究, 岐阜大学教育学部, **6**, 141–148.

下岡順直・三好雅也・馬渡秀夫・吉川 慎・山本順司・渡辺克裕・齋藤武士・杉本 健・山田 誠・三好まどか・竹村恵二：七輪でマグマをつくる—身近なものを用いてマグマ形成過程を観察する— 地学教育 64 巻 3 号, 53-69, 2011

〔キーワード〕 マグマ, 教材開発, 七輪, 身近で安価な素材

〔要旨〕 火山噴火を直接観察することはほぼ不可能であるが, 直観的に理解することを助けるモデル教材として, 岩石試料を溶融してマグマを生成することができる実験装置の製作を七輪など安全で身近で安価なものを素材として開発を行った。さらに, 小学校で授業実践を行い, 教材の教育的効果の有効性を確認した。マグマ形成過程の観察で可視的に最も説得力ある説明ができる教材として, 生成したマグマを急冷や徐冷することでさらに応用実験も可能である。

Yorinao SHITAOKA, Masaya MIYOSHI, Hideo MAWATARI, Shin YOSHIKAWA, Junji YAMAMOTO, Katsuhiko WATANABE, Takeshi SAITO, Takeshi SUGIMOTO, Makoto YAMADA, Madoka MIYOSHI and Keiji TAKEMURA: Observation of Magma Formation Using Portable Clay Cooking Stove and Familiar Products. *Journal of Education of Earth Science*, 64(3), 53-69, 2011

1. はじめに

近年, 理科離れや工学部へ入学する学生の減少, 新技術の工業化とともに, 科学は中・高日本の地位が揺らぎ始めている。このような状況から, 日本の経済発展を支えてきた「ものづくり」を復活しようという気運が高まり, 科学技術教育でも実践や授業の展開を促すための「ものづくり」の重要性が強調されるようになってきた(土佐科学館, 2010)。

児童や生徒にも物づくりを習得させるためには, 彼ら自身が伝統のスキルを継承していなければならぬ。しかし, 近年, 理科系の学校であっても基本的な工具が使えないという報告が目立つようになってきた(例えば, 福岡: <http://www.mech-u.ac.jp/~m2010/program/houkouku/ndex.html>)。筆者が京都教育大学で初等理科教育実習者を対象に行ったものづくりのスキルに関する実態調査(中野, 2010)においても, ナール盤やタップやダイスなど, ものづくりの基礎的な工具の使用経験が極めて少ない実態が明らかになっている。

こうした背景には, 日本が経済的に豊かになり, 欲しいものを自作したり, 機械を何度も修理して使うことが少なくなり, 工具を使う必要性が低下したことや, 多くの現代機器のブラックボックス化により, 機器の中を見て構造を確かめるといった経験が少なくなったことが挙げられるだろう。天文分野で一般向けに販売される望遠鏡においても, 鏡面に反射が導入できる望遠鏡の普及など, 機器のブラックボックス化が著しい。

さらに述べたように, 教育現場では今まで以上にものづくりのスキルを身につけた教員が求められており, 基本的な道具を使えなければ教育現場の職も広まらない。また, 工業に強い大学や研究機関においても有用なことを学ぶ(中野, 2010)。こうした状況を踏まえると, 基礎的な工業的活用方法を習得させ, ものづくりに強い教育を実現することが教育実践系大学に求められるべき実践であると考ええる。

そこで筆者は, 2010年度から「ものづくり」に強い教育を推進するため, 京都府立総合実践教育センターを開設している。京都府立総合実践教育センターは, 以

教員養成系大学における反射望遠鏡作製実習

An Educational Program to Enhance Student Familiarity with Technology
in the Teacher Training Course of the Kyoto University of Education,
Based on Construction of a Newtonian Focus Reflecting Telescope

中野 英之^{*1}

Hideyuki NAKANO

Abstract: An educational program to enhance student familiarity with technology in the Teacher Training Course of the Kyoto University of Education was developed, incorporating construction of a Newtonian focus reflecting telescope. In the program, the students acquired technical skills through usage of tools, including polishing a curved mirror from a glass board and making a stand for the telescope. The program enhanced students' understanding of the significance of technology as well as the structure of the Newtonian focus reflecting telescope.

Key words: Newtonian focus reflecting telescope, mirror polishing, hand-making, education of astronomy

1. はじめに

近年、理科離れや工学部へ入学する学生の減少、新興諸国の工業化とともに、科学技術立国日本の地位が揺るぎ始めている。このような状況から、日本の経済発展を支えてきた“ものづくり”を見直そうという気運が高まり、新学習指導要領でも原理や法則の理解を深めるための“ものづくり”の重要性が強調されるようになってきた(文部科学省, 2009)。

児童や生徒にもものづくり教育を行うためには、教師自身が相応のスキルを備えていなければならない。しかし、近年、理科系の学生であっても基本的な工具が使えないという報告が目立つようになってきた(例えば、松岡, <http://www.cc.mie-u.ac.jp/~lp20103/monodukuri/houkoku/index.htm>)。筆者が京都教育大学で初等理科教育受講者を対象に行ったものづくりのスキルに関する実態調査(中野, 2010)においても、ボール盤やタップやダイスなど、ものづくりの基礎ともいえるべき工具の使用経験が極めて少ない実態が明らかとなっている。

こうした背景には、日本が経済的に豊かになり、欲しいものを自作したり、機械を何度も修理して使うことが少なくなり、工具を使う必然性が低下したことや、多くの理化機器のブラックボックス化により、機器の中を見て構造を確かめるといった経験が少なくなったことが挙げられるだろう。天文分野で一般向けに販売される機器においても、簡単に天体が導入できる望遠鏡の普及など、機器のブラックボックス化が著しい。

