

地質学論集 第47号 163-171ページ, 1997年1月
Mem. Geol. Soc. Japan, No. 47, p.163-171, January 1997

幌満かんらん岩中の輝石スピネルシンプレクタイトの微細構造と その生成過程について

The microstructure of pyroxene-spinel symplectite from the Horoman peridotite
and its formation processes

小畑 正明*
 森下 律生**
 田中久美子

Masaaki Obata *
Ritsuo Morishita **
Kumiko Tanaka

1996年1月31日受付.
 1996年6月5日受理.

* 熊本大学理学部地球科学科.
 Department of Earth Sciences, Kumamoto
 University, Kumamoto 860, Japan

** 熊本大学大学院自然科学研究科.
 Graduate School of Science and Techno-
 logy, Kumamoto University, Kumamoto 860,
 Japan

Abstract

Microstructure of the pyroxene-spinel symplectite from the Horoman peridotite, Hokkaido, Japan, was studied by means of digital image analysis and statistical method. The symplectite consists of Cpx, Opx and spinel and typically occurs in spinel lherzolites. Although mineral and bulk chemical compositions of the symplectite are rather constant among studied samples, their texture is variable in terms of grain size, grain shape and spatial correlations among minerals. An attempt was made to quantitatively describe these textural features by means of measuring spatial correlations among minerals on digital images using a microcomputer by the method of Morishita and Obata (1995). Examination of the bulk composition of symplectite reveals that their composition is well expressed in terms of mixtures of pyrope garnet and forsterite, implying that the symplectite formation was a subsolidus phenomenon. Based on the scale parameters defined from the spatial correlations, a model of structural evolution was proposed to explain the observed structural complexity and variability. The primary garnet first transforms to a single phase, highly-aluminous pyroxene, which is thermodynamically metastable. Subsequently this aluminous pyroxene starts to be decomposed into two-phase mixtures of Ca-rich and Ca-poor pyroxenes. This is supposed to be a spinodal decomposition and, therefore, the pyroxene domain structure continues to grow as time goes. Al-Cr spinel starts to nucleate preferentially on the grain boundaries between the two pyroxenes and rapidly grow along the grain boundaries. The excess Al and Cr that were dissolved in the pyroxenes react with the forsterite component supplied by diffusion from the surroundings to form the Al-Cr spinel. Since the appearance of the spinel and the establishment of phase equilibrium in spinel lherzolite facies, the texture continues to evolve. The pyroxene domain structure continues to grow, while spinel grains increase their sphericity to minimize the surface energy without much changing their positions, resulting in gradual loss of spatial correlations between the spinel and the two-pyroxene grain boundaries. The proposed evolutionary scheme well explains the textural diversity observed among the Horoman symplectites.

Key words : symplectite, texture, image analysis, Horoman peridotite, spinodal

はじめに

北海道日高帯の幌満かんらん岩の特定の層準には単斜輝石（以下 CPX と略す）、斜方輝石（OPX）とスピネル（SP）からなる細粒蠕虫状の鉱物集合体—輝石スピネルシンプレクタイト（symplectite）が産することは古くから知られており、これまで数多くの研究がなされてきた（Nagasaki, 1966 ; Kushiro and Yoder, 1966 ; Tazaki et al., 1972 ; 森・小

白井, 1984 ; Takahashi and Arai, 1989 ; 森下ほか, 1995）。シンプレクタイトが多くの研究者の注目を引いてきたのはその奇妙な形態もさることながら、それがもとざくろ石の存在を示唆するからである。幌満かんらん岩は現在は低圧の斜長石レルズライト相で再結晶してしまっており、高圧鉱物であるざくろ石（パイロープ）はどこにも見られないが、岩石学的、地球化学的な分析と議論から、もとは上部マントル深部に起源をもち、かつてはざくろ石レルズライト相にあったこ

表1. シンプレクタイトを含むかんらん岩のモード組成.

	HR9003	HP-7	HR9006	HP-9
Ol	76	71	77	77
Opx	22	22	19	17
Cpx	2	5	4	6
Spinel	0.5	1.1	0.4	0.4
Amp	0	0.2	0	0
Serp	0	0.6	0	0
Cr#	0.16	0.14	0.14	0.13
Fo%	91.0	91.3	90.8	90.7

Cr# = Cr/(Cr+Al), Amp = 角閃石, Serp = 蛇紋石

モードは薄片上で3000点以上のポイントカウントによって求めた.

表2. シンプレクタイトのモード組成. 図2のデジタル画像より求めた.

Sample	HR9003	HP-7	HR9006	HP-9
Opx	49.7	57.2	51.1	54.4
Cpx	26.6	21.5	23.8	24.3
Spinel	23.7	21.3	25.0	21.3
	100.0	100.0	99.9	100.0

モードはデジタル画像上で面積計算により求めた.

とが示唆されており (Takazawa et al, 1996), シンプレクタイトの成因はかんらん岩の熱史を考える上に重要な制約条件となる (例えば Ozawa and Takahashi, 1995).

これまでの研究は, 総じて鉱物組成, 化学組成に関するものが主流であり, 議論もそれにもとづく相平衡論的研究が多かった. ざくろ石の存在が正しいとしても均一なざくろ石結晶からどのような過程をへてこのような複雑な形態を示す鉱物集合体に変化してゆくのか, その過程を正面からとりあげた研究はこれまであまりなかった. その中で森下ほか (1995) の組織の変化を追った研究は注目される. シンプレクタイトの形成がサブソリダスで起こったとする従来の見解に対し Takahashi and Arai (1989), 森下ほか (1995) は主として化学組成の検討からシンプレクタイトの形成にはメルトの形成と抽出が様々な程度に関与したと結論している.

