裂開の顕著なかんらん石について

ON THE OLIVINE WITH WELL-DEVELOPED PARTINGS

相 川 信 之 (Nobuyuki Aikawa)*

The olivines with remarkably well-developed parting, (100), (010) and (001), from the Komori ultrabasic mass along the Maizuru structural belt were investigated by the powder and single-crystal X-ray methods and the optical microscopy. It has become clear that the very strong intensity of 020 reflection on the powder diffraction patterns is not caused by the change of crystal structure, but by the preferred lattice orientation. Dislocation arrays on (100), (010) and (001) in olivines which were heated at 800°C in air were observed under the optical microscope. The partings are closely related with dislocation arrays; the partings have been formed along the planes with dislocation arrays, because those planes have become weak against the mechanical force in relation to structural movement. The alteration after the formation of partings have taken place under the condition of relatively high temperature and low pressure.

1. はじめに

かんらん石は塩基性岩や超塩基性岩中に普通に産出する鉱物として、マントルの主要構成鉱物の1つとして重要である。かんらん石は通常それほど顕著なへき開を示さない (Winchel and Winchel, 1951; Deer *et al.*, 1962)。しかし、天然でへき開の顕著なかんらん石が各地より報告されている (Hawkes, 1946; Velinsky and Pinus, 1969)。本邦においても舞鶴構造帯北側に分布する超塩基性岩体 (Kuroda and Shimoda, 1967) や飛騨外縁構造帯の超塩基性岩体 (松久, 1967) から報告されている。いわゆる“cleavable olivine”と呼ばれているかんらん石である。一般にへき開は結晶構造中の結合の弱い方向に起る。かんらん石はこの意味でへき開が起るとすれば(010)面がそれで、Winchel and Winchel (1951) や Deer *et al.* (1962) によれば(010)は明瞭なへき開を示すことが記載されている。いわゆる“cleavable olivine”のように(100), (010)と(001)の3方向に完全なへき開が起るとは考えられず、むしろ結晶構造中の欠陥の分布の異方性と考えるのが自然で、3方向の見事な割れ目は裂開とするのが妥当と思う。そこで本報告では裂開として今後取り扱う。

裂開の顕著なかんらん石に関する研究報告で注目すべき事は、Kuroda and Shimoda (1967) と黒田 (1969) によって指摘されたかんらん石の結晶構造の変化の可能性である。即ち、粉末X線回折像で(020)反射の強度が異常

に強いことで、この異常はかんらん石の撰択方位配列による効果でなく、かんらん石の結晶構造の変化にその原因があると考え、Si-O結合距離がかなり短かい構造モデルを作り(020)反射強度を説明したことである。近年、かんらん石の結晶構造は種々の化学組成の結晶について精密に解析されたし (Birle *et al.*, 1968; Wenk and Raymond, 1973)、高温下や高圧下でも合成のフォルステライトの結晶構造解析が行なわれた (Hazen, 1979)。解析結果はKuroda and Shimoda (1967) や黒田 (1969) によって提案されたモデルの妥当性を否定しているように思える。しかし、一般に顕著なへき開や裂開を示さないかんらん石が3方向に見事な裂開を示し、異常に強い(020)反射を特徴とする粉末X線回折像を与えるなど未解決の問題が残されている。これらの問題を明らかにする目的で河守かんらん岩体の裂開の顕著なかんらん石について実験・考察したので報告する。

2. 実験と結果

実験にはKuroda and Shimoda (1967) による最も顕著な裂開を示すかんらん石の1つである河守超塩基性岩体からのかんらん石を使用した。顕微鏡下では3方向に明瞭な裂開がみられ、裂開面が湾曲したり、著しい波動消光を示す (Fig. 1 and Fig. 6)。試料は0.5mm (32メッシュ) から0.125mm (120メッシュ) までの粒径に統一し、重液により分離回収した。密度 $D=3.2\text{g/cm}^3$ 以上 (Specimen 1), $D=3.2\sim 3.0\text{g/cm}^3$ (Specimen 2), $D=$

* 大阪市立大学理学部地学教室

3.0~2.8 g/cm³ (Specimen 3) そして $D=2.8 \text{ g/cm}^3$ 以下 (Specimen 4) に4分した。この4つの試料について粉末X線実験を行なった。結果は Barg and Smith(1969) による計算値, 参考のため黒田 (1969) と ASTM, 7-74 のデータとともに表1にまとめて示した。表1から明らかなように試料1から3 (試料4は蛇紋石鉱物による反射が多く, かんらん石よりの反射は強度も弱く数も少なく信頼度が落ちるので表1よりはぶいた) まで, 蛇紋石鉱物の増加 (密度の減少) にはほぼ比例して (020) 面の相対的な反射強度が大きくなっている。全体の強度分布は試料1は ASTM, 7-74 と試料2は黒田 (1969) とほぼ一致している。

