

# 科学力を育成する実験問題：

— 鉱物の表面積、密度の関係 —

岡本和明 埼玉大学教育学部自然科学講座  
森田めぐみ 埼玉大学教育学部自然科学講座  
(現所属、埼玉県立松伏高等学校)

キーワード：科学実験、科学力育成、実験観察、鉱物、表面積、密度、科学的思考力

## 1. はじめに

2010年改訂の学習指導要領<sup>1)</sup>においても、2020年改訂予定の学習指導要領案<sup>2)</sup>においても思考力、特に科学的思考力の育成が求められている。科学的思考力の育成には、単元指導案全体で講義、実験指導案に実験、観察時間を設定することが大変重要である。なぜなら科学的思考力とは、以下のような科学活動の中で発揮されるからである。すなわち、1) 研究目的を設定する能力 (科学力)、2) 研究目的に即した実験、観察方法を設定し、予測を立てる能力 (作業仮説設定力)、3) 実験、観察を遂行する能力 (実験、観察力)。さらに、実験結果の考察は、実験前に設定した仮説を検証する作業とともに、4) 実験失敗や予想外の結果を解析し、重要な発見をする能力 (考察力)、5) 実験観察結果から生じた新たな疑問を解決するための研究設定をする能力 (科学力)。5) から1)、2)へと循環する科学活動は、「作業仮説転がし」<sup>3)</sup>と呼ばれている。理科教育に関わる研究者、教育者の多くが、上記の構造を理解しないまま、「仮説検証型実験」や「グループ討論にアクティブラーニングを組み込む」程度で科学的思考力の育成が可能だと考えている<sup>2)</sup>。1)の研究目的を設定する能力を、本稿では「真の科学力」と呼ぶ。真の科学力育成に関わる単元指導案作成は、上記の5項目に、学習指導要領の項目、観点項目を機能的に配分することが肝要である。この作業が、「科学力育成のための、カリキュラムマネジメント」だと考えると良い。詳細は別稿に譲ることにして、本稿では、実験観察試験に基づく科学的思考力の評価について具体的に説明したい。単元指導案に基づく講義、実験指導において、科学力思考力育成の度合いの評価基準、評価項目を設定することが大変重要である。指導要領、観点項目に基づく評価もちろん重要ではあるが、極めて相対的であり、しかもこれらの観点項目の達成が、学生が将来科学者になった場合の科学力とどういう関係にあるか不明確である。単元ごとの学力試験や、科学実験コンテストは、短時間で回答させることに問題があるものの、定量的な評価が可能である。本稿では、2016年に行った科学の甲子園ジュニア埼玉県代表の講義実験を基に、実験試験問題でいかに科学的思考力を育成するか解説したい。

## 2. 実験問題の目的、学習指導要領との関係、設問の構造

理科の学習単元末に行う学力試験、大学入試における学力試験、そして中学生、高校生対象の科学実験、の全てにおいて科学力の育成と科学力の評価は可能である。学力試験の場合は、学習

した実験内容の理解や解析が検証できる。一方、実験コンテストは、実験を実際に行うという点で、実験力の検証は可能である。しかし、1、2時間程度の短い間で、実験技術を評価することが、参加学生の真の科学力を評価、検証する事と同一ではない。これらの学力試験問題、実験問題に共通する問題の構造や、これまで学習した内容との対応関係（学習指導要領との関係）、観点項目との対応関係を厳密に設定する事こそ、科学的思考力の評価、さらなる指導へと繋がる。以下に実験問題例を提示し、科学的思考力育成の仕組みを議論したい。

## 2-1 問題

下記の問題は、2016年11月4日土曜に科学の甲子園ジュニアの講義実験で使用された。地学分野を中心に、物理、化学等広く科学全般に関わる本質的な実験問題を中学生3人1組の2チームが競争で実験、解答した。試験終了後、中学生を引率した埼玉県教育委員会、JICA研修プログラムで埼玉大学に滞在中のモンゴル数理教育関係者も交えて、仮説検証型授業と科学的思考力育成授業の違い、科学研究の論理構造を説明した。実験試験問題は、下記の通りである。