先に述べたように、教育現場では今まで以上にものづくりのスキルを持った教員が求められており、基本的な工具を使えなければ教材開発の幅も広がらない。また、工具に強いと学級経営においても有利なことも多い(中野, 2009)。こうした現実を踏まえると、基礎的な工具の使用方法を学習させ、ものづくりに強い教員を養成することが教員養成系大学に求められる大きな役割であると考ええる。

そこで筆者は、2009年度から“ものづくり”に強い教員を養成するために、反射望遠鏡の作製実習を行っている。反射望遠鏡の作製実習を行う理由は、以

^{*1} 京都教育大学教育学部 2011年1月8日受付 2011年5月19日受理

下のとおりである。

1. ただやみくもに工具の使い方だけを学習してもつまらないこと
2. 天文分野が苦手で、天体望遠鏡をのぞいたことがない学生が多いこと
3. 光学等他分野と融合した学習展開が期待できること

2009年度に筆者が担当している京都教育大学大学院の講義「理科教育学特論Ⅰ」を受講した学生8名を対象に行った実践(中野, 2009)では、学生を3班に分け、市販の直径10~15cmの鏡3枚を主鏡に用いて反射望遠鏡の鏡筒のみを作製する実習を行った。この実践では、目的を持って楽しみながら基本的な工具を使えるようになったという点で一定の成果が見られた一方、市販のパーツを多用したこともあり、自作の面白さが半減するという問題も見られた。そこで、2010年度の実践では反射鏡の作製から架台の作製までを行う実践を行うことにした。本稿はその実践について報告をするものである。

2. 教育実践

本実践は、筆者が担当する大学院の講義「理科教育学特論Ⅰ」の学生9名を対象に行った。学生のうち3名は現職の教員(小学校1名, 中学校2名), 2名は元教員(小学校1名, 高等学校1名)である。講義の

時間帯は現職教員が出席しやすい7限目(19:40~21:10)に設定されている。受講生の年齢は22~69歳で、それぞれの専門分野は物理2名, 化学3名, 生物3名, 地学1名である。9名のうち、市販の天体望遠鏡で月などの写真を撮影した経験のある現職教員1名を除き、これまで天体望遠鏡に触れる経験や天文分野の学習経験があまりなかった学生が大部分であった。天文分野に苦手意識を持っている学生が多い半面、授業を通して天文分野の学習への足がかりを得たいと考えてる意欲的な学生が多いのも特徴であった。

2009年度の実習では、5回の授業時数を充てて実習を行ったが、本実習では授業時数15回分のすべてを実習に充て(表1)、学生1名で1台の天体望遠鏡を作製した。第1回の授業では、ものづくり教育の現状に触れ、天体望遠鏡の構造と反射望遠鏡作製の流れについて説明を行った。第2回~第9回までを鏡面研磨、第10回~第13回までを鏡筒・架台の作製に充てる。第14回に望遠鏡の組み立てと光軸修正を行い、第15回目に完成した望遠鏡を用いて天体観察会を行う流れとなっている。

毎回の授業の開始時にその回に行う作業の説明と注意点を説明して作業に移る。仕事で欠席をした現職教員等の作業は補講で補うようにした。

表1 実践の流れ

科目名	理科教育特論Ⅰ		
授業の概要	反射望遠鏡の作製実習を通して、「ものづくり」と「天文教育」に強い教員を養成する		
授業の到達目標	1. 基本的な工作器具の使用方法を習得できる 2. 天体望遠鏡の構造について理解を深めることができる		
授業計画	1	ものづくり教育の現状, 天体望遠鏡の構造, 反射望遠鏡作製の流れ	
	2	鏡面研磨	荒ずり(120 番), 焦点距離の測定法, 面取りの方法
	3		荒ずり(220 番), 焦点距離の測定
	4		中ずり(400 番), 焦点距離の測定
	5		仕上げずり(800 番, 1500 番)
	6		ピッチ盤の作製
	7		ピッチ盤研磨
	8		ピッチ盤研磨
	9		ピッチ盤研磨※完成した反射鏡のアルミメッキは業者に依頼
	10		鏡筒・架台の作製
	11	木材の加工, 接眼部の作製	
	12	斜鏡固定金具の作製	
	13	斜鏡固定金具の作製, 主鏡固定金具の作製	
	14	望遠鏡の組み立て	主鏡・斜鏡のとりつけ, 光軸修正
	15	天体観察会	

表2 研磨の工程

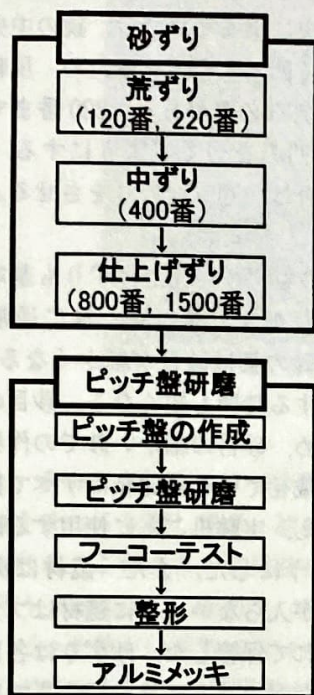


表3 研磨に必要な主な材料

砂ずり

鏡材 (外径 105 mm, 厚さ 15 mm) 2 枚
 研磨剤 (カーボラダム: 120 番, 220 番, 400 番,
 アラダム: 800 番, 1500 番), ノギス, 洗面器,
 油性ペン
 古新聞, 広口ビン, 薬さじ, 木づち, 木片