試料1及び2の中から裂開の顕著なかんらん石単結晶を選びプリセッション法で調べた。約20個の結晶について0層の $hk0$, $h0l$ と $0kl$ の内各2面を撮り, $hk0$ 面では (020) と (110), (120), (130), (210) 及び (140), $0kl$ 面では (020) と (021), (002) 及び (041) との強度比較を肉

Fig. 1. Microscopic photographs of thin sections of olivine from Komori mass. Single nicol. a) showing rectangular parting pattern in olivine heated at 700°C. b) showing partings filled with clinochrysotile(c) in olivine heated at 900°C. Each bar represents 100 μm in length.

Table 1. Calculated and observed relative intensities of x-ray powder diffractions of some olivines.

$h k l$	1 I(calc)	2 I(obs)	3 I(obs)	4 I(obs)	5 I(obs)	6 I(obs)
0 2 0	22	63	100	100	100	50
0 2 1	58	71	40	18	36	70
1 0 1	20	18	10	—	8	10
1 1 1	31	22	15	—	12	30
1 2 0						
1 2 1	7					10
0 0 2	16	22	14	7	15	10
1 3 0	71	84	41	37	57	60
1 3 1	77	100	46	40	62	70
1 1 2	100	98	35	25	54	100
2 0 0	2	4	—	—	—	5
0 4 1	12	18	16	18	9	20
2 1 0	10	4	8	10	4	10
1 2 2	41	43	24	11	20	40
1 4 0	32	55	24	25	20	30
2 1 1	17	12	7	10	8	10
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

1. Borg and Smith(1969), 2. Specimen 1(this study), 3. Specimen 2 (this study), 4. Specimen 3(this study), 5. Kuroda(1969), 6. ASTM, 7-74.

Fig. 2. Single crystal precession photographs of olivine with well-developed parting. a) $hk0$ reflections. b) $h0l$ reflections. Note streaking and splitting of spots of olivine and the axial relationships between olivine and clinochrysotile (c). Compare (020) reflection with (110), (120), (130), (210) and (140) reflections on the precession photograph a).

眼的に行なった。さらに裂開の顕著なかんらん石の各反射の間で相対強度における異常があるか検討するため、佐渡のピクライト中のかんらん石とハワイの玄武岩中のかんらん石の0層写真を撮り比較検討した。結果は粉末X線回折実験から期待される強度分布と違って、裂開の顕著なかんらん石の(020)反射の相対強度は佐渡やハワイのかんらん石の相対強度と違いはない。即ち、粉末回折線として観測される指数の面に対応する反射の中では強度の逆転はなく、普通のかんらん石と同じ強度分布を

持っている。裂開の顕著なかんらん石は顕微鏡下で波動消光として観察されるように、単結晶と言ってもごく狭い領域間でわずかな結晶軸のズレが存在し、プリセッション写真上では粉末回折線上に沿う回折斑点の分離や拡がりや常に観察される (Fig. 2)。これは結晶がいくつかのサブグレインより構成されており、このサブグレイン間でわずかな方位のズレが存在し互いに回転していると考えることができる。この回転軸はb軸の回りには実験した結晶の全てに見られ、c軸のまわりにもしばしば見られるがa軸を回転軸とすることはない。回転角度は結晶の大きさによって違うが最大でも8度程度である。

Fig. 3. Orientation relationships between olivine and clinochrysotile, shown in stereographic projection. (A) is the same with the dry orientation (Ball and Taylor, 1962). (B) has nearly the same with (123) orientation, a kind of dry orientation (Ball and Taylor, 1962).