科学の甲子園ジュニア 地学試験問題 2016 11/5 10.30-11.45 岡本 和明、森田めぐみ

鉱物単結晶の性質に関する以下の記述を読み、問1から問4に答えなさい。

地球の地殻やマントルを構成する岩石は、マグマや流体、それらが急冷固結したガラスを除くと、ほぼ結晶の集合で構成されている。地球の表面に存在する結晶は特に鉱物と呼ばれている。鉱物の中で特に色や結晶構造が美しいものは、宝石として扱われている。結晶構造は、原子の3次元的な規則配列に特徴づけられている。鉱物の結晶構造には、5つの種類（結晶系）がある。最も対称性の高い、単純な構造は、立方体である。宝石としても知られているガーネットは立方体結晶構造を持つ鉱物である。図1のガーネットは、多面体で構成されるきれいな結晶外形を持っている。



図1. 数cm大のアルマンディン単結晶

鉄 (Fe) を多く含むガーネット（ザクロ石）は、アルマンディン（化学式は  $\text{Fe}_3\text{Al}_2 (\text{SiO}_4)_3$ ）、カルシウム (Ca) を多く含むガーネットは、グロシュラー（化学式は  $\text{Ca}_3\text{Al}_2 (\text{SiO}_4)_3$ ）と呼ばれている。

問1 実験机に用意されているアルマンディン結晶、結晶模型、トレース用紙、ノギス、方

眼紙、定規などを用いて、アルマンディンの表面積を求めなさい。なお表面積を求める前に予測（仮説）をたてなさい。さらに計算結果と予測の相違点も議論しなさい。

問2 アルマンディンの体積をビーカー、水、質量計、ばねばかりを用いて求めなさい。体積は、下記の通り、水中の物体に働く力のつり合いから測定できる。

水中にある物体に働く浮力Fは、 $9.8 \times (\text{液体の密度} \rho) \times (\text{物体の体積} V)$  で求めることができる。水中の物体に働く力のつり合いは次の式で表せる（図2）。

(物体をつりさげる力T) + (物体に働く浮力F) = (物体に働く重力W)

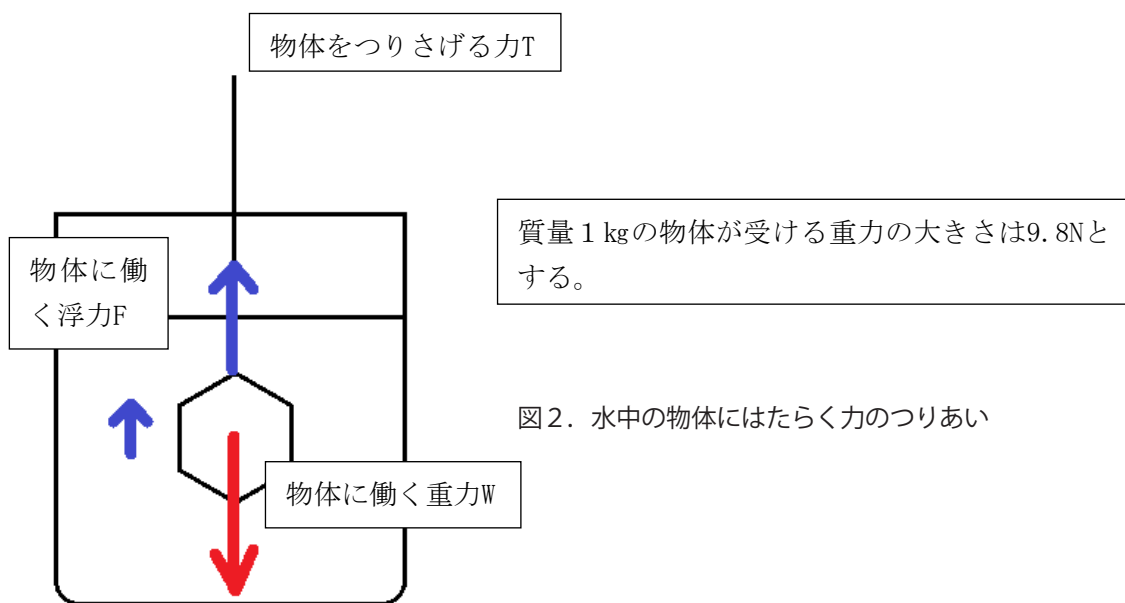


図2. 水中の物体にはたらく力のつりあい

問3 水の密度を  $1 \text{ g/cm}^3$  としてアルマンディンの密度を求めなさい。グロシュラーの密度と比較してその違いの理由を仮説として書きなさい。なおグロシュラーの密度は  $3.6 \text{ g/cm}^3$  とする。