我々は独自に幌満のシンプレクタイトの組織の再検討を行う過程で, 従来明確に指摘されてこなかった興味深い事実気づいた. それは鉱物, 化学組成の変化にくらべてシンプレクタイトの内部構造の変化が多様であるということである. 従来の組織の観察と記述は定性的なものが多かったが, 組織の多様性を客観的に記述するためには組織の定量化の工夫がどうしても必要である. 本研究ではマイクロコンピュータを用いたデジタル画像処理により, デジタル画像データの統計処理をおこない, 鉱物の空間配列構造を定量的に記述することに成功した. その結果シンプレクタイト形成過程を議論するうえで重要と思われるいくつかのスケールパラメータを抽出する事に成功した. この新しい組織観察の結果と化学組成的データを考慮して, ざくろ石を起源とするシンプレクタイトの形成過程に関する一つのモデルを作成した. モデルには現段階でまだ多分に仮説的な要素が強いが, 議論の材料となる一試案としてここに提示する.

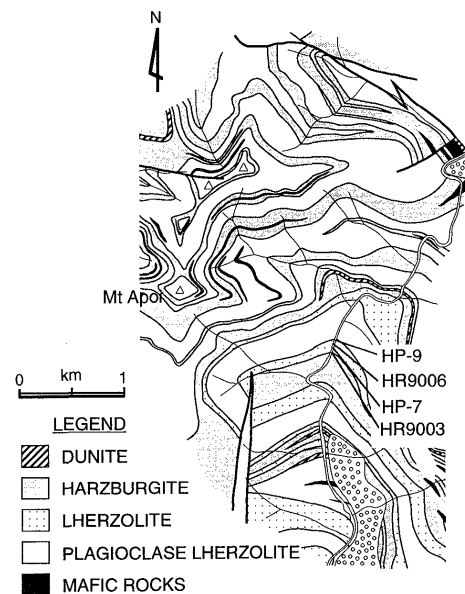


図1. サンプル採取位置. 地質図は Takazawa et al. (1992) による. サンプルの対象としたレルゾライト層は岩体下部に位置し, Takahashi (1989) の “MHL suite” に属する.

サンプルと岩石記載, シンプレクタイトの微細構造

幌満岩体のシンプレクタイトは鉱物組み合わせと組織により2種類に分けることが出来る. すなわちスピネル, 斜方輝石, 単斜輝石からなるものと, 斜長石, かんらん石, スピネルと少量の斜方輝石からなるものである. 後者のシンプレクタイトは斜長石レルゾライトとスピネルレルゾライトの境界付近に限って産し, 前者のシンプレクタイトから再結晶作用によって派生したものとされている (森下ほか, 1995). 本研究では前者のタイプのみを研究対象とした.

サンプルは幌満川沿いの単一のスピネルレルゾライト層から採取した4個のかんらん岩中のシンプレクタイトを用いた (図1). 表1にこれら岩石のモード組成と岩石の枯渇度のインディケータとしてスピネルの Cr# (=Cr/(Cr+Al) 原子比), かんらん石の Fo 値を示す. Takahashi and Arai (1989) によると本岩体ではシンプレクタイトを含むサンプル中のスピネルの Cr# は0.15~0.34の範囲にあるが, 本研究で用いたサンプルは Cr# が低い方にはいる. モード的にはこれら4つのサンプルとも単斜輝石の量は多くなくハルツバージャイトに近い. 岩石は全てボーフィリティックな組織を示し, 変形が著しく, スピネル粒子の配列と輝石結晶の伸びによる葉理が発達する. 個々のシンプレクタイトは同種の鉱物からなる細粒鉱物集合体とりまかれており, 葉理を形成するスピネル粒子配列に連なっていることはこれまで記載されているとおりである (Takahashi and Arai, 1989; 森下ほか, 1995). シンプレクタイトの観察はなるべく大きな個体で透過光で内部構造がなるべくシャープに見えるもの, すなわち結晶境界面が薄片面に垂直に近いものを選んで行った. 図2に代表的なシンプレクタイトの組織を示す. これは反射電子線像の写真 이미지를スキャナーでパーソナルコンピュータに読みと

