

原著論文

# マグマの分化に関する教材の開発と授業への展開

荻原 彰\*・手塚恒人\*\*

## I. はじめに

マグマの結晶分化作用は火成岩の分類や成因を理解する上で重要な事項であり、高等学校の地学IBの教科書でも必ず取り上げられている事項である。

一方、これまで火成岩について行われてきた教材開発や指導法の提案を見ると、岡本(1990)や榊原ほか(1981)のようにモード測定に関するもの、河原(1978)、河原(1980)のように地層を構成する一要素としての火成岩に注目したもの、嘉村ほか(1967)のように結晶の析出の実験を取り入れたものなどが見られる。しかしこれらの論文はいずれも結晶分化作用の教材開発を目的としたものではなく、したがって結晶分化作用への言及はほとんど見られない。また1976年の科学研究費特定研究システム班によるカリキュラムの研究では結晶分化作用をかなり詳細に扱ってはいるが、実験・実習についての提案は見られない。このように結晶分化作用は教材開発例がほとんどないが、その原因としては次のようなことが考えられる。

1. 岩石熔融など実験岩石学的な試みは高等学校レベルでは設備面から考えて不可能である。
2. 固溶体のような複雑な物質のモデルをつくって、モデル実験をするのは非常に困難である。
3. スケルガードハンレイ岩体のような典型的な結晶分化を示す岩体は世界的にもそれほど多くなく、実地観察はほとんど不可能である。

端的にいうと結晶分化作用は実験・観察などを取り入れた授業がむずかしい分野であるといえよう。

ところで、長野県飯田市の卯月山ハンレイ岩体はスケルガードハンレイ岩体と同じく地表で結晶分化作用が観察できる岩体である。しかも国内に存在しているため露頭調査や標本収集が容易である。

そこで卯月山ハンレイ岩体を利用し、結晶分化作用を探究的に学ぶことのできる教材の開発を試みた。

## II. 卯月山の地質

図1に卯月山の位置を示す。地籍は長野県飯田市上

久堅(かみひさかた)で、地質的には領家帯に属している。ここでは手塚の「上久堅村誌」(1993)に従って卯月山の地質について述べる。

卯月山の地質図を図2に示す。ここに示されているとおり、卯月山は中心部に塩基性岩であるハンレイ岩、ユークライト(ハンレイ岩の一種)が存在し、そのまわりを超塩基性岩であるコートラングナイトやパイロキシナイトがリング状に取り巻き、さらにそのまわりを塩基性岩が取り巻くという構造を示している。図中のAとBを結ぶ線は道路を表している。

一方、卯月山の中心部を東西に貫く道路に沿って岩石を採集し、単斜輝石、斜方輝石について化学組成の変化をみると図3のようになる。左側が図2に示した道路のルートマップで、道路上の番号はサンプルを採取した露頭を示している。グラフは、一つのサンプルより各鉱物ごとに6個選び、各サンプルの中心部(コア)と周辺部(リム)をEPMAにより測定し、その化学組成の範囲を線で示したものである。