問4 アルマンディンとグロシュラーの化学式と構成元素の原子質量（表1）から、問3の仮説を検証し、考察しなさい。

表1 O, Al, Si, Ca, Fe の原子質量

原子	O	Al	Si	Ca	Fe
質量	16.0	27.0	28.1	40.1	55.8

## 2-2 解答用紙

下記に解答用紙の短縮版を示す。問1では、実験方法の選択を行い、選択理由、実験の予測を

述べさせる。また、考察の項目では、実験結果と予測の相違点を議論させる。

問1

実験方法

結果

考察

問2では、提示された実験方法を理解し、実験予測（仮説）を述べさせる。

問2

実験方法

仮説

結果

問3では、化学組成の異なるガーネットの密度の違いについて仮説をたてさせる。

問3

検証方法

結果

考察

問4では、Ca, Fe端成分のガーネットのモル原子質量計算から、密度の違いを考察させる。

問4

仮説検証

結果

考察

### 3. 設問意図、指導要領との対応、観点項目

#### 3-1 設問意図

地球内部を構成する物質は、外核やマグマ溜りを除けば、鉱物多結晶で構成される。鉱物単結晶の外形が美しいのは、結晶表面が多面体で構成されているからである。本問題では、鉱物の表面積が、多面体の面積から求められることを、大きなガーネットの結晶の観察（図1）と設問本文から理解させることを目的としている。複数の多面体が結晶表面を覆っているため、多面体の種類と数をどうやって見積もるかが重要である。実験コンテストの場合、短時間での思考力が問われる。よって、葉包紙でガーネットを包んで、多面体をトレースすることが一番効率の良い方法である。平面展開図を描くというエレガントな解を得ることにこだわる場合、時間がかかってしまうが、科学研究には後者の選択が妥当である。問2では、浮力を使った鉱物の体積の測定（図2）をいかに正確に行うかを求めている。問3、4では、鉱物密度と化学組成の関係（表1）をモル質量から推定できるかを求めている。これらの設問は、最先端の地球科学研究に関わる内容を含んでいる。ガーネットの密度は、地球内部の物質循環に大きな影響を与えている。地球深部のマントル対流には、下降するプレート物質（コールドプルーム）と周りのマントルの化学組成の違いに起因する鉱物組成の違いが密度差を引き起こす。その結果、プレート物質（コールドプルーム）のマントル遷移層への数億年の滞留が東アジアやインドネシアの下で起こっている<sup>3)</sup>。

#### 3-2 学習指導要領との対応

本稿で紹介している試験問題と学習指導要領の単元項目との関係は、表2に示されている。生命分野も関係する実験問題を作成することが今後の課題ではあるが、本試験問題には、エネルギー、粒子、地球で学習する内容が網羅されている。

表2 本実験問題と関係する単元項目

		指導要領の枠組み			
		エネルギー	粒子	生命	地球
小学校	第3学年				
	第4学年				
	第5学年				
	第6学年				土地のつくりと変化 土地の構成物と地層の広がり
中学校	第1学年	力と圧力 力の働き 圧力（水圧を含む）			火山と地震 火山活動と火成岩
	第2学年		物質の成り立ち 原子・分子 化学変化 ・化合 化学変化と物質の質量 ・化学変化と質量の保存		

中学校	第2学年		・質量変化の規則性		
	第3学年	運動の規則性 ・力のつり合い			

### 3-3 観点項目

観点項目との関係は表3に記されている。実験コンテストを模した講義実験なので、知識活用、科学的思考、表現に力点が置かれている。学習単元末の学力試験であれば、1題目の問題は、基礎知識に留めておいてもいい。