ピッチ盤研磨

松ヤニ, アスファルト, 酸化セリウム, 筆, 紙テ
 ープ, 中性洗剤, 取っ手にする丸棒, 鉱物油, ナ
 イフ, カセットコンロ, アルミホイル, 竹製の菜
 箸, 研磨板, グリッドバット

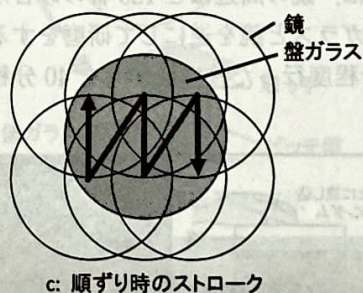
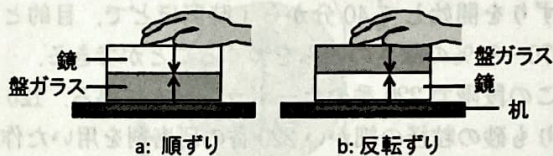


図1 砂ずりの方法

a, b はそれぞれ順ずり, 逆ずり時の鏡と盤ガラスの位置関係を示す。図のように「逆ずり」の場合は「鏡」と「盤ガラス」で上下が入れ替わる。c は順ずり時の鏡のストロークで、矢印はストローク時の鏡中心部の動きを示す。

(1) 鏡面研磨

鏡面研磨は, 砂を用いてガラス状の表面を凹面にスリ減らす「砂ずり」とスリガラスになったガラスの面をもとのガラス面のように滑らかなガラスにする「ピッチ盤研磨」からなる (表2)。通常の鏡面研磨では, ピッチ盤研磨の最終段階で鏡面状態をチェックするフーコーテストを通して整形を繰り返して球面鏡から放物面に整形するが, 本実習では時間の都合上, 球面鏡の状態で作成とした。鏡面研磨は, えびなみつる (2002) の方法に準じて行った。以下に鏡面研磨の流れを説明する。

I. 焦点距離の決定

鏡を球面鏡としたとき, 凹みの深さ, 焦点距離, 鏡の半径をそれぞれ h, f, r とすると, これらは次の式で表すことができる (えびなみつる, 2002)。

$$h = 2f - \sqrt{4f^2 - r^2} \quad (1)$$

直径 10 cm の球面鏡の場合, 凹みの深さは焦点距離が 600 mm の場合で約 1 mm, 1,000 mm の場合で約 0.6 mm となる。学生が希望する焦点距離に対応する凹みの深さとなるように砂ずりを進める。事前に市販の直径 10 cm, 焦点距離 1,000 mm の反射望遠鏡の鏡筒を学生に見せたところ, 学生の大部分がよりコンパクトな 500~600 mm の焦点距離の望遠鏡を作製したいと希望したので, 凹みの深さが 1 mm 強の鏡を作製することになる。

II. 砂ずり

鏡面研磨に用いる材料・道具を表3に示す。砂ずりは荒ずり・中ずり・仕上げずりの順に行う。研磨に用いる鏡材のうち, 凹面鏡となるほうを「鏡」, 相手方の鏡材を「盤ガラス」とする。荒ずりを開始する前に鏡材の表裏がわかるように2枚の鏡材の側面に矢印を付けさせ, 研磨の基本となるストロークについて説明を行った。ストロークとは, 鏡面研磨を行う際の盤ガラス上の鏡の動かし方を意味する。砂ずりの研磨方法には順ずり (図1a) と反転ずり (図1b) がある。順ずりは鏡を凹ませるための研磨方法で, 盤ガラスの上に鏡を載せて作業を行う。ストロークのずらし幅は鏡材の外径の前後・左右 1/3 程度とし (図1c), 鏡は一

定回数のストロークまたは一定時間ごとに約 45° 回転させた。盤ガラスも同様に、一定回数のストロークまたは一定時間ごとに約 45° 鏡の回転方向と逆向きに回転させる。反転ずりは、鏡の周辺部の砂目がとれない場合や、鏡を凹ませすぎた場合に行う研磨方法で、鏡を下に、盤ガラスを上にして作業を行う。ストローク等は順ずりの場合と同様である。

新聞紙の上に盤ガラスを置き、水ときをした 120 番のカーボランダムを流し込む。その上に鏡を載せ、荒ずりを開始した (図 2)。鏡を水洗いし、砂目の状態をチェックし、ノギスのデプスバーを用いて凹みの深さを適宜測定する (図 3)。鏡への力の加え加減やストロークの違いにより差があるが、おおむね 120 番の荒ずりを開始して 40 分から 1 時間ほどで、目的とする 70~80% の深さの凹みをつくることができる。

この段階で 220 番のカーボランダムに移る。120 番よりも砂の粒径の細かい 220 番の研磨剤を用いた作業に移る際は、鏡の周辺ほど 120 番の砂目が残りやすいため、盤ガラスと鏡を逆にして研磨をする反転ずりを 15~20 分程度行った後に順ずりを 40 分程度行う。盤