単斜輝石の場合は  $Mg/(Mg+Fe)$  が岩体中心部で低

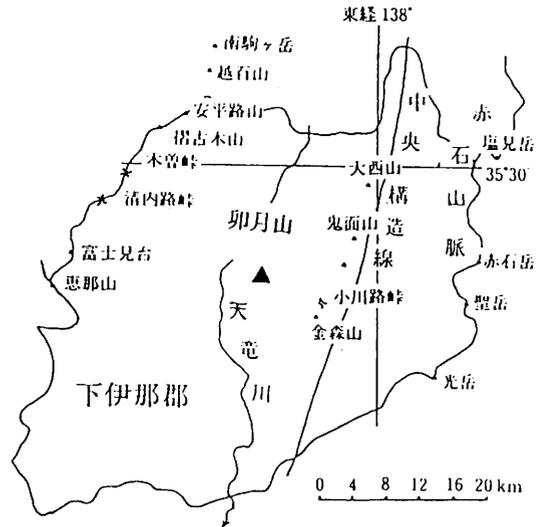
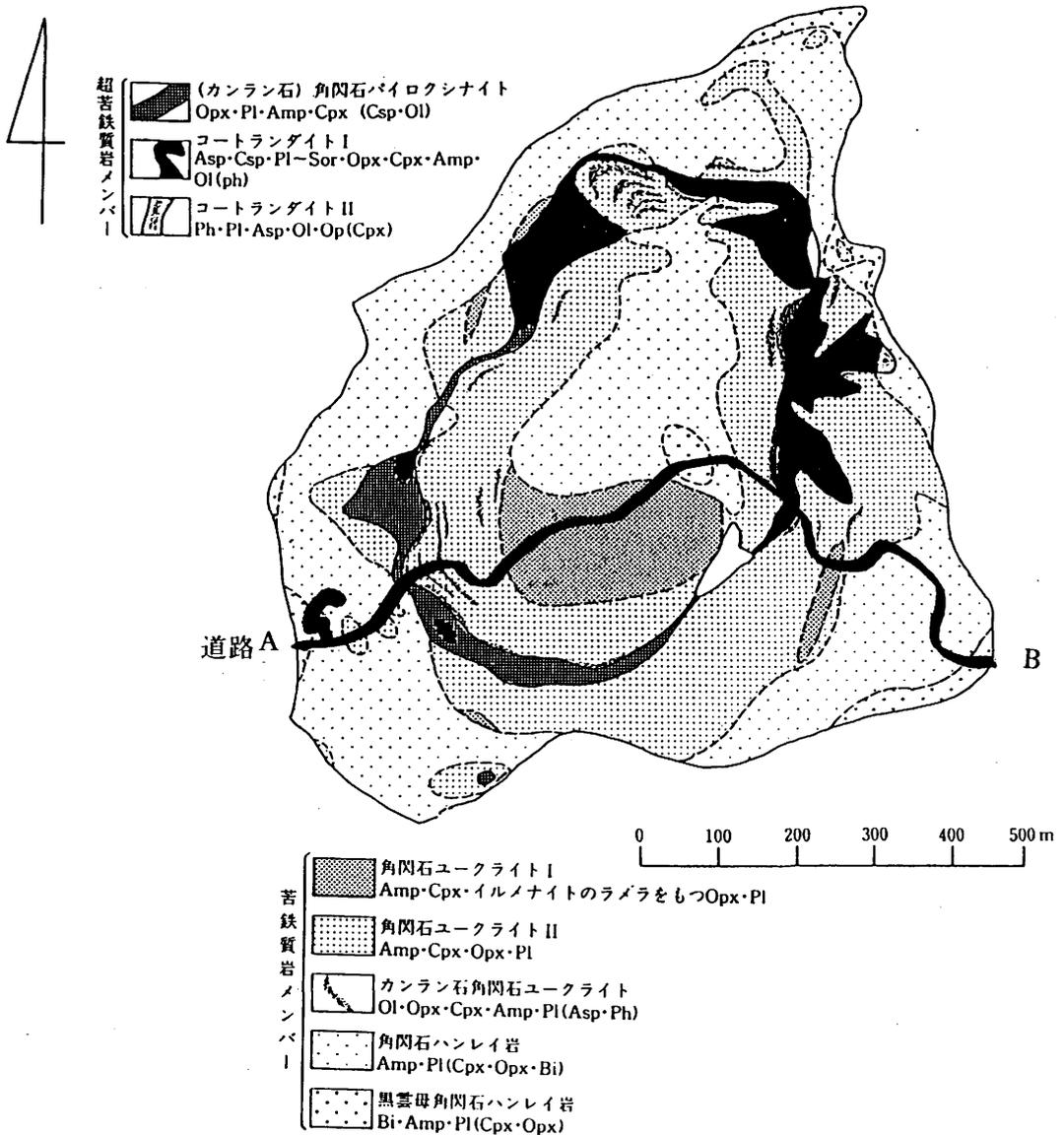


図1 卯月山の位置(手塚, 1994より)

\* 長野県須坂高等学校, \*\* 飯田市立竜江小学校 1997年10月23日受付 1998年4月4日受理



Opx: 斜方輝石 Pl: 斜長石 Amp: 角閃石 Cpx: 単斜輝石 Ssp: クロミアンスピネル Ol: カンラン石  
Asp: プレオネースト Sor: ソーシュライト Ph: フログバイト Bi: 黒雲母

図2 卯月山の地質図(手塚, 1994より, 原図を一部変更)

く、周辺に向かって高くなり、コートランダイトの部分で最大値に達する。超塩基性岩の外側では大きなギャップがあるところがあり、再び  $Mg/(Mg+Fe)$  が小さくなり、外側に向かって再び増加する。東側(図の下側)ではそれを何回か繰り返す傾向を示す。

斜方輝石中の En (エンスタタイト成分) も同じような傾向を示す。なおコアとリムの間では  $Mg/(Mg+$

Fe)の値にはほとんど差はない。また手塚は斜長石、カンラン石についても分析しているが、両鉱物とも授業で取り扱わなかった。グラフには斜長石の値も記してある。

マグマの結晶作用が進行していくと、単斜輝石中の  $Mg/(Mg+Fe)$ 、また斜方輝石のエンスタタイト成分、すなわち  $Mg/(Mg+Fe)$  の割合は減少していく。以上