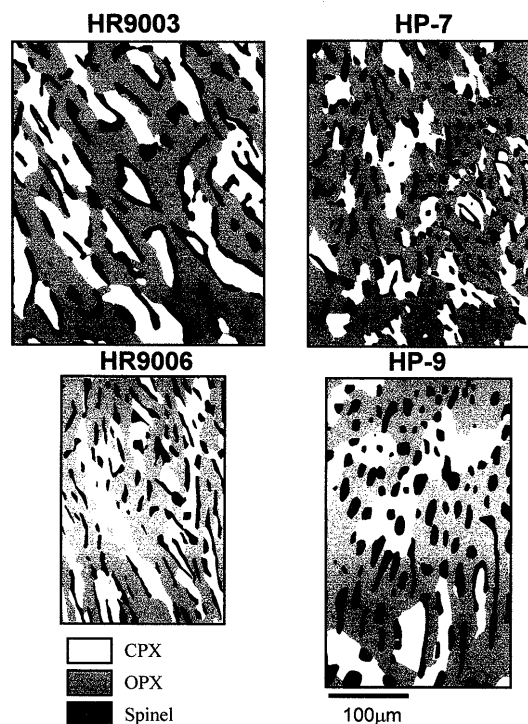


図2. シンプレクタイトの組織のデジタル画像

り、画像処理をほどこしたものである。このデジタル画像から得たシンプレクタイトのモード組成を表2に示す。モードは多少の変動はあるものの岩石の違いにかかわらず、ほぼ一定になっていることに注目されたい。モード組成が比較的一定であるのに対して、これら4個のサンプルの間で、シンプレクタイトの構造の形態、鉱物粒子サイズ、構造の空間スケールに有為なバリエーションがみられる。例えば、スピネルの粒子サイズはHR9006, HP-7において最も小さく、HR9003, HP-9では比較的大きい(図2)。しかしあとの2者ではスピネル粒子の形状が全く異なる。すなわち、HR9003ではスピネル粒子は紐状あるいは蠕虫状で、不規則な形をしているのに対して、HP-9においてはスピネル粒子は比較的丸いシンプルな形をしたものが多い。さらにHR9003においてはスピネルはCPX領域を取り囲むように存在する傾向が認められるのに対して、HP-9ではスピネル粒子はCPX-OPX結晶粒界の位置とは無関係に分布しているように見える。またCPX-OPXのドメイン構造のスケールは図2を見るだけでもHP-9が4個のサンプルの間では最大で、HR9003がそれに続くことがわかる。このことは後に統計的手法の導入により確認されることになる。鉱物の形状の解釈にあたってはこれらのイメージは3次元立体の2次元断面であることを考慮に入れておかなければいけない。例えばスピネル粒子がロッド状であればセクションの方向によって、棒状になったり丸くみえたりするであろう。また構造の異方性の程度も3次元構造が一定であっても切り口の方向によっては見かけの異方性は様々に表れうる。しかしHR9003にみられるスピネル粒子の複雑な形状やCPXとの緊密なアソシエーションはこのサンプル固有のものと考えてよいであろう。構造の複雑さや上に述べたいわゆるステレオロジーの問題にからむ不確定性を考

慮すると、これ以上の議論は統計的手法を用いてより定量的なデータにもとづいて行わなければならない。

組織の定量的解析

1. 原理

鉱物の空間相関を計測する方法はMorishita and Obata (1995), 森下・小畑 (1995) に従った。以下にその方法を簡単に述べる。

岩石組織上で距離 D 離れた2点をランダムに選んだとき、この2点とも同種鉱物 i の結晶領域内に存在する確率は

$$P_{ii}(\mathbf{r}) = \langle \phi_i(\mathbf{x}) \phi_i(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \rangle \quad (1)$$

2点上に異種鉱物 i, j が存在する確率は

$$P_{ij}(\mathbf{r}) = \langle \phi_i(\mathbf{x}) \phi_j(\mathbf{x} + \mathbf{r}) + \phi_j(\mathbf{x}) \phi_i(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \rangle \quad (2)$$

であらわされる。ここで、 \mathbf{x}, \mathbf{r} はベクトルで、距離 D はベクトル \mathbf{r} の長さ、 $|\mathbf{r}|$ であるとする。また $\phi_i(\mathbf{x})$ は位置 \mathbf{x} に鉱物種 i があるときは1、それ以外の場合は0の値をとる2値関数である。 $\langle \rangle$ は空間平均操作をあらわす。すべての可能な事象の確率の総和は1であるから、

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}(\mathbf{r}) = 1 \quad (i \leq j) \quad (3)$$

が成り立つ。

つぎにこれらの確率関数を次のように鉱物のモード(体積分率)で規格化を行う。

$$\sigma_i(\mathbf{r}) = \frac{P_{ii}(\mathbf{r}) - F_i^2}{F_i - F_i^2} \quad (4)$$

$$\tau_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{P_{ij}(\mathbf{r})}{2F_i F_j} \quad (5)$$

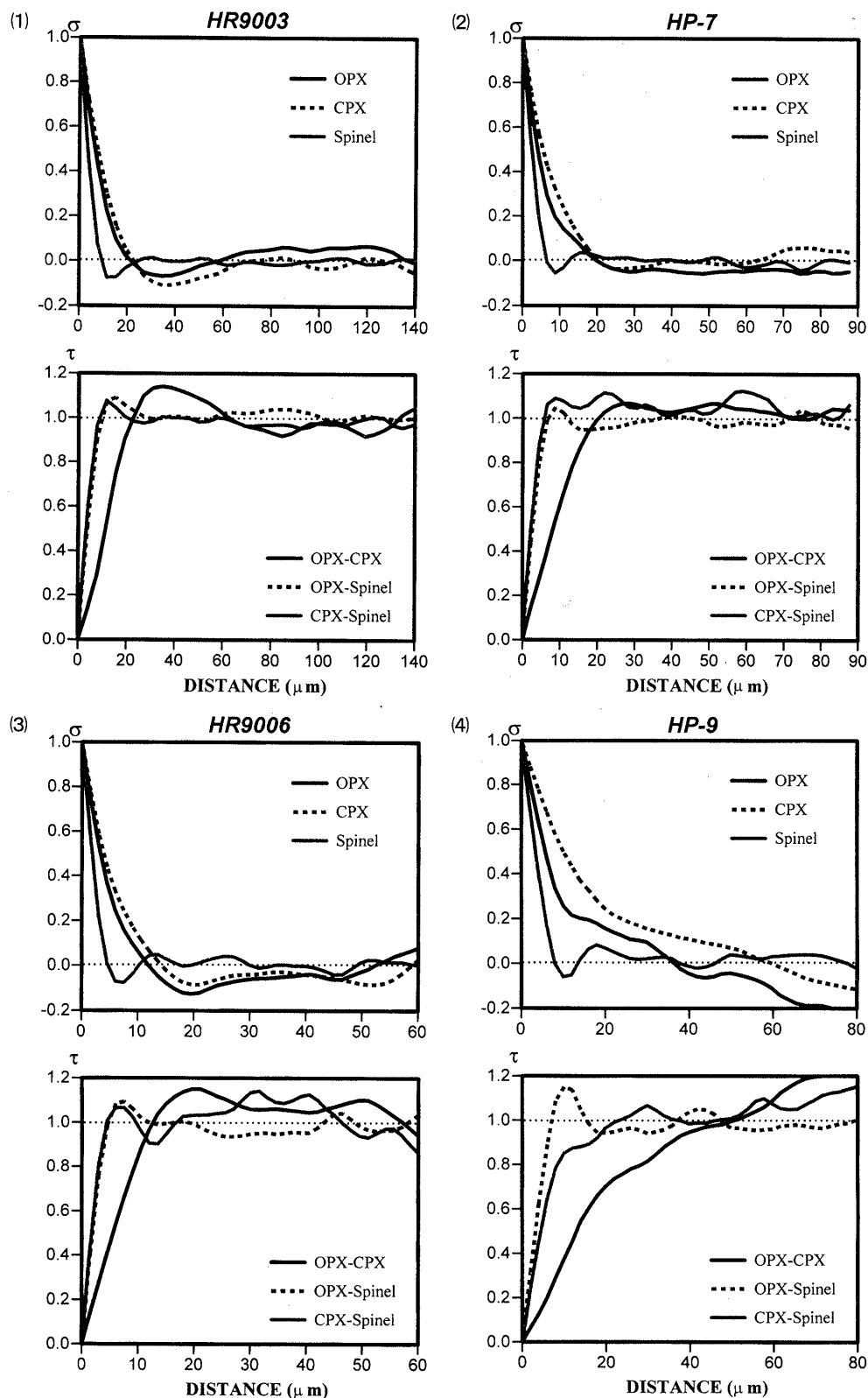
ここで、 $F_i = \langle \phi_i \rangle$, $0 < F_i < 1$ であることに注意。