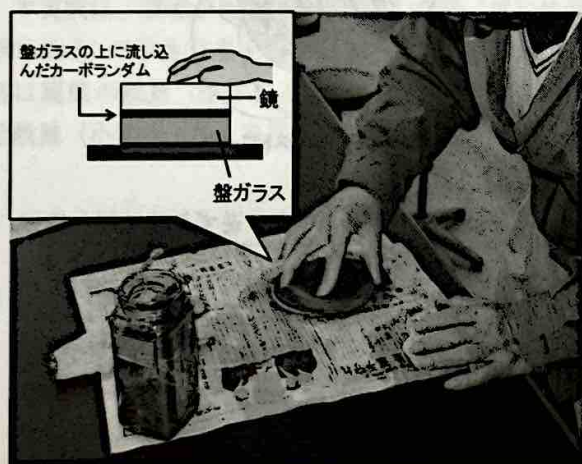


図 2 砂ずり (荒ずり) の様子

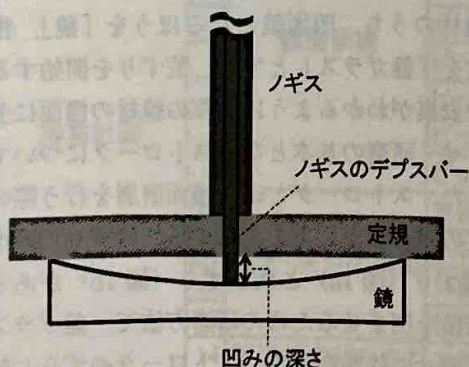


図 3 凹みの測定法

ガラスと鏡を水洗いして密着させたとき、気泡が 2 枚のガラスの中央に集まる場合は、鏡の中央部が盤ガラスに対して深く凹みすぎているため、反転ずりを行い鏡の周辺部を削る必要がある。220 番までにほぼ目的とする深さの凹みをつくるようにする。鏡の端がとがってきた場合は、適宜面取りをさせるように指導をした。

400 番以降の中ずり、仕上げずりも基本的な作業は同じであり、反転ずりを行った後に通常の研磨を行う。使用する砂の量は砂目が細くなるほど少なく、また研磨に要する時間も短くなる。砂目の大きな砂の混入を防ぐため、砂目の細かい砂での作業に移る際には盤ガラスを載せている新聞紙はすべて捨て、新しいものに取り替え、実験機ごとに使用する砂目を決めて作業を行うようにした。また、鏡材は次の授業まで、埃やゴミが入らないように鏡材はプラスチック製のタッパに入れて保管した。砂ずりは各自のペースで作業を行わせたが、第 5 回目の授業までに、全員が砂ずりの作業を完了することができた。

III. ピッチ盤の作製

ピッチ盤研磨は砂ずりによってスリガラス状となった鏡面を元どおりの透明で滑らかな面にする行程である。ピッチとは、松ヤニとアスファルトを約 1:1 の割合で入れて煮溶かしたものである。盤ガラスの上に煮溶かしたピッチを流し込み、円形に整形したものをピッチ盤という。ピッチ盤上に酸化セリウムを水ときした液を塗りつけて作業を行う。

水分のない片手鍋に松ヤニとアスファルトを約 1:1 の割合で入れ、竹製の菜箸で混ぜながらゆっくりと煮溶かす。溶かしたピッチを少量板の上に滴下し、室温まで冷めた段階で、硬さをチェックする。「爪で押してみても浅く跡がつく程度」の硬さが最適と言われており、この硬さになるよう、硬すぎる場合は鉱物油を少量加え、軟らかすぎる場合は松ヤニを少量加えて調整する。

図 4 にピッチ盤の作製方法を示す。砂ずりが終わった盤ガラスの周りに盤ガラスの上面から 3~4 mm 程度はみ出すように紙テープを巻いてテープで固定する (図 4a)。紙テープを巻いた盤ガラスを水平に置かれた板の上に置き、溶かしたピッチを紙テープから少量流れ出る程度まで盤ガラスに流す (図 4b, c)。紙テープの脇を軽く押してみてもくぼんだピッチが 3~4 秒で戻るくらいの硬さまで冷めた段階で、ゴム板を格子状に切り抜いて作製したグリッドパッドをピッチの上に

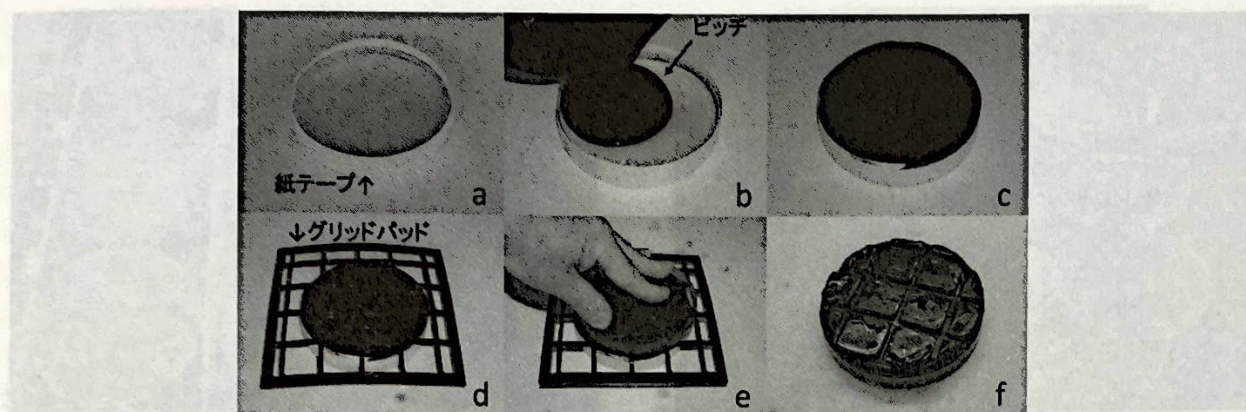


図4 ピッチ盤の作製方法

置き（図4d）、その上から濃い目の中性洗剤液で表面をぬらした鏡をゆっくり押し当て、固まりかけたピッチ上に溝をつける。このとき、前後左右にずらしながら型取りを行う（図4e）。一般的に、ピッチ盤研磨を行う際には、ピッチ盤上に基盤の目状の溝を刻んで研磨を行うが、グリッドパッドを使用することにより、瞬時にピッチ盤上に溝をつくることのできる。ピッチ盤が冷めたら盤ガラスと鏡を重ねた状態ではみ出したピッチをナイフで削り落とす（図4f）。最後に、外径3 cm 程度の木製の丸棒を加工した取っ手にピッチを付け、鏡の中央部に接着させる。