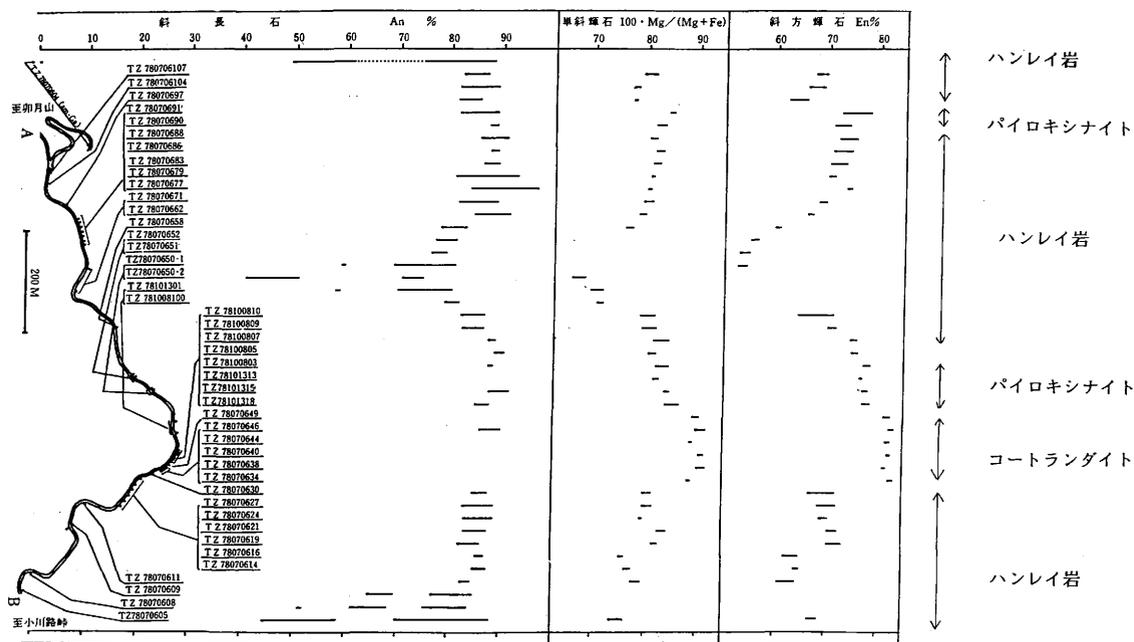


図3 鉱物の化学組成の変化 (手塚, 1994 より, 原図の一部を省略)

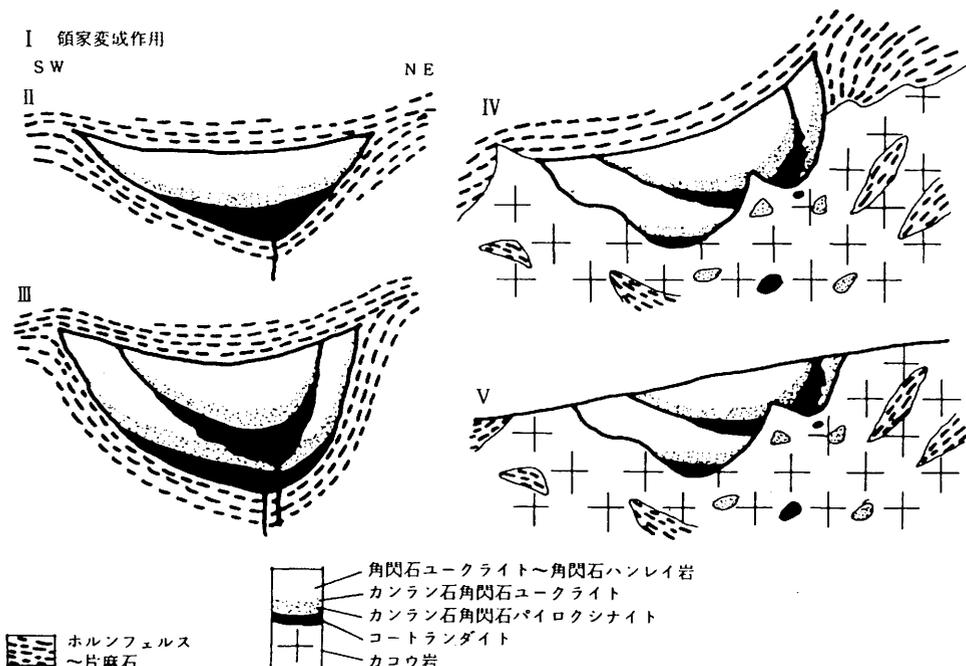


図4 卯月山の地史 (手塚, 1994 より)

このことからリング状超塩基性岩の部分でまずマグマからの晶出が始まり、その内側に向かってより晩期の晶出が行われていったものと考えられる。また外側の塩

基性岩体では同様に外側が初期の晶出で、内側へいくに従って晩期の晶出になっていく。このような二重構造はスケルガードのような層状構造では説明しにく

く、2回の貫入を考えた方が説明しやすい。これらのことや各種の化学分析から手塚は卯月山の地史について次のように考えている(図4)。

1. 領家変成作用中かその末期に領家変成岩またはその原岩中に苦鉄質マグマが貫入し、沈積作用によって層状構造をつくる。

2. 苦鉄質マグマが完全に固結しないうちに、さらに外側から包み込むように第2回目の苦鉄質マグマの貫入が起こり、やはり層状構造をつくる。

3. 花崗岩質マグマの貫入が起こり、苦鉄質複合岩体、ホルンフェルス、片麻岩は傾いたり、下部が溶かされる。

4. 現在の地表面まで侵食が進む。

### III. 教材の構成

本教材の試行を平成7年の11月初旬に行った。対象生徒は長野県須坂高等学校の2年生の地学IB選択者3講座114人である。授業時間は4時間である。玄武岩質マグマから流紋岩質マグマへとマグマ組成が変化し、その過程で多種類の火成岩が生まれてくるという結晶分化作用の概略は既に学習してある。本教材ではそれをさらに充実・深化することを意図している。