表3 本実験問題と観点項目の関係

問題番号	問題の概要	出題の趣旨	知識問題	知識活用問題	自然への関心・意欲・態度	科学的思考・表現	観察・実験の技能	自然現象への知識・理解
本文	鉱物結晶構造	固体物質基礎知識	○	○	○	○		○
問1	結晶外形	表面積の求め方	○	○	○	○	○	○
問2	結晶の密度	水中、地球内部物理		○		○	○	○
問3	結晶の密度	仮説検証		○	○	○		○
問4	鉱物化学組成	化学組成と密度	○	○		○		○

## 4. 問題構成（基礎知識、発展、応用）

学力試験は、学習指導状況の絶対評価を目的に行われる。観点項目の多くは、定性的な評価基準であるので、学力試験では定量的に学習到達度や思考力、発展、応用力を評価しなければならない。本稿で扱っている実験問題は、基礎知識を応用、発展させた実験、観察をする能力を評価することを目的にしている。したがって、1) 基礎知識の確認及び学習、2) 基礎知識を基に未知の実験、観察を行う発展、さらに3) 実験結果の解析から考察される知見や新たな課題に関する問題（応用）という三段階の構成になっている。知識の確認と発展のためには、冒頭の文章問題が最も重要な役割を持っている。基礎知識とその検証方法、さらに新たな知見へと応用、発展させる実験、観察研究において、基礎知識に関する論理が提示されている文章の作成が重要である。また、本問題で扱う科学対象の魅力が、本文に含まれていることも必要である。自然への探究心が、科学活動への原動力になるような文章作成が求められる。実験、観察に関する設問は、基礎知識を問う小問題、（実験、観察の）発展問題は中問題もしくは大問題、さらに応用問題は中問題、もしくは中問題、という問題構成の設定を様々な制約の中で行っていくことが必要である。

## 5. 科学力育成、評価のポイント

科学研究とは、既知から未知へと進める活動を意味する。しかし、既知から未知への手がかり

なく進むことは、通常では不可能である。自然科学研究におけるセレンディピティーとは、実験の失敗や偶然がきっかけによる「発見」を意味する。つまり、未知領域での解析が突然可能になる「発見」を見逃さない準備ができていない科学者にのみ可能な「発見」と言える。しかし、世界の全ての科学者が、既知から未知への唐突な飛躍を目指すべきではないし、科学技術の進歩の歴史もそれを指示しない。特定の専門分野の基礎学習を徹底的に行い、未知への一步を確実に定めて実行(研究)する能力の育成こそ、正しい科学力育成と言えよう。1. はじめに、で述べたように、科学力とは、5項目の科学活動の各段階で発揮される能力の総称である；1 a) 研究目的を設定する能力 (真の科学力)、1 b) 実験、観察方法の決定 (作業仮説設定能力) 2) 実験結果の予測、3 a) 実験、観察を遂行する能力 (実験、観察能力)、3 b) 実験前に設定した仮説を検証する作業、4) 実験失敗や予想外の結果を解析し、重要な発見をする能力 (考察能力)、5) 実験観察結果から生じた新たな疑問を解決するための研究設定をする能力 (真の科学力)。

### 5-1 研究目的を設定 (真の科学力)、実験観察方法の決定する力 (作業仮説設定能力) の育成

1 a、1 b) について学校教育現場で育成されていることは極めて少ない。なぜなら、単元項目はすでに決まっており、各単元で行う実験、観察内容もすでに決まっているからである。この状況では、科学活動で最も重要な「研究目的、動機を明確にする思考活動」の育成は不可能である。では、どうやって「真の科学力」を育成すれば良いのか？ 学校現場においては、単元ごとの最初の講義で、既知 (これまでの学習内容) と未知 (これから学習する内容) の境界を明確にする事が重要である。そして、既知から未知の学習内容への論理展開を明確に提示する事である。本稿で紹介した試験問題では、鉱物単結晶の性質に関する記述で「既知の領域」をおさらいし、結晶表面が多角形で構成されていることを確認させている。そして、問1で結晶の表面積を測定する実験方法を選択 (実験、観察方法を選択) させている。学校教育現場で実験、観察方法の決定能力を育成するためには、上述の通り複数の実験、観察方法を選択させる事が有効である。複数の独立した実験、観察方法を、レシピとして提示するためには、教員の実験、観察能力が要求される。