σ_i は同一鉱物の空間相関を表す関数であり、 τ_{ij} は異種鉱物間の空間相関関数で両者ともベクトル \mathbf{r} すなわち距離 D と方位の関数である。モードで規格化されているので σ_i 値は $D=0$ では1、 $D \rightarrow \infty$ では0に収束する。 τ_{ij} は $D=0$ で0、 $D \rightarrow \infty$ で1に収束する。鉱物の配列が全くランダムであり、空間相関がなければこれらの関数値は D の増加と共にそれぞれ単調に増加、および減少するのみであるが、鉱物の配列に周期性やその他の規則性や空間相関が強くなってくると途中で極小や極大を示したり、場合によっては周期的振る舞いを示すようになる。したがって、 σ, τ 分布を求めることによって鉱物粒子配列のランダムネス、周期構造、異種鉱物相互の関係、空間構造のスケール等を計測する事ができる。

一般に n 種鉱物からなる岩石について n 個の σ 関数, $n(n-1)/2$ 個の τ 関数が定義できる。最も簡単な場合として、2種の鉱物からなるものについては $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ の3つの関数が定義できるのみであるが、これら3つの間には次のような簡単な関係があって、3者は独立ではない。すなわち、

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 1 - \tau_{12} \quad (6)$$

の関係が任意の距離 D に対して常に成立する。鉱物が3種以上になると、自由度がふえて、より多くの独立変数が得られるようになり、これらの分布関数から、より多くの情報が得られるようになる。

図3. シンプレクタイトの σ 分布 (上段) と τ 分布 (下段)

2. 測定法と測定結果

実際の測定は岩石組織をコンピュータのなかにデジタル画像としてとりこむ。適切な画像処理をほどこした後、ピクセルを数え上げることで鉱物モードとそれぞれの確率を算出

した。2点の組み合わせを数えるときは方位を指定しておこない、 σ , τ とも2点間の距離と方位の関数として求めた。

図3に4個のサンプルのシンプレクタイト組織のデジタル画像から得られた σ 分布, τ 分布を示す。シンプレクタイ

表3. σ 分布, τ 分布から得られた種々の特徴的長さ. 単位は全て μ .

HR9003	1/傾斜	第一極小位置	第一波長	HR9003	1/傾斜	第一極小位置	第一波長
σ -Spinel	8.3	13.5	30.8	τ -Sp-Opx	8.5	15.4	31.8
σ -Opx	14.9	34.6	84.7	τ -Sp-Cpx	8.0	11.5	26.9
σ -Cpx	16.6	36.6	84.7	τ -Opx-Cpx	22.9	34.6	84.7

HP-7	1/傾斜	第一極小位置	第一波長	HP-7	1/傾斜	第一極小位置	第一波長
σ -Spinel	5.4	8.8	16.4	τ -Sp-Opx	5.5	8.8	16.4
σ -Opx	9.3	29.6	36.1	τ -Sp-Cpx	5.0	8.8	15.3
σ -Cpx	11.5	26.3	39.4	τ -Opx-Cpx	16.5	28.5	39.4

HR9006	1/傾斜	第一極小位置	第一波長	HR9006	1/傾斜	第一極小位置	第一波長
σ -Spinel	3.9	6.8	13.5	τ -Sp-Opx	3.9	7.5	13.5
σ -Opx	7.1	19.5	30	τ -Sp-Cpx	3.7	6.8	12.8
σ -Cpx	8.4	20.3	35.3	τ -Opx-Cpx	5.6	20.3	35.3

HP-9	1/傾斜	第一極小位置	第一波長	HP-9	1/傾斜	第一極小位置	第一波長
σ -Spinel	7.2	9.9	17.9	τ -Sp-Opx	6.7	9.9	18.9
σ -Opx	11.4	>70	>100	τ -Sp-Cpx	9.3	?	?
σ -Cpx	18.9	>70	>100	τ -Opx-Cpx	27.1	>70	>100