裂開の顕著なかんらん石は蛇紋石鉱物を常に伴っている。これは Kuroda and Shimoda (1967) が指摘したへき開に沿ってフィルム状に存在する Fig. 1 に示す如き蛇紋石と一致する。実験結果では単斜クリソタイルである。この単斜クリソタイルはかんらん石と密接な軸関係を持って共存している (Fig. 2)。即ち、(1) $a_0//c_c$, $b_0//ac$, $c_0//bc$ と (2) $b_0//c_c$, $(010)_o//(001)_c$ である (Fig. 3)。Ball and Taylor (1962) によれば、(1) の軸関係は dry orientation に一致し、(2) の軸関係は (123) orientation に近い関係で、この (123) orientation も dry orientation の一種である。

光学顕微鏡下では波動消光として、単結晶X線写真上では反射の分離や拡がりとして観察される現象はそのほとんどが結晶内の転位と結び付けられて説明されている。Kohlstedt *et al.* (1976) によれば、かんらん石中の転位は空气中で加熱することによって容易に観察できる。加熱実験は空气中で 800°C 1時間加熱後光学顕微鏡下で観察した。転位線は一般的に直線性がよく裂開にはほぼ平

Fig. 4. Dislocation structures of olivine with well developed parting from Komori. a) cellular structure of olivine with high dislocation density. b) typical cellular structure on (100). c) cellular structure on (010) of olivine with high dislocation density. d) cellular structure on (001). Each bar represents 10 μm in length.

行ないし垂直に配列している場合が多く、この配列する面は (100), (010) 及び (001) で典型的なセル構造を示す (Fig. 4)。転位密度は $1 \times 10^7 - 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ で場所によって変化が著しい。

3. 考 察

Kuroda and Shjmoda (1967), 黒田 (1969) は (020) 反射の強度異常をいろいろな方法でしらべたが、撰択方位配列とみなせる証拠が見い出せず、その異常を結晶構造の変化に求め、Si-O 結合の性質 (イオン性から共有性) の変化による Si-O 結合距離の短縮を考えた。しかし、Hazen (1979) は高压下での合成フォルステライト

(Mg_2SiO_4) の構造を調べ、圧力の上昇とともに SiO_4 4 面体は変形するが平均の Si-O 距離は高压下でも変化しないこと、圧力を取り去った後では元の構造に復元していることを示した。この実験結果からすれば、天然で高压下の結晶構造の状態が凍結されたまま見出されることはないと思う。

粉末 X 線回折実験の結果を見ると単斜クリソタイルの増加と (020) 反射強度の増加には正の相関が見られ、(020) 反射強度の異常が撰択方位配列による効果であることを示差している。そこで Specimen 1 と黒田 (1969) 及び ASTM, 7-74 のデータを (112) 反射強度を 100 とし、各反射強度を再計算し、Borg and Smith (1969) の I(c)

Table 2. Intensity ratio of observed values to calculated ones of the same crystallographic planes.

h k	1	2		3		4	
	I(c)	I(o)*	I(o)/I(c)	I(o)*	I(o)/I(c)	I(o)*	I(o)/I(c)
0 2 0	22	64	2.8	185	8.4	50	2.3
0 2 1	58	72	1.2	67	1.1	70	1.2
1 0 1	20	18	0.9	15	0.7	10	0.5
1 1 1	31	22	0.7	22	0.7	30	1.0
1 2 0							
1 2 1							
1 2 1	7	22	0.9	28	1.2	10	1.4
0 0 2	16					10	0.6
1 3 0	71	86	1.2	105	1.5	60	0.8
1 3 1	77	102	1.3	115	1.5	70	0.9
1 1 2	100	100	1.0	100	1.0	100	1.0
2 0 0	2	4	2.0	—	—	5	2.5
0 4 1	12	18	1.5	17	1.4	20	1.7
2 1 0	10	4	0.4	7	0.7	10	1.0
1 2 2	41	44	1.1	37	0.9	40	1.0
1 4 0	32	56	1.8	37	1.2	30	0.9
2 1 1	17	12	0.7	15	0.9	10	0.6
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.

1. Borg and Smith(1969), 2. Specimen 1(this study), 3. Kuroda(1969), 4. ASTM, 7-74.

* I(o) values are recalculated values of I(o) in Table 1 on the basis of the relative intensity of 112 reflection = 100.

Fig. 5. (A) The poles of (hkl) planes of olivine, shown in stereographic projection. (B), (C) and (D) are the plots of I(obs)/I(calc) values. (B) This study. (C) Kuroda (1969) (D) ASTM, 7-74. —; data are not given. Shaded areas are I (obs)/I(calc) > 1. The areas with > 1 are around (010) in all cases.