### 5-2 実験結果の予測

2 b) 実験結果の予測は、仮説検証として既に理科教育でも定着している。しかし実際の科学研究で行われている、実験結果の記述、考察での議論は、学校教育では厳密に設定されていない。実験結果の予測と実験後に予測の検証を精密に行うためには、予想結果の通り (Yes)、予想結果とは異なる結果 (No) という検証方法が有効である。実験前に検証内容を限定しておくことで、実験後の議論を発散させない効果がある。さらに予想結果と異なる結果や予想外の結果に関して出来るだけ時間を費やして深く議論することが可能になる。

### 5-3a 実験、観察を遂行する能力

3 a) 実験、観察を遂行する能力 (実験、観察能力) を育成するためには、精密な実験、観察を繰り返す事が重要である。本稿で扱った実験問題は、ある程度実験、観察の得意な学生を対象に作成されている。したがって、学校教育では単元を超えた数年間での繰り返し実験、観察が望ましい。同一単元内においても、2、3回実験をくり返す事で確実に技術向上が確認できる。また、単一講義内での繰り返し実験も有効である。著者の一人、森田めぐみが2015年に埼玉大学附属中

学校で行った地学（気象分野に関する）研究授業では、寒気と暖気の境界領域で起こる乱流を模した冷水と温水の混合実験を扱った。墨汁により着色された冷水と温水をアクリル浴槽で仕切りを外して、混合させるという単純な実験方法であったが、1回目での実験成功率は低かった。しかし、数分で完了する実験の単純さが2回目、3回目、4回目という繰り返し実験を可能にさせた。その結果、全ての学生が実験を成功する事ができた。1回目の実験失敗から、温水と冷水を注ぐ順番、仕切りをしっかりと押さえる等の工夫を実験ごとに重ねていった事が実験成功の秘訣であった。現実の科学研究では、数週間、数ヶ月、数年という期間の中で実験、観察を繰り返すので、忍耐力の先に深い学びがある事を理科教育では徹底指導すべきであろう。

### 5-3b 実験結果の検証

3 b) 実験前に設定した仮説を検証する作業は、実験前に仮説をしっかりと建てておけば極めて単純である。 上述した通り、Yes or No の検証で済むからである。しかしながら現行学習指導要領<sup>1)</sup>に基づいて行われている小学校、中学校の理科研究授業の多くは、予想通りの実験結果に対する考察に時間をかけすぎている。実験結果について明確な指示がないままでグループ学習を行わせた後、グループごとに実験結果を発表させる。あるいは、実験結果について挙手させて発表させる。これでは本当に重要な、実験失敗についての解析や、予期せぬ実験結果の考察時間が十分取れない。実験前に実験予測を Yes, No 形式で徹底指導しておけば、仮説検証は、Yes, No の確認ですむ。どうしてこんな単純な事がこれまで徹底されてこなかったのかは明白で、1) 理科教育者に最先端の科学研究の経験が乏しく、2) 優秀な科学者が理科教育に深く関わらないからである。少なくとも高校の理科講義、実験の改善は、改訂学習指導要領案<sup>2)</sup>を読む限り期待できる。

### 5-4 実験失敗や予想外の結果を解析し、重要な発見をする能力

4) 実験失敗や予想外の結果を解析し、重要な発見をする能力（考察能力）が、実験、観察後の議論で最も時間を費やして育成すべき能力である。 実験前の仮説通りの実験結果が得られる事は、ごく当たり前の研究の進展であり、指導に必要以上の時間をかけるべきでない。仮説、予測と異なっている事例にこそ、できる限り時間をかけて議論を進めるべきである。また、予測と異なる結果になった理由に対して仮説を立てた生徒を高く評価しなければならない。さらに、もっと重要なのが、仮説、予測の範囲を超えて明らかになった実験観察事実である。これは「発見」なので、「発見」をした生徒を大いに賞賛しなければならない。そして発見に対して、新たな仮説をクラス全員で立てていく。これが次の実験、観察への「科学力」となる。