トの組織画像には多かれ少なかれ異方性があるので、計測は見かけの伸長方向に直角方向に行った。これは3次元的に伸長がある構造については、任意の断面においては、見かけの伸長の程度は断面の方向に依存するのに対し、伸長方向に直角な方向のスケールは断面によらないサンプル固有のものに近いと判断されるからである。4サンプルに共通して見られる特徴は、 σ (SP) 値は D の増加とともに1から急激に下がり、10~15 μ あたりで極小になり、再び増加して減少するという緩やかな脈動的なふるまいを示すことである。それに対して、CPX と OPX については σ 値はより緩やかに減少し HR9003, HP-7, HR9006 では20~30 μ あたりで極小を示したのち緩やかな脈動を示す。HP-9 ではだんだんと下がって行って、極小は認められない。CPX-OPX 対の τ は前の3サンプルでは比較的緩やかに増加して行き、のち緩やかな脈動を示すのに対して、HP-9 ではやはりだんだんと増加するのみで、極値を示さない。ここで σ (CPX) と σ (OPX) は互いにふるまいが似ており、 τ (CPX-OPX) 分布は前2者を上下反転したかたちに似ていることに注目されたい。これらのパラメータのふるまいの親近性はスピネルのモードが比較的小さいことに起因するものと思われる。すなわち、スピネルの量が少なく、シンプレクタイトが CPX と OPX の2鉱物系で近似できるとすると、上に述べたように ((6)式), σ (CPX) \approx σ (OPX) \approx $1-\tau$ (CPX-OPX) という近似が成り立つことになる。

HR9003, HP-7, HR9006 については OPX-SP と CPX-SP の τ 値は急激に増加し5~10 μ 付近で明瞭な極大を示し、以後緩やかな脈動を示す。しかし HP-9 では OPX-SP は同様なふるまいを示すが、CPX-SP については緩やかな脈動的ふるまいは認められるものの明瞭なピークは認められない。 τ 値にピークがあるということはその長さ付近で2種鉱物の対を見つける確率が高いということである。そこでこの τ の極大値を与える長さを当該2鉱物の‘平均距離’ということが出来る。 σ 値についても τ 値についても脈動があるということは緩やか

な周期構造があることを意味する。そこでこの波長を測ることにより、組織に含まれる周期構造を定量的に記述できる。一方 σ 値の $D=0$ 付近の傾斜の逆数は当該鉱物の平均粒径にほぼ比例することが理論的考察からわかっている (Mori-shita, 1996)。以上のことによりこれら σ 分布, τ 分布のグラフからそれぞれのシンプレクタイト組織に関する有用ないくつかのスケールパラメータを抽出することができる。表3に各サンプルの全ての σ 分布, τ 分布から得られたこれらのスケールパラメータ、傾斜の逆数、第一の極小位置、第一の波長を、求められるものについてはすべて求めてリストアップした。HP-9 で極小や波長が定義できないのは構造のスケールにくらべて測定領域が小さいためであろう。しかしこのシンプレクタイトはサイズが小さく、これ以上の範囲をとることはできなかった。そこでこのサンプルに関しては極小値、第一波長値はそれぞれ探索した組織領域のサイズ、70 μ , 100 μ よりも大きいであろうと結論した。

シンプレクタイトの平均化学組成とその検討

シンプレクタイトの平均化学組成を構成鉱物の EPMA 分析とモード組成から鉱物の比重を考慮して計算で求めた (表4の‘S’). 計算に用いた構成鉱物の EPMA 分析値は付録に示した。計算で得られた組成は今まで指摘されているように天然のざくろ石の組成に似ているが、ざくろ石組成そのものではない。そこでこの組成からかんらん石組成を適度に差し引いてよりざくろ石らしい組成値に近づけることができる。表で‘G’はこのようにしてざくろ石構造式に最もよく合うように求めたモデルざくろ石の組成である。この計算はシンプレクタイトの生成反応が



(Kushiro and Yoder, 1966) であるという考えに基づいている。() のなかの数値は差し引いたかんらん石成分の重

表4. シンプレクタイトの平均化学組成 (S) とそれをもとに復元したモデルざくろ石の組成 (G). シンプレクタイトの平均組成からかんらん石成分を最良のざくろ石構造式が得られるよう差し引いて得たもの. Gのあとの () 中の数値は差し引いたかんらん石成分の重量%.

	HR9003		HP-7		HR9006		HP-9	
	S	G(24.2)	S	G(22.3)	S	G(23.0)	S	G(22.8)
SiO ₂	40.40	40.24	42.18	42.59	41.64	41.55	41.90	42.21
TiO ₂	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	17.81	23.49	15.85	20.39	17.34	22.51	16.39	21.23
Cr ₂ O ₃	3.58	4.73	3.27	4.20	2.98	3.87	3.02	3.92
FeO	6.00	5.09	6.28	5.61	5.98	5.11	6.01	5.08
MnO	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03
MgO	25.91	18.17	27.40	20.76	26.40	19.65	26.99	20.23
CaO	6.14	8.09	4.88	6.28	5.50	7.13	5.54	7.18
Na ₂ O	0.10	0.13	0.08	0.10	0.10	0.13	0.08	0.10
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
O=	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.906	2.878	3.014	3.024	2.971	2.945	2.997	2.998
Ti	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.508	1.989	1.342	1.726	1.468	1.907	1.385	1.794
Cr	0.204	0.268	0.186	0.239	0.169	0.220	0.171	0.222
Fe	0.361	0.304	0.376	0.333	0.360	0.306	0.360	0.301
Mn	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002
Mg	2.782	1.926	2.924	2.184	2.828	2.082	2.881	2.123
Ca	0.466	0.614	0.369	0.475	0.403	0.522	0.421	0.546
Na	0.013	0.017	0.011	0.014	0.013	0.017	0.011	0.014
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	8.244	8.001	8.227	8.000	8.217	8.001	8.230	8.001
Mg/(Mg+Fe)	0.89	0.88	0.886	0.878	0.887	0.881	0.89	0.88
Cr/(Cr+Al)	0.12	0.16	0.121	0.156	0.103	0.134	0.11	0.14

