

地質学論集 第47号 139-147ページ, 1997年1月
Mem. Geol. Soc. Japan, No. 47, 139-147, p. January 1997

幌満かんらん岩に記録されたマグマチャネリング様式： メルト成分の涵濁や付加で生じた置換性かんらん岩

Modes of magma channeling recorded in the Horoman peridotites :
 Replacive peridotites formed by melt extraction and addition

新井田清信*

塩谷 由美**

Kiyooki Niida *

Yumi Shiotani **

1996年1月6日受付.

1996年7月20日受理.

* 北海道大学理学研究科地球惑星物質科学.

Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan

** 北海道開発コンサルタント(株).

Hokkaido Engineering Consultants, Tsukisamu Higashi 4-9, Sapporo 060, Japan

Abstract

Mafic layers in orogenic lherzolite have been generally explained as traces of magma channeling in the upper mantle peridotites. Interactions commonly occur between channeling magma and peridotite walls. The Horoman peridotite complex in Hokkaido, Japan, contains a large number of olivine gabbro and pyroxenite dykes and sills. The contrasting processes of melt extraction and addition can be detected as follows :

Case 1 (melt extraction) : Gabbroic-type GBI sills in plagioclase lherzolite

A gradational compositional layering of plagioclase lherzolite—spinel lherzolite—spinel harzburgite, 350cm thick, is observed in the wall peridotite around the gabbroic sill. The modal variation and the chemical composition variation of bulk rocks and minerals suggest that the amount of melts extracted increases towards the gabbroic magma channels. Temperature of the channeling magma was estimated from the 10-15kb experiments on Hawaiian pyrolite to have been approximately 80°C higher than the solidus temperature of the plagioclase lherzolite wall.

Case 2 (melt addition) : Websterite dykes in spinel dunite

Replacive harzburgite is observed as a narrow band, 5-7cm wide, between the websterite dyke and the spinel dunite wall. Since the dunite wall has a simple assemblage of primary olivine+spinel, it is obvious that the replacement occurred by crystallization (modal addition) of orthopyroxene, clinopyroxene and pargasite. The replacive phases crystallized as interstitial grains among the residual phases from the infiltrated melts. The mineralogical variations across the channel further support this conclusion. No melt extractions have been detected in this channel. One way process of melt addition seems to be best explanation for the modification of high-Mg# spinel dunite wall, of which solidus was higher than the temperature of the channeling magma.

Key words : Horoman peridotite, lherzolite, harzburgite, websterite, magma channel, replacement, MORB-type basalt magma

はじめに

上部マントルかんらん岩は玄武岩質マグマの起源物質であると同時に、上部マントルで生じたマグマの通路でもある。かんらん岩中をマグマが通過すると、かんらん岩中にさまざまな痕跡がつくられる。ここでは、マグマ通過を示す形態や構成岩石などの痕跡を総称してマグマチャネルと呼ぶ。

かんらん岩中をマグマが通過する様式を大別すると、2つの異なる様式が知られている。1つは、玄武岩質マグマが割れ目を充填して通過する様式 (dyking) で、これらは火山岩中の上部マントル由来のかんらん岩ゼノリス (例えば, Irving, 1980) やオフィオライト質かんらん岩 (例えば, Boudier and

Nicolas, 1985 ; Nicolas, 1989) で普遍的に観察され、割れ目のサイズによってダイク (dyke) やベイン (vein) と記述されてきた。もう1つは、かんらん岩の結晶粒間の空隙を流動性に富むマグマが通過する様式 (percolation) で、上部マントルかんらん岩を広域的に改変するメタゾマティズムの様式の1つとされてきた (例えば, Bodinier et al., 1990 ; Menzies and Dupuy, 1991 ; Harte et al., 1993)。また、最上部マントル中のダナイトやクロミタイト生成論でも、既存の固体かんらん岩と通過マグマの相互作用が議論されている (Nicolas, 1989 ; Kelemen et al., 1992, 1995 ; Arai and Yurimoto, 1994)。

