鉱物の塑性変形—変形実験と天然の鉱物の変形—

藤野 清志*

Plastic deformation of minerals: Deformation experiments
and deformation of natural minerals

Kiyoshi FUJINO*

Abstract

Plastic deformation experiments of major silicate minerals are reviewed with focussing on what have been aimed and what have been clarified in those experiments. The experiments include those of uniaxial compression, three-point bending and indentation creep. Some systematic relationships between high-temperature plasticity and crystal structure are also discussed.

1. はじめに

固体地球の流動現象を理解する上で、その構成物質である鉱物の塑性変形の理解は欠かせない。しかしそうした塑性変形について系統的な研究がなされているのは、かんらん石、石英、氷等のごく限られた鉱物だけで、輝石や長石、ざくろ石と言った他の主要造岩鉱物についての研究はまだきわめて不十分である。またマントル以深の地球深部を構成する鉱物については、かんらん石のほかは塑性変形の基本的なことをほとんどわかっていない。

こうした鉱物の塑性変形を調べる目的で、天然の鉱物の変形構造の観察と共に、いくつかの鉱物について高温下での塑性変形実験が行われている。本稿では、これまでに行われた鉱物の塑性変形実験を概観すると共に、それらの結果を天然の鉱物の変形に応用する際の問題点について触れてみたい（なお、高速の塑性変形については本シンポジウムの森、北村を参照されたい）。

2. 鉱物の塑性変形実験

固体地球の流動をミクロな立場から考えるには、多

結晶体の塑性変形を考えなければならないが、その基礎としてまず単結晶の塑性変形を考えなければならない。ここでは主に単結晶の塑性変形実験について述べる。

塑性変形は大別すると、原子の拡散によるもの（拡散クリープ）と転位のすべりによるもの（転位クリープ）があり、低応力では前者が、高応力では後者が支配的になる。これまでに行われた鉱物の塑性変形実験はほとんどが転位クリープを調べるための一軸圧縮実験であった。一軸圧縮であって引張り実験がないのは、鉱物は一般に引張り強度が弱く、また引張り実験の時の試料のつかみが難しいためであろう。

一軸圧縮実験 (Fig. 1) では調べたいすべり系の面を荷重軸に対して 45° に向け、その面に対して生ずる分

Fig. 1 Schematic diagrams of uniaxial compression and three-point bending

1989年9月20日 受理

* 愛媛大学理学部地球科学教室

Department of Earth Sciences, Faculty of Science,
Ehime University Matsuyama 790, Japan

解せん断応力（面に平行なせん断応力成分）による変形の様子を調べる。そこで問題とされたのは、1) 転位のすべり系はなにか、それはどのような条件で働くか、2) 歪または歪速度と応力の関係はどうなっているか、3) 塑性変形の際にどのような欠陥構造ができるか、といった事が中心的課題であった。

石英やかんらん石についてのこうした一軸圧縮実験が、1960年代から70年代にかけてアメリカやオーストラリアを中心に行われた¹⁻³⁾。その結果、かんらん石や石英についてはある温度や圧力あるいは歪速度において、どのすべり系が優越するか⁴⁾、あるいは歪速度が応力のべき乗でどの様に表されるか⁵⁾、などがわかってきた。またその時に生ずる欠陥構造、特に転位構造についても、酸化デコレーション法による光学顕微鏡や透過電子顕微鏡による観察³⁾で、解明が進んだ。さらに1970年代後半から80年代にかけては、歪の増大にともなって、単結晶内部でフリーな転位が再配列して転位網を作ったり、僅かに方位の異なる亜結晶粒に分かれたり、更には別々の結晶になってしまう動的再結晶の面にも目が向けられるようになってきた⁶⁾。

一方、水が加わると塑性変形が著しく容易になることが石英について知られていたが、かんらん石についても同様の事が Karato et al.¹⁾ による多結晶の変形実験で確かめられた。この実験では同時に変形応力の結晶粒径依存性も明らかにされ、拡散クリープが見い出された数少ない実験例となった。