IV. ピッチ盤研磨

ピッチ盤を木製の板の上に置き、3方向から木片でピッチ盤を固定する。酸化セリウムを水で溶き、筆でピッチ盤の前面に塗る。ピッチ盤の上に鏡を載せ、片腕と鏡の重さだけでストロークを行う。ストロークは前後で左右のずれは1 cm 以内になるようにし、鏡は常に自転をさせる（図5）。ピッチ盤は砂ずりの場合と同様に一定間隔で回転をさせる。この作業を延べで5時間以上行う（図6）。次回の授業までの1週間の間にピッチ盤が変形することが多く、この場合、ピッチ盤の表面をガスバーナーで軽くあぶり表面を柔らかくした後、濃い目の中性洗剤液を塗った鏡をピッチ盤に圧着させ、前後左右にスライドさせながら成形する。鏡は水洗いを行い、適宜磨き具合を点検する。鏡に懐中電灯の光を当てて、研磨面全面にわたりライトの乱反射が見られなくなるようになったら研磨終了とする（図7）。本来は、フォーコーテスターで鏡面の状態をチェックし、放物面に整形していく作業を行う行程があることを学生に説明した。

学生9名が研磨をした鏡は業者にアルミメッキを依頼した（図8）。磨きが不十分なものはアルミが蒸着

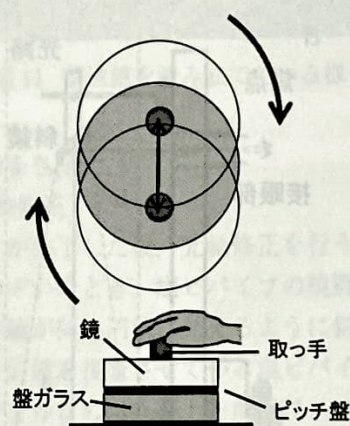


図5 ピッチ盤研磨の方法



図6 ピッチ盤研磨の様子

しない。学生9名が研磨をした鏡のうち数枚は磨きむらがあることが判明した。業者に依頼したアルミメッキはコーティングがされていないため、鏡面が汚れた場合は水をかけて洗浄するのみで、ふき取ったりすることができないが、5年程度は再メッキをしなくても使用できるようなのである。なお、メッキが完了した鏡を以後主鏡と呼ぶ。



図7 ピッチ盤研磨が完了した9枚の鏡



図8 アルミメッキが完了した9枚の主鏡

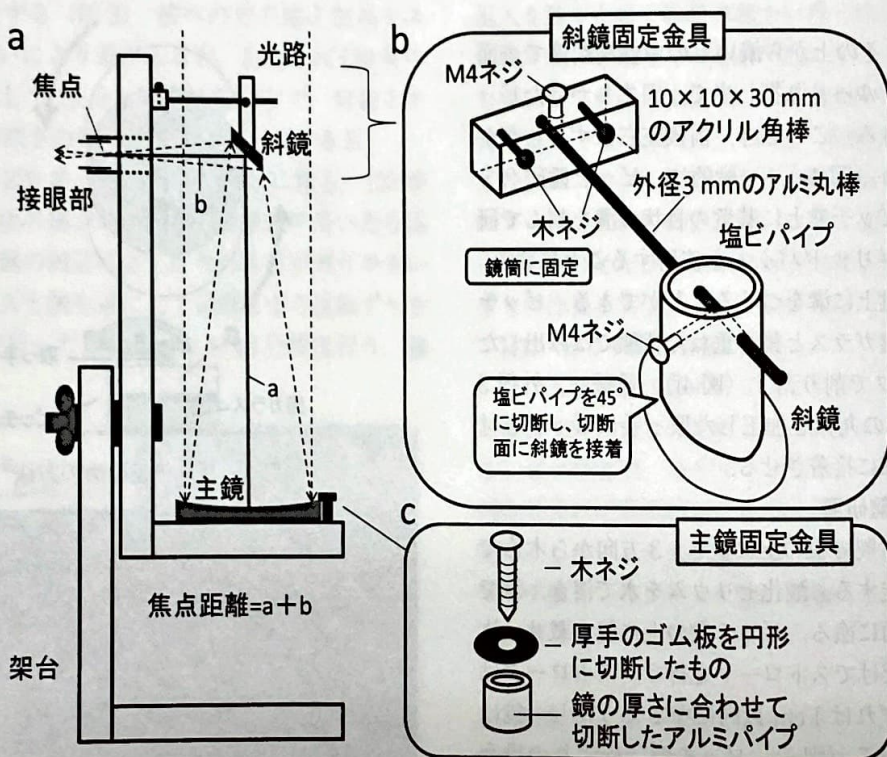


図9 望遠鏡の作製方法のモデル

(2) 鏡筒・架台の作製

I. 設計

大きな自由度を学生に与える時間的な余裕がなかったため、筆者から学生に図9aのような反射経緯台のモデルを提供し、モデルを元に鏡筒・架台を作製してもらうことにした。鏡筒、架台ともに合板を2枚L字形に組み合わせて作製するシンプルなもの、鏡筒と架台はボルトで接続されている。まず、学生が作製した主鏡の焦点距離に合わせて光路図を描かせ、鏡筒の外側3~4 cmのところに焦点がくるように鏡筒を設計させた。