との相対値 $I(o)/I(c)$ を計算した (Table 2)。かんらん石のいくつかの (hkl) 面の極をステレオネットに投影し、3つの試料の相対強度値を入ると図5が得られる。図5より明らかなように、いずれの試料についても (010) 面との傾きが小さい面の相対強度値が1より大きい。さらに (100) や (001) にも1より大きい領域が認められる。これはまさに (020) の強度異常が撰択方位配列によっていることを示す証拠である。Kuroba and Shimoda (1967) は、もし (020) の強度異常が撰択方位配列によっているとすれば (040) や (060) の回折ピークが粉末回折像中に見い出せると考えたが、図2aや Borg and Smith (1969) の結果から明らかなように、(040) や (060) の強度は組成依存性が強く $Fo_{30} Fa_{10}$ 程度のかんらん石では単結晶法でさえ観測されない程度の強度で粉末法ではいくらか撰択方位配列しても観測されないと考えられる。

単結晶法では先に述べたように結晶内のいくつかの領域で互いに回転しているため回折線が粉末線に沿って分離したり伸びたりしている。このためにピーク強度の比較を不正確にしているが、比較した反射はいずれも比較的低角の反射で、先に述べた強度分布が変化すると考えることはない。

空气中 800°C 加熱後の試料の顕微鏡観察結果では、裂開の顕著なかんらん石中に (100), (010) 及び (001) といった簡単な指数面上に転位が配列していることが明らかになった。このような指数面上に転位が配列することは Buiskool and Boland (1976) や Toriumi (1979) によって見い出された結果と一致する。Toriumi (1979) によれば、(100) と (001) 面では小傾角境界を、そして (010) 面では回転境界を形成しているという。Buiskool and Boland (1976) は多数の天然のかんらん石を電子顕微鏡でしらべ、バーガースペクトルは [100] を主とし、他に [001] が存在することを見い出している。これらの結果を組み合わせると、単結晶法で見い出されたb及びc軸を回転軸とするサブグレイン相互間の回転を非常によく説明できる。またすべての結晶に見い出されたb軸回転は Challis (1967) の結果と一致する。

裂開の起る原因は、それほど簡単ではないかもしれないが、(100), (010), (001) 面上に配列した転位と密接に関係していると考えられる。(010) 面は結晶構造に由来する弱い面でもあるが、一般には完全なへき開を示さない。“cleavable olivine” と呼ばれるかんらん石の (010) 面の完全なへき開はむしろ転位の配列の効果が大きくきいていると考え、(010) も裂開である。転位の配列した面は他に比べて熱力学的に不安定な領域で、しかも機械的な力に対してすべりやすい面となったであろう。この意味で、転位の配列する面は力学的にも熱水変質に

Fig. 6. Microscopic photographs of thin sections showing the relation among olivine, clinochrysotile, parting and irregular cracks. a) Clinochrysotile (C) filled in irregular cracks is discontinued by partings of olivine. b) showing bend partings along grain boundary or irregular cracks. Each bar represents 50 μm in length.

対しても弱い面であると考えることができる。即ち、“へき開”と考えられた面は転位の配列した弱い面であり、本来の意味でのへき開でなく“裂開”である。

この見事な裂開はどの時点で形成されたのであろうか？薄片の顕微鏡観察の結果は、1)、不規則な割れ目を満す単斜クリソタイルは裂開を越えて生成していない (Fig. 6a), 2)、不規則な割れ目が集中的に変質されており、なおかつこの不規則な割れ目は裂開面を湾曲させたり、みだれを生じさせている (Fig. 6b), 3)、裂開に沿うフィルム状の単斜クリソタイルとかんらん石は一定の軸関係を保持している。以上の観察結果から、変質作用によって転位の配列面が撰択的に変質されて裂開が形成されたと考えるより、裂開も不規則な割れ目も変質作用以前に形成されていたと考えるほうが1)と2)の結果を合

理的に説明できる。即ち、裂開は何らかの構造運動に関連した転位の配列面のすべりによって形成されたと判断される。なお変質作用はかんらん石と単斜クリソタイルの軸関係から判断すると、比較的低温高温で水蒸気圧の低い条件下で起ったと考えられ (Ball and Taylor, 1962), 超塩基性岩体より後で貫入したと言われている花崗岩体の貫入と関係があるかもしれない。

4. 結論及び問題点

本研究での結論としては、2つの問題について明確な結果が得られたことであるが、それと同時にいくつかの問題点も明らかになった。

1) 裂開の顕著なかんらん石も従来解析された結晶構造と違いはない。(020) 反射の強度異常は撰択方位配列にその原因がある。

2) 裂開の原因は (100), (010) 及び (001) 面上での転位の配列による結果で、それらの面は機械的な力に対してすべりやすく、弱い面となったことによっている。