### 5-5 実験観察結果から生じた新たな疑問を解決するための研究設定をする能力

5) 実験観察結果から生じた新たな疑問を解決するための研究設定をする能力（真の科学力）は、上に述べたように、実験結果の考察から新たに起こった疑問をさらに研究へと進める力である。 本稿の試験問題では、問3で、考察を促している。問4では、5) の新たな「真の科学力」への導入を動機づける意図がある。学校教育では、実験、観察結果のまとめで終わる事が多いが、それでは不十分である。さらなる新たな疑問を提示して、次の授業の導入につなげる事が望ましい。また、最先端の科学研究活動は、「作業仮説転がし」<sup>3)</sup>を繰り返しながら進んでいることを、必ず生徒に強調しなければならない。



## 6. 今後の課題

本稿では、中学生対象の科学コンテスト参加学生を対象にした実験試験問題を例に、科学的思考力を育成するための実験、観察の方法を、科学研究の論理構造を基に概説した。学校教育において、仮設検証や、グループによる議論、アクティブラーニングで思考力の育成が期待されているが、本稿で示したようにそれらは科学的思考力の一部の育成にしか関わっていない。

科学研究活動全体で育成される様々な科学的思考力は、数年から何十年の科学研究活動で培われる。一回の授業や実験コンテストだけでなく、単元単位での指導案作成や、1年、3年単位の理科カリキュラムマネジメントが科学的思考力育成に欠かせない。観察、実験能力の育成にも、数年間での実験、観察指導計画が重要である。なぜなら実験、観察技術の習得には時間がかかるからである。例えば顕微鏡観察の場合、顕微鏡での観察技術が研究結果を大きく左右する。実体鏡や顕微鏡による観察を行う小中学校の研究授業の多くで、実体鏡、顕微鏡の操作が原因の失敗例が認められる。3年間という期間での実験、観察技術の習得指導計画が必要である。単元単位の科学力育成指導案や、科学力を育成するためのカリキュラムマネジメントの詳細については、別の機会に述べたい。

### 謝辞

本稿で紹介された実験をおこなうにあたり埼玉県教育局市町村支援部義務教育指導課から実験講義への支援を頂いた。また下妻淳志先生から実験講義内容に関して貴重なコメントを頂いた。

### 引用文献

- 1) 高等学校学習指導要領(2009) 文部科学省, 62-68.
- 2) 幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について(答申)(2016) 中央教育審議会, 145-150.
- 3) 熊澤峰夫、伊藤孝士、吉田茂生(2002)「全地球史解説」東京大学出版会, pp.1-540.

(2017年3月31日提出)

(2017年4月17日受理)

## Experimental problems for growth of Scientific ability:

-Relation between surficial area and density of minerals-

**OKAMOTO, Kazuaki**

Faculty of Education, Saitama University

**MORITA, Megumi**

Matsubushi High school, Saitama

### Abstract

This paper reports an example of experimental problem for junior high school students who attend science contest. The aim of this problem sheet is to grow scientific ability to proceed experimental study in Earth Science field. In Japanese school classes, several efforts have done to perform experiments and observation to cultivate scientific ability. However, the class style is still far from real scientific research. In the class, motivation and purpose of the experiments have never been proposed by students themselves. A priori experiments have been always prepared in advance. It should be prepared several alternative experiments then students can choose one of the experiments in recipe. In the present experimental problem, one or two kinds of experiments would be chosen by students themselves. Hypothesis has been well prepared before the experiment although validity of the hypothesis has never been discussed appropriately after the experimental result in the class. In the present experimental problem, the hypothesis is required to answer before the experiment, and detailed discussion is required if the result was different from the hypothesis. It is also noted if unexpected discovery was found. The present study strongly suggest that scientific experiments in junior high school classes can be dramatically improved to be a real science.

**Keywords:** scientific experiment, scientific ability, experiment and observation, mineral, surficial area, density, and scientific thinking

科学実験、科学力育成、実験観察、鉱物、表面積、密度、科学的思考力