マグマチャネルの構成岩石の起源もさまざまである。その

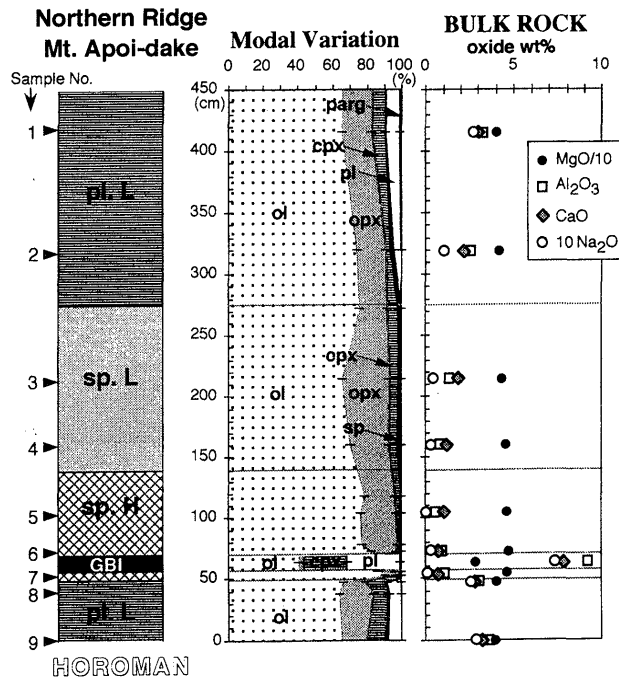


Fig. 1. Lithological section of the Horoman peridotites around the gabbroic sill (Type GBI), at the northern ridge of Mt. Apoi-dake, showing across-channel variations for modal composition (modal %) and major elements composition (oxide wt % in bulk rock). Samples (Nos. 1-9) labeled on the lithological section are analyzed for estimations of melting degree in Fig. 3. pl.L, plagioclase lherzolite; sp. L, spinel lherzolite; sp. H, spinel harzburgite; GBI, gabbroic type GBI. ol, olivine; opx, orthopyroxene; cpx, clinopyroxene; sp, spinel; pl, plagioclase; parg, Ti-pargasite.

主要な1つは通過したマグマそのもの(メルト相)を代表する苦鉄質岩で、2つめは通過マグマの分別結晶相からなる苦鉄質~超苦鉄質キュームレイトである。これらの多くは、一般にダイクやシルの形態を示す。3つめはマグマの注入や部分融解メルトの抽出により置換されたかんらん岩壁岩などである。例えば、かんらん岩壁岩の温度がチャンネルを通過したマグマの温度より著しく低い場合、マグマは急冷されてかんらん岩中に固定される(例えばオフィオライト質かんらん岩中の苦鉄質ダイクなど: Hopson et al., 1981; Nicolas and Prinzhofer, 1983)。一般に壁岩の温度が低い場合、チャンネルには温度勾配が生じ、マグマから晶出した分別結晶が壁岩に付着する(例えば, Bloomer et al., 1989)。また、通過マグマの温度がかんらん岩壁岩のソリダス温度より高い場合、チャンネル周辺の壁岩は部分融解しうる(例えば, Dick, 1977; Quick, 1981; Lago et al., 1982; Nicolas, 1986; Takahashi, 1992)。通過マグマの温度が壁岩のソリダス温度より低くても、マグマの圧力が封圧より高い場合、マグマの一部は壁岩中に浸入し、壁岩に対して様々な反応を引き起こす(Bodinier et al., 1990; Kelemen, 1990)。

日高変成帯幌満かんらん岩体には、少なからぬ苦鉄質岩(タイプ GBI, II, III および IV: 塩谷・新井田, 本論集)やダナイト質キュームレイト(SDW; Takahashi, 1991)が伴われる。これらは、かんらん岩中のマグマ通過を示す重要な痕