学習活動は次のような流れで進む。なお学習はすべて3~4人の班単位で行った。

#### 1. 岩石の偏光顕微鏡観察

卯月山ハンレイ岩体のパイロキシナイト、コートランダイト、ハンレイ岩の各岩石についてプレパラートの顕微鏡画像をテレビで提示した。ついで各岩石のプレパラートを簡易偏光顕微鏡を使用して観察させた。各岩石の顕微鏡的特徴は次のようなものである。なお以下、両輝石と記述するのは斜方輝石、単斜輝石のことを指す。

##### ・パイロキシナイト

両輝石、カクセン石、斜長石が主として見られる。両輝石が非常に多い。両輝石は0.3~1mmの大きさ、自形を示す。両輝石はわずかにカクセン石に置換されていることがある。斜長石は数mm前後で自形、両輝石を多数含む。クロミアンスピネルがごくまれに見られる(図5)。

##### ・コートランダイト

大型のカクセン石の中に小型のカンラン石や両輝石が斑点のように入っている。カンラン石が非常に多い。カンラン石は丸みのある粒状で大きさは0.2~1mmほどで、割れ目に沿ってジャモン石化が見られ

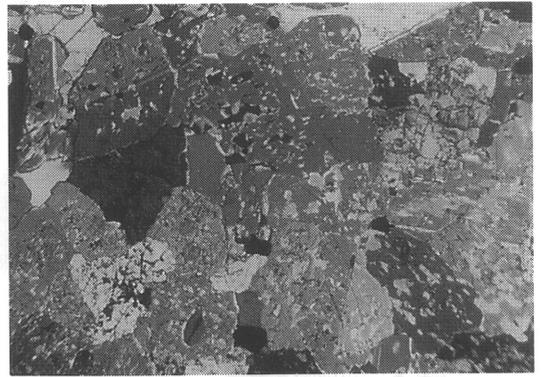


図5 パイロキシナイト

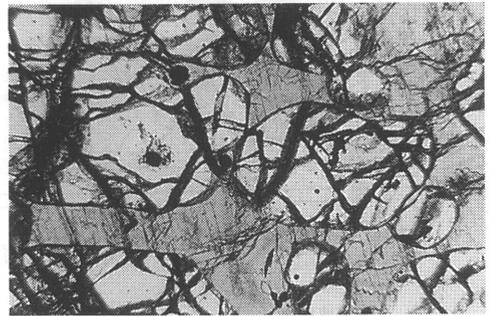


図6 コートランダイト



図7 ハンレイ岩

る。両輝石は粒状で0.2~30mm。カクセン石は10~30mmと大型のものが多い。各鉱物にはクロミアンスピネルが含まれることが多い(図6)。

##### ・ハンレイ岩(ユークライトを含む)

カンラン石、両輝石、カクセン石、斜長石が主な鉱物である。斜長石とカクセン石が多い。カクセン石は0.2~50mmで他形~半自形。斜長石も同程度の大きさで自形(図7)。