量%, すなわち, 100グラムのシンプレクタイトからこの数値グラムのかんらん石成分を差し引くことを示す. かんらん石の組成はシンプレクタイトの外側の実際のかんらん石のEPMA分析値を用いた. このようにして求めたモデルざくろ石の組成は, 若干Cr, Ca量が高いものの十分天然をシミュレートしていると判断される. このように求めたモデルざくろ石のCr含有量は斜長石レゾライト層にちかいサンプルよりもハルツパーザイト層に近いサンプル方が若干高くなっており全岩化学組成の変化と調和的である. Takahashi and Arai (1989) はシンプレクタイトの平均化学組成のあるものは天然のざくろ石組成とかんらん石組成を結んだ線よりもSiO₂に富む方向に有意にずれているものがあることから, シンプレクタイトの形成にはメルトの発生と抽出が伴ったと結論しているが, 本研究のサンプルに関してはそのようなことを考える必要はなく, 物質収支に関してはすべて上の反応(7)で説明できる. すなわちシンプレクタイトの形成は全くサブソリダスの現象として理解できる.

考 察 と 議 論

σ 分布, τ 分布から得られたスケールパラメータのうち, 輝石のドメイン構造の大きさを表すパラメーター τ (OPX-CPX)の第一波長 λ と σ (spinel) グラフの傾斜の逆数からえられるスピネル粒子サイズの間には必ずしもよい相関が成り立つ

ていない (表3). また図2で見られたようにスピネルの形状が紐状で不規則なものはCPXのまわりを取りまくように産する傾向が強いことも重要な観察事実である. スピネルがCPXのまわりを取りまわっている, あるいはCPXとOPXの結晶境界部に遍在することは, スピネルの形成が両輝石のドメイン構造の形成のあとに起こった可能性を強く示唆する. 一般に相転移における安定相の出現一核形成は格子欠陥や結晶粒界などのエネルギー値の高い場所を選んで起こり易いことが知られている (不均一核形成). しかしスピネル形成の初期に発生したこのスピネルと輝石の空間相関構造はその後の結晶の粗大化の過程で失われて行くであろう. HP-9のような構造はそのようなものを表しているかもしれない. 輝石のドメイン構造の大きさとスピネル粒子サイズの間にはよい相関が成り立っていないことから, シンプレクタイトの構造進化の考察においてはこの両パラメータは独立に取り扱った方が良さそうである.

1. モデル

以上の観察と考察をもとに以下にシンプレクタイト形成過程について一つのモデルを提示する (図4).

(1) まずかんらん岩のマントルにおける上昇にともなう減圧により, ざくろ石が熱力学的に不安定となり, まず単一相のAl-Cr輝石に転移する. ただしこの輝石は熱力学的には準安定であり, もとのざくろ石の組成をそのまま引き継ぐ.

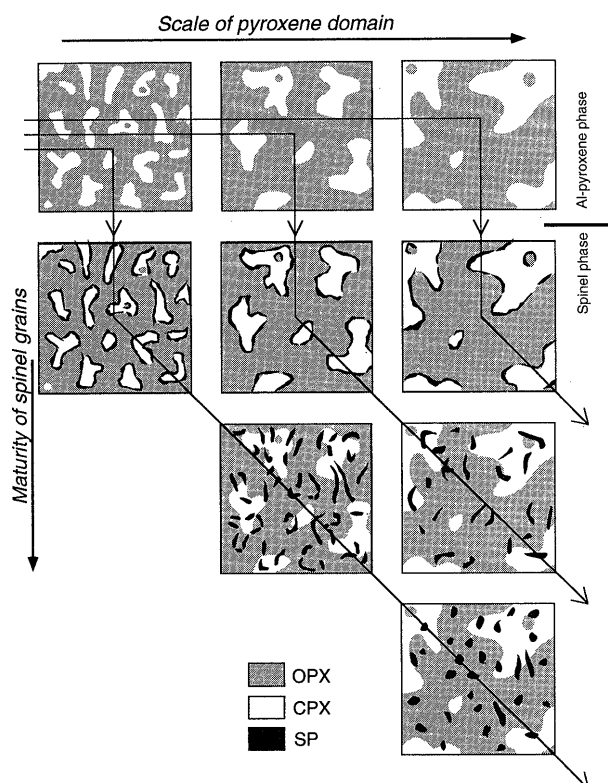
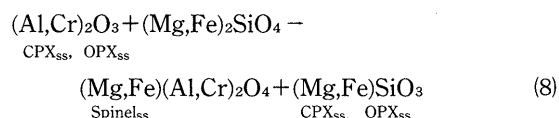


図4. シンプレクタイトの構造進化模式概念図

(2) この Al-Cr 輝石は安定相ではないので直ちに Ca に富んだ Al-輝石と Ca に乏しい Al-輝石の2相に相分離をはじめる。最初の単一相の輝石の組成はソルバスのずっと内側に位置しているので、この分解はスピノーダルの起こるであろう。すなわち、相分離は核形成を伴わず当初存在したであろうわずかの組成上の不均一性が結晶内拡散により拡大変調されて、均一な相が組成の異なる2相領域にドメイン化し、その構造は時間とともにしだいに大きく成長してくる。このステージを‘輝石フェーズ’と呼ぶことにする。

(3) この輝石の粗大化の過程のある時期に輝石に過剰に溶け込んでいた Al_2O_3 , Cr_2O_3 成分が輝石結晶外から拡散によって供給されたかんらん石成分と反応することで、Al-Cr スピネルとして析出してくる。この反応は次のように表現できる。