II. 鏡筒の作製

鏡筒の作製では、電動ドリル、ボール盤、タップレンチ、ホールソー、パイプカッター、プラスチック用ノコギリなど多くの工具を使用する。作製に当たり、これらの工具の基本的な使用方法と注意点を学生に説明した。

市販の合板を接眼部側と主鏡側の2枚に設計図どおりにノコギリで切断する。電動ドリルにホールソーを装着し、接眼部側の合板の接眼部となる位置に塩ビパイプを差し込むための穴をあける。塩ビパイプをパイプカッターで切断し、穴に強く差し込んで固定する。接眼部側の合板と主鏡側の合板を木工用ボンドで接着

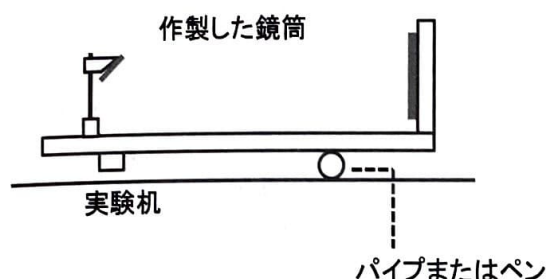


図10 望遠鏡の重心の見つけ方

させ、釘を打ち込んで固定する。主鏡の光軸修正装置を省略したので2枚の合板の接着部の直角を正確に出す必要がある。2枚の合板を接着させる際にはノコギリの切断面を接着させないようにすることがポイントである。

斜鏡は自作が困難なため、市販品を利用した。斜鏡は図9bのように斜鏡固定金具を作製して固定した。外径20mmの塩ビパイプをパイプカッターで切断し、一端を45°に切断する。塩ビパイプに外径3mmのアルミ丸棒を通すための穴を2個ボール盤で開け、アルミ丸棒を固定するM4ネジ用のネジ山をタップで切る。図9bのようにアルミ丸棒を切断し、塩ビパイプに差し込み、M4ネジで固定する。この段階で塩ビパイプに斜鏡を接着剤で接着させる。アクリル角材(10×10×30mm)に3mmの穴を開け、アルミ棒を差し込んで固定する。アクリル角材は接眼部からのぞいて斜鏡が視野の中央にくるように固定する。

主鏡は、図9cのような主鏡固定金具を作製して固定する。主鏡の厚さに合わせて外径4mmのアルミパイプをパイプカッターで切断し、その上に厚手のゴム板を直径1cm程度の円形に切る抜いたものを載せ、木ネジで固定する。主鏡固定金具は3個作製し、3方向から主鏡を固定する。ゴム板が爪の役割をしていて主鏡が固定される。

III. 架台の作製

架台は鏡筒と同様に合板2枚を接着させて作製する。接眼部側の合板に穴を開け、ワッシャーをかませてボルトとナットで鏡筒と架台を固定する。今回作製した架台はドブソニアン式と呼ばれる経緯台であり、ボルト1本で鏡筒を固定するフリーストップ型の望遠鏡である。このため、鏡筒のバランスを考えて鏡筒の穴開け位置を決める必要があり、図10のように鏡筒下にパイプやペンをおいてバランスがとれる位置を見つけるように指導した。また、固定軸を中心に鏡筒を回転させるときに、架台の底面に鏡筒がぶつからない



図11 望遠鏡を組み立てている様子

ように設計をさせた。

IV. 光軸修正

組み立てが完了した後、光軸修正を行う。接眼部から斜鏡をのぞいたとき、塩ビパイプの視野、斜鏡、斜鏡に映る主鏡が同心円状に見えるように斜鏡の位置を調整する。斜鏡を接着させている塩ビパイプを固定しているネジをゆるめ、丸棒上を前後にスライドさせたり、回転させることにより行う。この操作でも光軸の修正が難しい場合はアルミ棒をペンチで曲げて調整したり、斜鏡取り付け金具や主鏡の位置を調整して対応する(図11)。光軸修正が完了したら、市販の接眼レンズを接眼部に差し込み実際に望遠鏡をのぞいてみる。市販の接眼レンズの外径は塩ビパイプの内径とサイズが合わないため、接眼レンズの周囲にボール紙を巻きつけて使用する。

鏡筒・架台の作製も筆者からの説明は必要最小限にして学生のペースに合わせて作業を行わせた。作業の進め方に差が見られたが、最終的に全員が望遠鏡を完成させることができた。

(3) 作製した反射望遠鏡での天体観察

作製した反射望遠鏡は球面鏡に近い状態で完成としたため、放物面鏡を使用した場合に比べ高い結像性能は期待できないこと、架台も強固でなく、微動装置も付いていないことなどの理由から、焦点距離20~25mmの接眼レンズを用いて30倍程度の低倍率で観察をさせた(図12)。14回目の授業中に反射望遠鏡を完成させた学生は授業中に満月近い月を観察した。月を観察したところ、クレーターは十分に観察することができた。翌週の15回目の授業では大学の講義棟の屋



図 12 作製した望遠鏡を用いて観察をしている様子



上弦の月
2011,4,12 19:51
ケンコー製2倍テレプラス使用
Nikon D40 (ISO 200) 露出 1/4 秒
筒先開閉法
ビクセン製センサー型赤道機に
同架(自動)



土星
2011,4,12 19:58
K20 mm Nikon D40 (ISO 1600)
露出 1/2 秒 筒先開閉法
ビクセン製センサー型赤道機に
同架(自動)