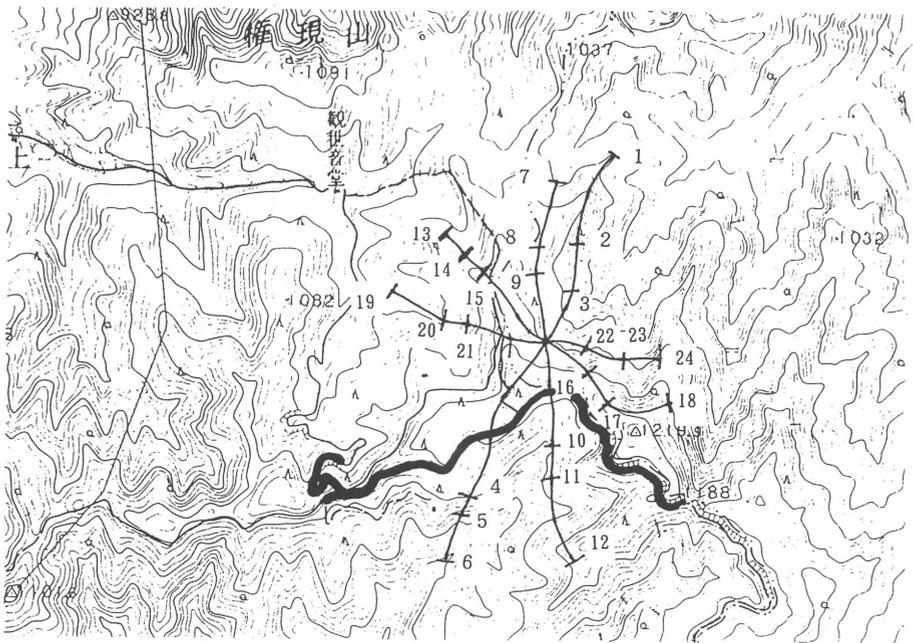


図8 模擬地質調査のルート (太線部は図2, 3の道路)  
国土地理院発行 2.5 万分の 1「上久堅」を引用

## 2. 岩石の肉眼的観察

各岩石を標本により確認させた。各岩石の肉眼的特徴は次のとおりである。

- ・パイロキシナイト

緑がかった黒色の輝石が非常に多い

- ・コートラングライト

黒色の1~3 cm大のカクセン石が多く、その中に粒状にカンラン石、輝石が入っている。岩石の色調が著しく黒い。

- ・ハンレイ岩

上の二つの岩石に比べると色が淡く、全体的には灰色である。長柱状ないし粒状の斜長石もはっきり見える。

## 3. 模擬地質調査

ここでは実際の地質調査ではなく、地図上でルートを示し、そのルートを地質調査したと仮定する。そしてルート沿いに出現する岩石を各班で同定するという模擬的な地質調査を行った。設定したルートを図8、ルート上の番号と露頭の対照表を表1に示す。図8中の太い実線は図3の道路を表している。図中の各番号は岩石の出現する露頭を表す。例えば1番の露頭ではハンレイ岩が出現し、以後はハンレイ岩の露頭が続くが、2番の露頭ではコートラングライトが出現し、以後

それが3番の露頭まで続くということである。同定する岩石は20個あり、各講座には10班あるので、一つの班で2個の岩石を同定することになる。なおユークライトはハンレイ岩に含めて取り扱った。

## 4. 模擬地質図作成

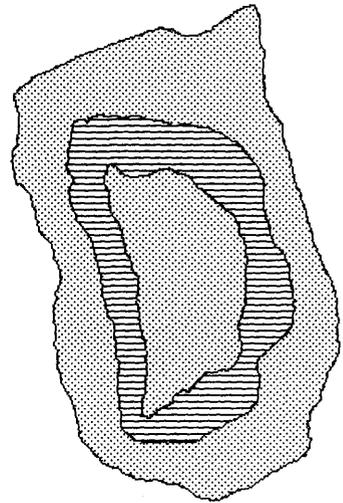
各班で岩石の同定結果を発表し、その結果に従って岩石の分布を地図上に書き込む。このルートマップをもとにして各班で地質図を作製した。地質図についての学習はすでに行っているのので、作図に当たっての指示はコートラングライトとパイロキシナイトを超塩基性岩として一括するよう指示したのみである。なお実際の地質調査では、地質図を書く上で岩石境界の情報が重要となるが、ここでは地質図を書くこと自体が目的ではなく、マグマ分化について知ることが目的なので、境界についての情報は特に与えなかった。ここでできる地質図は図9のように塩基性岩を超塩基性岩が取り巻き、それをさらに塩基性岩が取り巻くという構造になる。サンプリングが粗く、実際の地質図とはやや異なるので、課題終了後、正確な地質図を教師の側から提示した。

## 5. マグマの分化の順序の推定

模擬地質図は塩基性岩、超塩基性岩が同心円状に分布する特異なものとなる。このような分布が形成され

表1 ルートと露頭の対応表

ル ー ト	露 頭	岩石の区分
1~2	ハンレイ岩	塩基性岩
2~3	コートラングナイト	超塩基性岩
3~4	ハンレイ岩	塩基性岩
4~5	パイロキシナイト	超塩基性岩
5~6	ハンレイ岩	塩基性岩
7~8	ハンレイ岩	塩基性岩
8~9	コートラングナイト	超塩基性岩
9~10	ハンレイ岩	塩基性岩
10~11	パイロキシナイト	超塩基性岩
11~12	ハンレイ岩	塩基性岩
13~14	ハンレイ岩	塩基性岩
14~15	コートラングナイト	超塩基性岩
15~16	ハンレイ岩	塩基性岩
16~17	コートラングナイト	超塩基性岩
17~18	ハンレイ岩	塩基性岩
19~20	ハンレイ岩	塩基性岩
20~21	パイロキシナイト	超塩基性岩
21~22	ハンレイ岩	塩基性岩
22~23	コートラングナイト	超塩基性岩
23~24	ハンレイ岩	塩基性岩