鉱物についてのこれまでの塑性変形実験は、もっぱら一軸圧縮実験に限られていたが、最近輝石とかんらん石について三点曲げによる高温下での曲げ変形実験が行われた⁸⁻⁹⁾。三点曲げ (Fig. 1) は一軸圧縮に比べて解析がやや厄介であるが、一つの試料内で同時に種々の応力場が発生するので、そうした違いを見るのに適している。また元々材料科学の分野で破壊強度試験に広く用いられているように、塑性変形から破壊に至るプロセスを見るのに適したものと言える。かんらん石の三点曲げでは荷重軸に対する結晶方位の違いによる特徴的な曲げ変形がみられ、それらは試料内に発生するせん断応力によるすべり系 (010) [100] の転位のすべり運動と堆積によって、説明されることが示された⁹⁾。

また、地球深部のレオロジーを考えるには地球深部物質の塑性変形の情報が不可欠であるが、高圧合成で大きな結晶が得られないという事情を考慮して、Karato et al.¹⁰⁾ は微小硬度計によるインデンテーション・クリープ試験を MgSiO_3 ペロプスカイトなどの

高圧鉱物に試みている。解析上種々の問題はあっても、新たな試みとして注目される。

今後は塑性変形実験と並行して、塑性変形と脆性破壊にまたがる領域の変形実験が重要になってくるであろう。

3. 天然の鉱物の変形

我々はグローバルな流動現象を取り扱う時には、地球物理学的あるいは地質学的手段で観測したデータを、適当なレオロジーのモデルと塑性変形実験で得られた流動則などにのっとって解析する。一方、天然における変形のメカニズムを理解するには、天然の岩石や鉱物に残された変形構造を塑性変形実験で得られた変形構造に照らして解析することが必要である。その際第一に考慮しなければならないのはもちろん、両者の歪速度の違いであるが、そのほかにもいくつか考慮しなければならない事がある。

一般に、単結晶の塑性変形実験では、ある温度、圧力、歪速度のもとでは、特定のすべり系が優越する。しかし天然の鉱物では、一般に複数のすべり系が観察される¹¹⁾ (Fig. 2)。これについては、天然の場合多結晶体の塑性変形であるため、均質に変形するために同じ条件下で複数のすべり系が同時に働いたという可能性と、いくつかの段階の変形構造が重なって記録されていると言う別の可能性の二つが考えられる。これら両者を区別するのはなかなか難しい。Fig. 2 の場合には、バーガース・ベクトル $\mathbf{b} = [100]$ の転位の方が $\mathbf{b} =$

Fig. 2 Dislocation structure of naturally deformed olivine from the Uenzaru peridotite in the Hidaka metamorphic belt¹¹⁾. Dislocations of Burgers vector [100] are aligned nearly horizontally at the upper and the lower portions, while those of [001] with nearly vertical elongation are distributed randomly between them.

[001]のものに比べて、フリーの転位に対する配列した転位の比率が高いので、より早期の高温時に形成された（従ってより回復を受けている）と解釈している。このように天然の鉱物の転位構造から、過去の応力履歴を読み取るためには、転位の回復などの理解が是非とも必要となる。

4. 塑性変形と結晶構造の システムティクス

鉱物の塑性変形の基本特性を、結晶構造から導き出すことは、鉱物学に課せられた1つの大きな課題である。それは地球深部物質の塑性特性の見積りにも役立つ。そこで塑性変形と結晶構造との間のシステムティクスが問題になる。しかし金属などの単純な構造については、ある程度のシステムティクスが見いだされているが、珪酸塩のような複雑な構造では、まだその種の研究はきわめて少ない。そのような研究の一例として、Fig. 3 に Karato¹²⁾ による種々の鉱物の流動応力を示す。各温度において、 10^{-5} /sec の歪速度で塑性変形させるのに要する応力（流動応力）は、温度と流動

応力をそれぞれ融点と剛性率で規格化すると、結晶構造毎にほぼ決まった領域に落ち着くことがわかる。ではこれら鉱物毎の流動応力の違いは何によっているかというと、Fig. 4 に見るように基本的に、それぞれの塑性変形を生じさせる転位のバーガース・ベクトルの長さによっていることがわかる。