以上2つの結論に対して今後研究すべき問題として、

1) 熊澤・床次 (1979) は (020) 反射の強度がかんらん石結晶中の陽イオン分布の変化によって大きく変化することを示し、裂開の顕著なかんらん石では従来見い出されているかんらん石の陽イオン分布に比べてより秩序している可能性を報告している。この意味では是非とも裂開の顕著なかんらん石の結晶構造解析を精密にやる必要がある。

2) 転位に関しては、電子顕微鏡によって、より詳細な転位構造や転位密度についてサブグレイン境界やサブグレイン内で調べる必要がある。

3) 裂開を転位の配列によって説明したけれども、この裂開を形成した場の物理化学的条件を明らかにする必要がある。これは岩体の貫入機構や岩体が受けた応力の解析に重要な意味を持つように思える。

謝 辞

研究を進めるにあたり、終始変らぬ激励を賜った大阪市立大学理学地学教室中村威教授・鶴巻道二助教授に感謝する。本論文作成にあたり内容的な討論に適切なご教示とご助言を賜った大阪大学床次正安助教授に謝意を捧げる。適切なご教示とご助言を賜った大阪大学小藤吉郎博士に感謝する。また、研究費の一部に文部省科学研究費を用いた。ここに当局に対し、感謝する。

引用文献

- ASTM card 7-74, Forsterite (olivine) $2(\text{Mg}_{0.98}\text{Fe}_{0.02})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$.
Ball, M.C. and Taylor, H.F.W. (1962), The dehydration of chrysotile in air and under

- hydrothermal conditions. *Min. Mag.*, **31**, 467-482.
Birtle, J.D., Gibbs, G.V., Moore, P.B. and Smith, J.V. (1969), Crystal structures of natural olivines. *Amer. Mineral.*, **53**, 807-824.
Borg, I.J. and Smith, D.K. (1969), Calculated x-ray powder patterns for silicate minerals. *Geol. Soc. Amer., Memoir* **122**, 1-896.
Buiskool, J.M.A. and Boland, J.N. (1976), Several types of natural deformation in olivine, an electron microscope study. *Tectonophysics*, **32**, 209-233.
Charris, G.A. (1967), X-ray study of deformation lamellae in olivines of ultramafic rocks. *Min. Mag.*, **36**, 195-203.
Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1962), Rock-forming minerals. Vol. 1, Longmans, 1-333.
Hawkes, H.E. (1946), Olivine from northern California showing perfect cleavages. *Amer. Mineral.*, **37**, 276-286.
Hazen, H.E. (1976), Effects of temperature and pressure on the crystal structure of forsterite. *Amer. Mineral.*, **61**, 1280-1293.
Kohlstedt, D.L., Goetze, C., Durham, W.B. and Vander Sande, J.B. (1976), A new technique for decorating dislocations in olivine. *Science*, **191**, 1045-1046.
熊澤峰夫・床次正安 (1979) 上部マントルにおけるオーダードオリビンの可能性 (演旨). 三鉱学会 54 年秋期講演要旨集, 44.
Kuroda, Y. and Shimoda, S. (1967), Olivine with well-developed cleavages - its geological and mineralogical meanings. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **73**, 377-388.
黒田吉益 (1969), かんらん石の構造と化学結合. 岩鉱学会誌, **73**, 377-388.
松久幸敬 (1968), 長野県八方屋根地域の超塩基性岩体. 岩鉱学会誌, **59**, 195-205.
Toriumi, M. and Karato, S. (1978), Experimental studies on the recovery process of deformed olivines and the mechanical state of the upper mantle. *Tectonophysics*, **49**, 79-95.
Toriumi, M. (1978), Dislocation structure of olivine in the Mt. Higashi-Akaishi dunite mass in the Sambagawa metamorphic terrane of Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **84**, 299-308.
Velinsky, V.V. and Pinus, G.V. (1969), Olivines with perfect cleavages in ultrabasites of Chukotok. *Doklady, AN USSR*, **185**, 890-892. (in Russian, cited from Kuroda, 1969)
Wenk, H.R. and Raymond, K.N. (1973), Four new structure refinements of olivine. *Zeit. Krist.*, **137**, 86-105.
Winchell, A.N. and Winchell, H. (1951), Elements of optical mineralogy, Part II. John Wiley. 1-551.