■ は塩基性岩

▨ は超塩基性岩

図9 図8から作製した地質図

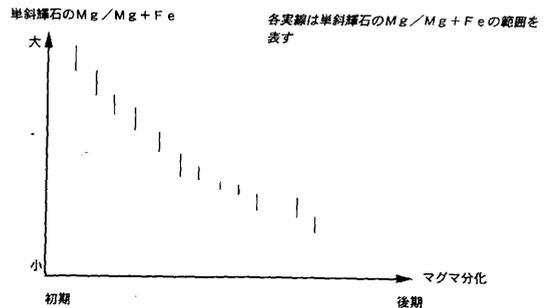


図10 マグマ分化に伴う単斜輝石の化学組成の変化  
各実線は単斜輝石のMg/Mg+Feの範囲を表す

た過程を知るために、輝石の化学組成を利用してマグマの分化していく順序を推定した。単斜輝石，斜方輝石の2種類の鉱物についてマグマが固結し，分化が進むにつれて単斜輝石についてはMg/Mg+Feの比が減少することが概念図(図10)とともに示された。この概念図は実測されたものではなく，モデルとして示したものである。

ついで各班で討論し，図3の中に矢印でマグマの分化していく順序を書き入れた。なおこのようなマグマ分化の指標については，その岩石学的な意味については触れず，便利な指標であるという程度に止めた。

#### 6. 卯月山の岩石の形成過程の推定

各班で，前項で推定したマグマ分化の順序をもとに，岩石の形成過程を考察した。その際に，スケルガードハンレイ岩体の地質構造とその形成過程をプリントで学習し，それを参考にした。最後に手塚の説

(図4)を紹介してまとめとした。

#### IV. 教材の評価

ここでは，本教材がマグマの分化に対する生徒の考え方を深めるのに適切な教材であったかどうか，いくつかの評価ポイントを設け，生徒の反応から考察する。

##### 1. 岩種の同定

コートラングナイト，パイロキシナイト，ハンレイ岩はそれぞれ特徴的な外見をもっており，標本と比較すれば容易に同定できると思われる。しかし，これは教師の側の考え方であり，生徒からすれば同定がむずか

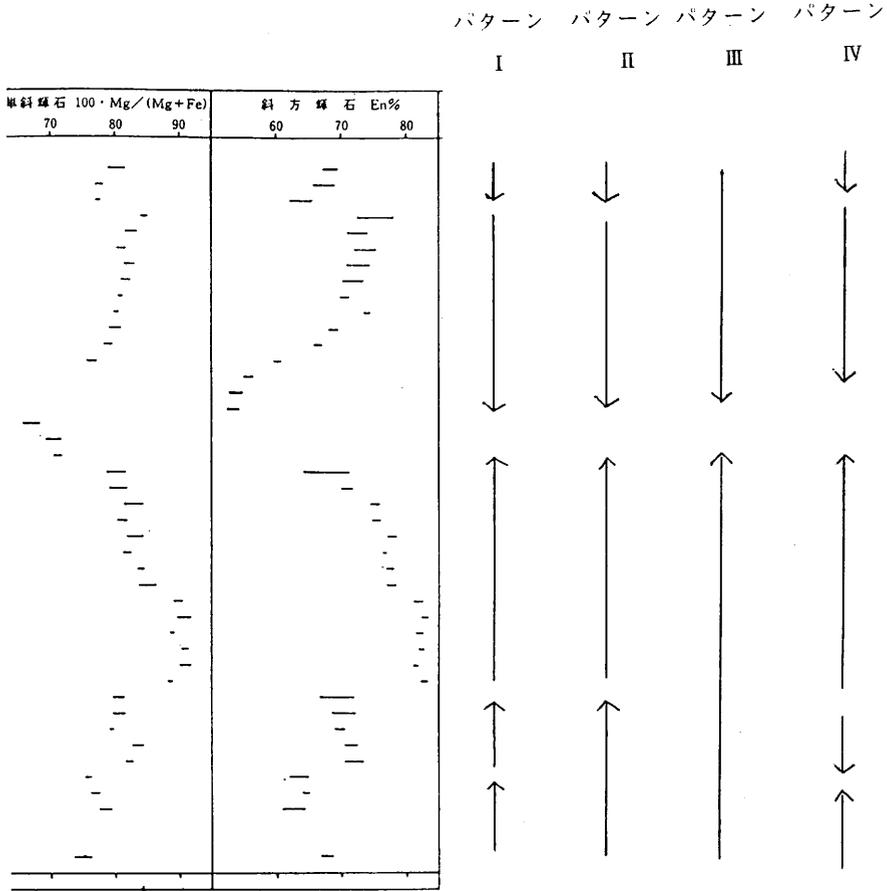


図 11 マグマの分化の方向に対する生徒の考え方

しいかもしれない。そこで模擬的地質調査の際に適切な岩石の同定ができるかどうかチェックした。3講座で延べ60個の岩石を同定したわけだが、誤った同定は6個で、90%の率で同定に成功している。このことから考えて3種の岩石は高校生でも十分見分けることが可能と思われる。

2. 地質図

塩基性岩を超塩基性岩が取り巻き、さらにその回りを塩基性岩が取り巻くというリング状の地質図がつくれるかどうかチェックした。この課題はすべての班が達成することができた。