ここで“ss”は固溶体を意味する。スピネルの核形成は両輝石の結晶境界面上で選択的におこり結晶成長も両輝石の結晶粒界にそって進行する。Al-Cr 輝石は Al, Cr 成分を過剰に含み熱力学的に不安定であったのでスピネルの核形成が始まるとその成長は比較的急激に起こり、短時間にスピネルの析出は完了するであろう。このステージを‘スピネルフェーズ’と呼ぶことにする。ここで初めて輝石は熱力学的に安定な平衡組成をもつようになり、スピネルレルゾライト相の条件下において CPX-OPX-SP の共生が安定化されることになる。以後は長距離にわたる元素の拡散はなくなり、シンプレクタイトは

閉鎖系として振る舞うようになり、その総化学組成は変化しなくなる。

(4) ステージ(3)で化学組成的には平衡状態に達したが、組織的にはこの鉱物集合体はまだ非平衡で不安定である。そこで CPX-OPX の結晶境界の総面積が減少し、スピネル結晶粒子が丸まる方向に組織が改変、変調して行く。この際 CPX-OPX 構造はスピノーダルのであるので構造はスケーリング則が成り立っているであろう。すなわち、このドメイン構造は形の相似性を保ったまま粗大化するので構造の輝石境界の複雑な形はしばらくは（ドメイン構造のスケールがシンプレクタイト全体の大きさに比べて十分小さい内は）保持される（蔵本ほか, 1991）。CPX-OPX の結晶境界がどんどん移動してゆくのにに対し、スピネル粒子は Al, Cr 原子の拡散が遅いことから粒子はその位置はあまりかえらずに界面エネルギーが駆動力となってネッキングやライブニングにより丸くなるのみであり、しだいにスピネルの分布は、CPX-OPX の結晶境界とは無関係となる。この過程においては元素の遠距離移動はないので、シンプレクタイトの総化学組成に変化は起こらない。

図4において横軸に輝石のドメイン構造のスケールを縦軸下向きにスピネル粒子の“成熟度”をあらわすパラメータをとった。後者にはスピネル粒子の丸み度を表す適当なパラメータまたはスピネル粒子の平均サイズをあてればよいであろう。スピネルフェーズへの移行時の輝石ドメイン構造の大きさの変化を考えることによって、図に表すように複数の構造進化のトレンドを考えることができる。観察された個々のシンプレクタイトの組織はこのように輝石ドメイン構造のスケールとスピネルの成熟度という2変数を座標とする平面上に位置づけられ、その組織の多様性は構造進化という枠組みの中で解釈できたことになる。

図4の構造進化図作成においては両輝石境界面の移動とスピネル粒子の粗大化は独立して起こることを想定して描いたが、実際はこの両者は完全に独立ではなく、より精度の高い取り扱いにおいてはある程度の輝石-スピネルの相互作用は考慮しなければならないであろう。

ま と め

シンプレクタイト形成は全体的に言えばざくろ石にかんらん石成分がつけ加わった反応として記述できるが、その反応はきわめて非可逆的に起こったものである。(7)式のような表現は単に物質収支を記したものであり反応のメカニズムについてはなにも表現していない。シンプレクタイトの形成はつぎのようにいくつかのステップをふんで起こったと考えられる。

(1) かんらん岩の減圧によりざくろ石が不安定化し、準安定な Al-Cr 輝石に転移する。この準安定な Al-Cr 輝石の生成は現段階では多分に仮説的である。

(2) この輝石が不安定化しスピノーダルの両輝石のドメイン構造に発達する。

(3) このドメイン構造の粗大化の途中段階においてシンプレクタイト外部から拡散によるかんらん石成分の供給を受けて、この Al 輝石から急速に Al-Cr スピネルが析出する。

付録の表。表4のシンプレクタイトの平均化学組成を求めるのに使ったシンプレクタイト構成鉱物のEPMA分析値

	HR9003			HP-7			HR9006			HP-9		
	OPX	CPX	Spinel	OPX	CPX	Spinel	OPX	CPX	Spinel	OPX	CPX	Spinel
SiO ₂	55.89	53.55	0.37	56.18	53.51	0.57	56.59	53.59	0.50	55.82	53.42	0.46
TiO ₂	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	3.53	4.14	56.17	2.80	4.02	55.69	3.19	3.88	58.27	3.01	4.31	57.19
Cr ₂ O ₃	0.33	0.66	12.16	0.28	0.63	12.33	0.35	0.60	10.42	0.36	0.66	11.12
FeO	5.71	1.97	10.31	5.94	2.10	10.58	5.82	2.10	9.86	5.92	1.97	10.11
MnO	0.10	0.00	0.03	0.11	0.00	0.05	0.10	0.00	0.02	0.08	0.01	0.02
MgO	33.92	16.09	20.91	34.31	16.60	20.74	33.49	16.31	20.78	34.45	16.24	21.04
CaO	0.52	23.17	0.05	0.38	22.72	0.04	0.46	23.17	0.14	0.36	23.01	0.06
Na ₂ O	0.00	0.38	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.34	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
O	6	6	4	6	6	4	6	6	4	6	6	4
Si	1.923	1.935	0.010	1.935	1.933	0.015	1.945	1.937	0.013	1.924	1.929	0.012
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	0.143	0.176	1.716	0.114	0.171	1.704	0.129	0.165	1.764	0.122	0.184	1.738
Cr	0.009	0.019	0.249	0.008	0.018	0.253	0.010	0.017	0.211	0.010	0.019	0.227
Fe	0.164	0.059	0.223	0.171	0.063	0.230	0.167	0.063	0.212	0.170	0.059	0.218
Mn	0.003	0.000	0.001	0.003	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Mg	1.739	0.866	0.808	1.760	0.893	0.802	1.714	0.879	0.795	1.769	0.874	0.809
Ca	0.019	0.896	0.001	0.014	0.879	0.001	0.017	0.897	0.004	0.013	0.890	0.002
Na	0.000	0.027	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.024	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cation total	4.001	3.980	3.008	4.005	3.985	3.006	3.985	3.983	3.000	4.010	3.980	3.006
Mg/(Mg+Fe)	0.914	0.936	0.783	0.911	0.934	0.777	0.911	0.932	0.790	0.912	0.936	0.788
Cr/(Cr+Al)	0.059	0.096	0.127	0.062	0.096	0.130	0.066	0.094	0.107	0.075	0.093	0.115