一方、塑性変形と結晶構造との関係の別の面をみるために、転位の主要なすべり系をいくつかの代表的な鉱物についてまとめてみたのが Table 1 である。Table 1 には、比較のため各鉱物のへき開面又はパーティング面のせた。この表からわかるように、転位のすべり面とへき開面は、必ずしも一致しない。すべり面について一般的に言えることは、1) 1 番短い格子ベクトルを含む面、2) 酸素の（最密）充填層に平行な面、3) Si-O 結合を切らない面、ということが言える。ただしバーガース・ベクトルはほとんどの場合、1 番短い格子ベクトルであるから、1) はほぼ絶対的な条件と言えるが、2) と 3) の条件は 1) とは相いれない場合があるので、条件としてはほぼ 1), 2), 3) の順に優先されると考えられる。

Fig. 3 Comparison of normalized flow stress-temperature relationships for various silicates and oxide at the strain rate of 10^{-5}s^{-1} . (After Karato¹²⁾)

Fig. 4 Correlation between flow stress (at strain rate 10^{-5}s^{-1} at $T/T_m=0.8$) and the length of Burgers vector. (After Karato¹²⁾)

Table 1 Dominant slip systems and cleavages of major silicate minerals.

	<u>Slip system</u>	<u>Cleavage</u>
Olivine	(010)[100]	(010), (100) imperfect
Orthopyroxene	(100)[001]	{210} good; (100) parting
Clinopyroxene	(100)[001]	{110} good; (100) parting
Orthoamphibole	(100)[001]	{210} perfect
Clinoamphibole	(100)[001]	{110} good; (100) parting
Mica	(001)[100]	(001) perfect
Plagioclase	(010)[001]	(001), (010) good
Quartz	(0001)<1120>	no cleavage

5. 今後の課題

鉱物の塑性変形についてのミクロなレベルの研究は、まだ極めて不十分な段階にある。今後明らかにしなければならぬ課題として、主要造岩鉱物特に長石と、かんらん石以外のマントル以深鉱物の塑性変形についての基礎データの蓄積、塑性変形における圧力効果の解明、鉱物の塑性特性についての結晶構造からの解明、変形の進行に伴う転位の回復や動的再結晶等の変形のダイナミックスの解明、そして単結晶の塑性変形と多結晶体のそれとの橋渡し、等が重要であると考えられる。こうした課題で鉱物学（者）の果たす役割はきわめて大きいと言えよう。

文 献

- 1) Christie, J. M., Griggs, D. T., and Carter, N. L. : J. Geol., 72, 734 (1964)
- 2) Durham, W. B. and Goetze, C. : J. Geophys. Res.,

82, 5737 (1977)

- 3) Durham, W. B., Goetze, C., and Blake, B. : J. Geophys. Res., 82, 5755 (1977)
- 4) Carter, N. L. : J. Geophys. Res., 76, 5514 (1971)
- 5) Carter, N. L. : Rev. Geophys. Space Phys., 14, 301 (1976)
- 6) Karato, S., Toriumi, M., and Fujii, T. : Geophys. Res. Lett., 7, 649 (1980)
- 7) Karato, S., Paterson, M. S., and Fitz Gerald, J. D. : J. Geophys. Res., 91, 8151 (1986)
- 8) Schloessin, H. H. and Ranalli, G. : Phys. Earth Planet. Int., 52, 132 (1988)
- 9) 藤野清志, 桃井斉, 中崎宏幸, 風呂和志, 遠藤乃之 : 岩鉱, 特別号 4, 81 (1989)
- 10) Karato, S., Fujino, K., and Ito, E. : Geophys. Res. Lett., accepted (1989)
- 11) 中崎宏幸, 藤野清志, 桃井斉, 小松正幸 : 三鉱学会講演要旨集, A17 (1989)
- 12) Karato, S. : Phys. Earth Planet. Int., 55, 234 (1989)