3. マグマ分化の順序の推定

マグマの分化していく順序を図3から読み取れるかどうかチェックした。生徒の回答のパターンを図11に示す。外側の岩体の東側について1回の分化とした班と2回の分化とした班があったが、両者とも正解とした。内側の超塩基性岩～塩基性岩と外側の塩基

性岩を区別し、かつ外側の岩体も内側の岩体も外側から内側へと分化が進行してくることが理解されているからである。誤った矢印を描いた回答（外側の岩体と内側の岩体を区別しない、あるいは分化の方向が逆）は3講座30班のうち6班で正答率は80%である。化学組成を表す図3のような資料は高校生にはやや難解であるが、読み取り方の説明があれば、分化の順序の推定がおおむね可能であることがわかった。

4. 卯月山の岩石の形成過程の推定

卯月山の岩石がどのように形成されてきたのか推定させた解答をチェックした。その結果、30班の中で次のような考え方が見られた。

- a. まず内側の超塩基性岩～塩基性岩の岩体をつくったマグマが貫入し、周辺部から冷却・固結し、ひき続いて外側に塩基性岩の岩体をつくったマグマが貫入したと考える—9班

- b. 外側にまずマグマが貫入し、周辺部から冷却・固結し、ひき続いて内側にマグマが貫入したと考える—17班
- c. わからない—1班
- d. 内側の岩体をつくったマグマが固まる際に外側へ滲み出してきて、内側・外側同時にできた—3班

dの考え方は明らかな誤りであるが、a, bの考え方は貫入順序が入れ替わるだけなので、どちらも正解といえる。そこで正答率が87%となり、ほとんどの班が正しく卯月山の岩石の形成過程を推定できたことになる。

### 5. 授業後の感想

授業後に生徒に対する自由記述で授業の感想を書いてもらった。その結果をまとめてみると次のようになる。興味がもてたとする意見が51人、興味がもてなかったとする意見が6人、わかりやすかったとする意見が12人、むずかしかったとする意見が26人、地質構造や地史の複雑さに驚いたとする意見が22人、一つの事実についてさまざまな考え方ができるという点に驚きを覚えたとする者10人、研究者の追究の姿勢に感銘を受けた者14人、他の例についても勉強してみたいとする者5人、周辺の地質構造がわかっていればさらに踏み込んで考えられるとした者1人である。なお欠席者があるので、回答は100人分である。

要約すれば、むずかしくて複雑ではあるが、興味がもてる内容であったといえよう。

### V. まとめと議論

マグマの結晶分化は実験・実習を取り入れた授業を構成するのが困難な分野である。しかし模擬地質調査や化学組成図からの分化順序の推定というような授業形式をとることにより、ある程度その困難を克服することができた。

授業では高等学校の内容としては高度な内容を取り上げ、生徒もむずかしいと感じたようだが、一方で授業の中の課題には高率の正答が見られる。また授業内容について興味深いと感じた生徒がかなり多い。このようなことから本教材は高等学校で十分使用できると思われる。

本教材ではまだ研究の過程にあり、さまざまな解釈がありうる現象について扱っている。またさまざまな

研究の結果出てきた結論を提示するのではなく、一人の研究者による研究を体験する形となっている。授業後の感想では研究者の姿勢への感銘や、一つの事象に対して正答が一つではなく、異なった解釈がありうることへの驚きの表明など研究の過程そのものに関心を示した生徒が見られた。生徒の感想から例を示せば《一つの事実から、その事実が起こる過程をいろいろ考えられるというのは、岩石や地質の最大の魅力だと思います》、《一般的に「こう考えられている」という説も本当は全然違うかもしれないので、証明されるものがない限り、必ずしもその説があっているとは限らなく、いろいろな考え方ができるので、そういうところがおもしろいところだと思いました》《調査の結果から起こりうるすべての場合を考えなければいけないと思った。そのようなことを考えているとなにかわくわくする》《これだけのことを調べ、これだけの結論を出すためにはこれだけの多くの資料とそのための調査が必要だということには改めてたいへんと思った》などである。これらのことは上述のような本教材の構成によってもたらされたものと思われる。このような構成については異論もあると思われるが、教材を開発していく際の一つの考え方であると筆者は考えている。

### 謝 辞

標本作製を助けていただいた信州大学の河内晋平教授、日野善太郎技官に感謝申し上げます。

### 参 考 文 献

- 河原富夫(1978): 白亜紀火山岩類の教材化—その理念—。地学教育, 31(6), 145-150.
- 河原富夫(1980): 地層教材としての白亜紀火山岩類。地学教育, 33(3), 107-112.
- 文部省科学研究費特定研究システム地学カリキュラム班(1976): システム地学カリキュラム(その2)。地学教育, 29(3), 63-76.
- 岡本弥彦(1990): イメージスキャナーによる花こう岩類のモード測定。地学教育, 43(6), 175-180.
- 榊原雄太郎・菱田清和(1981): 岩石指導のための花崗岩のモード分析について。地学教育, 34(5), 119-128.
- 手塚恒人(1994): 上久堅村誌 地形・地質。上久堅村誌刊行委員会編, 3-45.
- 嘉村策磨・太田 秀・松原新一・大島治孝・仲村 馨・鈴木誠二(1967): 岩石の観察指導における造岩鉱物の扱い方。地学教育, 20(2), 46-56.