図 13 作製した望遠鏡で撮影した上弦の月と土星

上で金星や恒星を観察した。金星は宵の明星で半月状に見える状態で視直径は大きくなく、シーイングも不良であったが、半月状であることは確認することができた。磨きむらの見られた主鏡を使用した場合でもこれらの天体の観察に大きな支障はなかったようである。学生が研磨した主鏡（焦点距離 860 mm）を既製の反射赤道儀に組み込んで撮影した上弦の月と土星の写真を図 13 に示す。月面の大小のクレーターや土星の輪の存在が写真で確認できる。

3. 学生の反応

授業の終了後に、今回の実習をポートフォリオ形式にまとめ提出させた。

望遠鏡作製実習を終えて学生から寄せられた感想の一部を表 4 にまとめる。すべての学生が、鏡を自分で磨いて望遠鏡を作製する経験はなかなかできないので貴重な体験ができたと感じたようである。鏡を磨く作業はたいへんであったができたときは達成感があったという感想も多く見られた。こうした点は 2009 年度の実践のように既製品の主鏡を用いた実習では得られない経験であったと思われる。望遠鏡の鏡筒が 3 方向開放されているため、反射望遠鏡の構造がよくわかったという感想も多く見られた。また、2009 年度の実践同様に、基本的な工具が使えるようになり、ものづくりの面白さや大切さがわかったことがポートフォリオからうかがい知ることができた。

2009 年度の実践では、班の中でミーティングを繰り返し、お互いに案を出し合って工夫して望遠鏡を作製していくことでチームワークが育まれたといった感想が多く出た。今回の実践では、個人で望遠鏡を作製したのでこのようなチームワークが生まれるか心配であったが、工具の使用方法を教え合ったり、作業が遅れている学生の手伝いをしたり、光路図の作成で議論する姿が見られたりと、学生同士が活発に議論や交流を深めて望遠鏡を作製する姿が印象的であった。

4. 今後の課題

今回作製した望遠鏡は、鏡筒の 3 方向が開放されており、迷光が入りやすく視野のコントラストが低くなること、ファインダーがないため、視野に対象物を入れることがやや困難であること、天頂付近に鏡筒を向けたときでも接眼部の高さが 60~80 cm 程度にしかないため、しゃがみこまないと望遠鏡をのぞくことができないこと、風に弱いことなどといった課題もある。しかし、これらは作製者自身が完成後に試行錯誤を繰り返して改良を加えれば解決できると思われる。

今回は時間の都合上、フーコーテスターを用いて鏡面を放物面に整形する行程は省略したが、今後可能であれば、フーコーテスターを用いた整形も実習に導入していきたいと考えている。ただ、筆者が過去に駿台学園高校で行われた研磨講習会に参加した際、講習期間の丸 4 日を要しても放物面への整形が完了しない参加者も多かったので、研磨から望遠鏡の作製までを行う本実習で放物面への整形作業を 90 分 15 回の授業内で行うことはかなり困難であると思われる。この場合、長期休暇中を利用した実習形態を模索することに

表4 学生の感想

- 鏡を自分で磨いて、その鏡を使って自分で望遠鏡を作るという経験はなかなかできることではないので本当に貴重な体験ができたと思った。
- 望遠鏡づくりを通して、自分自身の人間性を深く見つめ直すことができた。自分は頑張ればここまで出来る[自尊心]や、自分はここは得意で向いているが苦手ここはだなという場面に毎回出会い、自分自身の良い部分も悪い部分も分かった。鏡を磨く作業は大変であったが、出来上がったときには達成感がある。今まで見たことも触れたこともなかった工具に触れ、少し使えるようになった。工具の使い方が分からなかったときに仲間に手伝ってもらったり、くじけそうになった時に励ましてもらった。『ものづくり』は『人づくり』と書いてある本を読んで、今回なるほどその通りだと痛感した。今までバラバラだった知識も『望遠鏡づくり』を通して結びつけることができた。
- 望遠鏡づくりを通して、基本的な工具を使えるようになったことが一番成長したところだと思う。そして初めてだからといって躊躇するのではなく、何でも向かっていくチャレンジ精神が養われたと思う。将来、夫より日曜大工ができる母親になりたいと思う。
- 望遠鏡づくりが探究活動であることを実感した。方法や設計は全体的に教えてもらったが、実際は人それぞれの状況が異なり、考えさせられることも多かったと思う。
- 自分で作った望遠鏡で星を見ることは、買った望遠鏡でみるのと感動が違うと思った。
- 自分自身で鏡筒や架台を考えて作ることができなくて残念であった。
- 私は常に作業が遅れていたもので、他の人の望遠鏡を参考にしながら望遠鏡づくりを行った。このため、他の人たちの失敗例などを目の当たりにしてきた。そのことから私はできるだけ失敗しないように作業をしていた。しかし、探究しながら作業ができたかは、疑問である。常に追いつくことを考えながら、作業をしていたことで、探究しなければならない部分を他の人から得た探究した答えをもらっていたからである。そのことで考えることよりも、探究しなければならない部分を他の人から得た探究した答えをもらっていたからである。そのことで考えることよりも作業に追いつくことを優先していたように思われる。そのことを感じたのは、補習を受けたときであった。補習では私一人が先生とともに作業をしていたので十分に考える余地があり、自分の作業についてしっかりと振り返ることができた。
- 望遠鏡の作製を通して実に多くの学びがあった。1つ目は望遠鏡の構造が理解できたことである。一つひとつの部品がどのような役割を持ち、その役割を果たすためにはどのような条件を備えなければならないかが理解できた。2つ目は作業を通して、人の手で行うことの意義の一端が分かったことである。手作業はものや道具と対話しながら行うことで手を通して材料の質や状態が伝わってくる。そういう感覚を味わえたことは貴重な経験であった。3つ目は道具を使う技術が多少身に付いたことである。初めて使う道具も多く、予測や計測、修正や加工など様々な学習過程が混在する授業であった。