(4) 以後の構造進化は化学的に閉じた系として進行し、輝石のドメイン構造の粗大化とスピネル粒子の粗大化がほぼ独立した現象として進行する。この結果スピネル析出当初存在していたスピネルとCPXの空間相関はしだいに失われる。

本研究で分析したサンプルに限りシンプレクタイト形成にはメルトの生成は関与したと考える必要はない。完全にサブソリダスの現象として理解できる。

謝 辞

本研究は文部省科研費（小畑，森下）とJSPS（日米協力事業，日本側代表小畑）に財政的援助をうけて可能となった。文部省当局と日本学術振興会に感謝する。匿名の2名の査読者の丁寧なレビューは原稿改訂するうえで大変有益であった。荒井章司氏には本特集号に投稿する機会を与えていただいた。

文 献

- 蔵本由紀・川崎恭治・山田道夫・甲斐昌一・篠本 滋，1991，パターン形成，朝倉書店，230p。
 Kushiro, I. and Yoder, H.S. Jr., 1996, Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt eclogite transformation. *Jour. Petrol.*, **7**, 337-362.
 森 健・小白井亮一，1984，幌満超塩基性岩の初生鉱物。日本地質学会第91年大会講演要旨，394。
 森下知晃・高橋奈津子・荒井章司，1995，北海道，幌満かんらん岩体の融解過程に伴うシンプレクタイトの形態，組成変化。

岩鉱，90，93-103。

- Morishita, R. and Obata, M., 1995, A new statistical description of the spatial distribution of minerals in rocks. *Jour. Geol.*, **103**, 232-240.
 森下律生・小畑正明，1995，鉱物の空間分布パターンからみた岩石組織定量化の試み。地質雑，**101**，489-498。
 Morishita, R., 1996, Some statistical properties of the ideal rock textures-in particular, on the relationship between crystal size distribution and spatial correlation of minerals. (submitted to *Jour. Math. Geol.*)
 Nagasaki, H., 1966, A layered ultramafic complex at Horoman, Hokkaido, Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo Sect. II*, **16**, 313-346.
 Ozawa, K. and Tahakashi, N., 1995, P-T history of a mantle diapir : the Horoman peridotite complex, Hokkaido, northern. Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **120**, 223-248.
 Takahashi, N., 1991, Origin of three peridotite suites from the Horoman peridotite complex, Hokkaido, Japan ; melting, melt segregation and solidification processes in the upper mantle. *Jour. Min. Petrol. Econ. Geol.* **86**, 199-215.
 Takahashi, N. and Arai, S., 1989, Textural and chemical features of chromian spinel-pyroxene symplectite in the Horoman peridotites, Hokkaido, Japan. *Sci. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba Sec. B*, **10**, 45-55.
 Takazawa, E. Frey, F.A., Obata, M. and Bodinier J-L., 1992, Geochemical evidence for melt migration and reaction in the upper mantle. *Nature*, **359**, 55-58.
 Takazawa, E., Frey, F.A., Shimizu, N. and Obata, M., 1996, Evolution of the Horoman peridotite : Implications from pyroxene compositions. *Chem. Geol.* **134**, 3-26.
 Tazaki, K., Ito, E. and Komatsu, M., 1972, Experimental study on pyroxene spinel symplectite of high pressures and temperatures. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **78**, 347-254.

(要 旨)

小畑正明・森下律生・田中久美子, 1997, 幌満かんらん岩中の輝石スピネルシンプレクタイトの微細構造とその生成過程について. 地質学論集, no. 47, 163-171. (Obata, M., Morishita, R. and Tanaka, K., 1997, The microstructure of pyroxene-spinel symplectite from the Horoman peridotite and its formation processes. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 47, 163-171.)

北海道幌満かんらん岩中の輝石-スピネルシンプレクタイトの組織をデジタル画像処理により鉱物の空間相関を計測することによって定量的に記述することを試みた。シンプレクタイトのモード、組成は岩石間ではほぼ一定であるが、組織の空間スケール、鉱物粒子の形状、サイズは様々であり、構造には大きな多様性が認められる。シンプレクタイトの組成はざくろ石にかんらん石成分が22-24重量%をつけ加わったような形になっており、したがってシンプレクタイトはサブソリダスでざくろ石がかんらん石成分の供給をうけて分解して生じたことで十分に説明できる。空間相関からもとめたスケールパラメータにもとづいて、以下のようなシンプレクタイト形成過程のモデル、構造進化のスキームを提案した。ざくろ石はまず単一、準安定相の Al-Cr 輝石に転移する。引き続きこの輝石が不安定化し Ca-輝石と Ca に乏しい輝石の2相に相分離を始める。この分離はスピノーダルのでおこるので、両輝石のドメイン構造は時間とともにしだいに大きくなる。この粗大化の様々な段階で輝石中に過剰に溶け込んでいた Al, Cr 成分がかんらん石成分と反応してスピネルとして析出してくる。スピネルの核形成は両輝石の結晶粒界に選択的に起こり成長するので、当初のスピネルは CPX 粒子をとりかこむような、紐状の不規則な形状をとる。このような形状は不安定であるので時間がたつとともに、粒子の表面積を小さくするように、スピネル粒子は丸みを帯びた形状になって行くと同時にマトリックスの輝石ドメイン構造も大きくなって行くので、スピネルの分布と輝石境界は無関係となってゆく。スピネル出現時の輝石のドメイン構造の変化を考えることにより、シンプレクタイト構造の多様性が説明できる。