荻原 彰・手塚恒人: マグマの分化に関する教材の開発と授業への展開 地学教育 51 巻 4 号, 1-9, 1998

〔キーワード〕 結晶分化作用, 火成岩, マグマ, 高等学校地学

〔要旨〕 マグマの結晶分化作用は火成岩を理解する上で必須の事項であるが, 教材開発の遅れている分野であるといえる。そこでスケルガードハンレイ岩体と同じく地表で結晶分化作用が観察できる長野県飯田市の卯月山ハンレイ岩体を利用し, 岩石の同定, 模擬地質調査などを行い, 結晶分化作用を探究的に学ぶことのできる教材の開発を試みた。課題の達成状況, 生徒の感想から高等学校段階でも使用できる教材と判断した。

Akira OGIWARA and Tsuneto TEZUKA: Development of the Teaching Material about Magmatic Differentiation. *Educat. Earth Sci.*, 51(4), 1-9, 1998

~~~~~

本の紹介

~~~~~

鳥海光弘ほか7名共著 岩波講座地球惑星科学 14  
社会地球科学 A5 262頁 1998年3月初版  
3,700円+税

本講座の最終巻である。聞きなれない学問名であるが、この科学の研究対象を本書から要約すると、「従来から研究されてきた地球物理学、気象学、気候学、第四紀地質学、人類学、考古学、文化人類学、海洋学、地球化学、都市工学、環境工学、経済学、社会学等々のすべての学問領域をカバーし、広範囲のものとなろう。その根幹は明快であり、人間圏および地球システムの進化の解明である。今後の課題は地球システムにおいて、いかに存続可能な人間圏を不断に構築してゆくか、もちろん、現段階では未開拓の分野である。ただ、こうした目標設定は可能であり、設定しなければならない。」と述べている。本書は上述の目標に向かって個々の事象の一部が述べられている。目次は次のようになっている。

はじめに

1. 人間圏とは何か

(1) フレーム問題について (2) 地球システムと人間圏 (3) 文明の地球システム論的考察

2. 地球資源論

(1) 地球資源論とは (2) 資源の分類と成因 (3) 地球資源問題 (4) 地球資源問題への取り組み—科学技術的対策 (5) 地球資源問題への取り組み—政治・経済・社会的対策

3. 自然災害

(1) 気象災害 (2) 火山災害 (3) 地震災害 (4) 津波災害 (5) 巨大災害

4. 予知・防災の地球科学

(1) 災害とは何か (2) 地球科学と予測・予知 (3) 地球惑星科学から見た防災 (4) 都市防災のあり方

5. 地球—人間社会システムの将来設計

(1) 人間圏の安定性 (2) 太陽系システムのストック依存型文明 (3) 社会地球科学の展望

索引

1では、主として人間圏を詳細に説明している。社会地球科学では人間圏の定義を明確に理解しておく必要があるからである。

2には、「まとめ」があるので、参考のため、それらを書いておきたい。

- ・地球システムでは多種多様な資源が生成される
- ・近年、資源問題が非常に深刻化してきた
- ・地球資源問題を解決するための対策を立てることが急務である

3では、目次にある自然災害を例をあげて説明している。そして、それらの災害を社会地球科学に組み込むための考察をしている。「まとめ」があるので参考のため書いておきたい。

- ・気象災害をもたらす現象は多種多様である
- ・巨大気象災害は未然に防ぐことができる
- ・火山災害の性質は、噴火のタイプによって大きく異なる
- ・深刻な火山災害の多くは、火砕流や泥流などの流れによって生ずる
- ・大規模な噴火は、噴煙を高く上げて、広域に大災害をもたらす
- ・地震災害の様相は地震発生の時・場所・社会的条件に左右される
- ・海洋国にとっては津波の危険性をつねに忘れてはならない

4では、災害の予知・防災の意義を例をあげて説明している。そして、次のように「まとめ」している。

- ・防災には災害の予測・予知が不可欠である
- ・自然災害は地球システムの大きな変動である
- ・地球科学は巨大災害の実態を明らかにしてきた
- ・災害情報については、その精度、正しさを十分に検討する必要がある
- ・新たに都市災害が危険性を増してきた
- ・地球惑星科学は防災への指針を与える

5では、人間圏の安定性、その持続的発展の可能性、人間圏の進化、さらにその将来設計を考察し、実践的学問領域である社会地球科学について、その基本構想を提示し、その根幹は明快で、人間圏および地球システムの進化の解明であるという。

本書の内容は、地学担当の先生がたなら、すでに知っている事象が多い。しかし、それらの個々の事象を社会地球科学という新しい学問分野を創設する観点から述べている本は、ほかには少ないのではないかと思う。その意味で読むに値する本であり、視野を広げてくれる本であると思う。

(貫井 茂)