なるであろう。今回の実習で学生が作製した鏡は、十分な結像性能が期待できないものであったが、月のクレーターや金星が欠けている様子は十分に観察できたので、90分15回の授業で研磨から望遠鏡本体の組み立て、観察会までを行うのであれば、フォーコーテス

ターを用いた整形は省略し、球面鏡に近い状態で完成とするのもやむをえないと考える。

本実践後、授業を履修していない学部生5名から鏡面研磨を体験したいと申し出があり、夏季休業中に本実践を体験してもらった。鏡面研磨やものづくりに

表5 実践に要する経費

材料		購入価格(円)		1人あたりの経費(円)	
ガラス材	外径107 mm, 厚さ15 mm	3000円×18枚	54000	2枚	6000
研磨剤	カーボランダム 120番	20 kg	8000	400 g	160
	カーボランダム 220番	20 kg	8000	100 g	40
	カーボランダム 400番	5 kg	6000	50 g	60
	アランダム 800番※	600 g	2400	30 g	120
	アランダム1500番※	400 g	1600	20 g	80
	アスファルト※	4 kg	4000	300 g	300
	松ヤニ※	1.5 kg	2700	100 g	180
	酸化セリウム※	400 g	3200	20 g	160
メッキ代	9枚一式		42000		4670
斜鏡	短径34 mm, 厚さ8 mm	2310円×9枚	20790	1枚	2310
木材一式	桐合板		10000		1110
その他	ネジ, 木工用ボンド, 釘など		3000		340
※小売業者より購入				合計	15530

興味関心のある学生は多く、今後は学部生や現職教員を対象に門戸を広げていきたい。また、鏡の研磨実習については中学生でも十分に研磨が可能であることが先行実践例で示されており(天文ガイド編集部, 1990)、今回作製した望遠鏡本体も作製が比較的容易であることから、筆者は小学校高学年でも取り組むことが可能なのではないかと考える。今後は児童・生徒を対象とした実践の可能性も探していきたい。

本実習の最大の課題は費用の面である。本実習の実施に要した主な経費を表5に示す。今回の実習では、一人あたり約15,000円程度の費用を要した。そのうちガラス材の購入費(加工費を含む)が6,000円、メッキ代が4,600円程度であり、これらの経費をいかに節減していくのが今後のポイントとなる。メッキについては、現在、アルミの真空蒸着装置を開発中であり、アルミメッキは自前でできる見通しである。また、ガラス材についてもガラス用のホールソーを導入し、板ガラスから円形のガラスに自前で加工できるようにする予定である。このような対応により、最終的に一人当たりの製作費を6,000円程度に抑えていきたい。本実践を受ける対象者の門戸を広げるに当たっては製作費の節減対策は必須である。

2年間、望遠鏡作製実習を行い感じたことであるが、学生はものづくりが嫌いなわけではなく、目的と機会さえあれば能動的に工具を使いこなし、ものづくりの取り組むことができる。教員養成系大学における

ものづくり教育も技術や物理など特定の科目に押しつけるのではなく、折に触れて工具を自由に使用して、ものづくりが行えるような環境を整備していくことが重要であろう。本実習を履修した学生がいずれ教壇に立ったとき、反射望遠鏡を作製した経験を児童・生徒に語れることは、児童・生徒にとってもインパクトが大きいと思われる。まずは基本的な工具が使える、ものづくりの面白さを知っている教員を一人でも多く養成することがわれわれの務めであると考えます。

謝 辞 たかはし天文台の佐野文博氏にはアルミメッキ業者の手配をしていただくとともに、研磨剤の小売販売に対応をしていただいた。これらの援助に感謝します。

引用文献

- えびなみつる(2002): えびなみつるの完全図解天体望遠鏡を作ろう。誠文堂新光社、東京、142 p.
 文部科学省(2009): 中学校学習指導要領解説, 149 p.
 中野英之(2009): 望遠鏡作製実習を通して“ものづくり”に強い教員を養成する試み。大学の物理教育, 15, 132-135.
 中野英之(2010): 探究活動・話し合い活動に発展できる「ゴムのはたらきで動くペットボトル車」の開発。フォーラム理科教育, 11, 67-71.
 天文ガイド編集部(1990): 先生は望遠鏡作りの優等生。月刊天文ガイド, 1990年8月号, 92-95.

中野英之：教員養成系大学における反射望遠鏡作製実習 地学教育 64 巻 3 号, 71-81, 2011

〔キーワード〕 反射望遠鏡, 鏡面研磨, ものづくり, 天文教育

〔要旨〕 教員養成系大学において, ものづくりのスキルを備えた学生を養成することを目的に反射望遠鏡の作製実習を行った。実習では, 基本的な工具の使用方法を習得するとともに, 反射鏡の研磨を行い, 望遠鏡や架台の作製を行った。実習を通して, 学生が基本的な工具を使えるようになるとともに, 天体望遠鏡の構造やものづくりの意義について理解を深めることができた。

Hideyuki NAKANO: An Educational Program to Enhance Student Familiarity with Technology in the Teacher Training Course of the Kyoto University of Education, Based on Construction of a Newtonian Focus Reflecting Telescope. *Journal of Education of Earth Science*, 64(3), 71-81, 2011