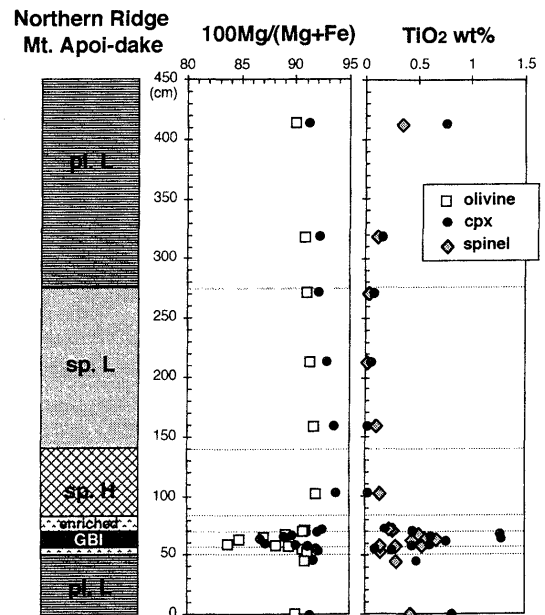


Fig. 2. Across-channel compositional variations of olivine, clinopyroxene (cpx), and spinel with the lithological change around the gabbroic sill (GBI). Increase of Mg# (100Mg/(Mg+Fe)) and decrease of TiO₂ contents toward the GBI indicate a melt extraction caused by magma channeling in the plagioclase lherzolite. Enrichment in melt components can be detected in spinel harzburgite around the GBI with label "enriched" at the base of spinel harzburgite in contact with the GBI.

跡であり、幌満かんらん岩体の層状構造の成因論の中で活発な議論が行なわれている(Takazawa et al., 1992; Takahashi, 1992)。とくにTakahashi (1992)は、岩体下部の層状かんらん岩の成因を高温マグマの通過による部分融解で説明し、幅数100mオーダーの「大規模チャンネル」モデルを提案した。ここでは、はんれい岩質の苦鉄質岩や超苦鉄質キュームレイトが多数出現する幌満かんらん岩体上部(Niida, 1974, 1984)に注目し、かんらん岩中に記録されたマグマチャンネル様式の解析を試みる。その結果、マグマチャンネルに生じたメルト成分の溜りと付加による壁岩かんらん岩の置換(replacement)の違いについて議論される。

チャンネル様式 (1):

斜長石レルゾライト中の苦鉄質岩タイプ GBI

1. 産状および岩石記載

幌満かんらん岩体上部はおもに斜長石レルゾライトからなる。これにスピネルレルゾライト~ハルツバージャイト、少量のスピネルダナイト、ウェブステライト、オルソパイロキシナイト、およびはんれい岩質の苦鉄質岩が伴われる。岩体上部の斜長石レルゾライト中には、多数の苦鉄質岩(タイプ GBI)が認められ、塩谷・新井田(本論集)によって、そのシル状ないしダイク状の産状記載と岩石学的性質の検討が行なわれている。斜長石レルゾライト中の苦鉄質岩の周囲には、

スピネルレルゾライト～ハルツバージャイトが伴われる場合と伴われない場合があり、Fig. 1は伴われる場合の実例である。この観察地点（試料採集地点）はアポイ岳からおよそ900 m北方の稜線部に位置する。幌満かんらん岩体上部では、このような潤濁かんらん岩を伴う産状がしばしば観察されるので、岩体上部で普遍的なマグマチャネル様式であると見なされる。

苦鉄質岩タイプ GBI は、おもにかんらん石・斜長石および TiO_2 に富む単斜輝石からなり、少量の斜方輝石・スピネルおよびチタンパーガサイト質角閃石を含む。この GBI の厚さは約13cmで、明瞭な境界面をもって壁岩のスピネルハルツバージャイトに接している。周囲のかんらん岩の岩相変化は上下非対称になっており、みかけの上方に向かってスピネルハルツバージャイト（厚さ約70cm）→スピネルレルゾライト（約135cm）→斜長石レルゾライト（175cm以上）へと変化する。

Fig. 1 の鉱物モード組成変化で示されるように、斜長石レルゾライトはおよそ10%以下の斜長石を含む。ここでは、IUGS の超苦鉄質岩分類（Streckeisen, 1973）に従って、モード組成比で5%以上の単斜輝石を含むかんらん岩をスピネルレルゾライトとし、単斜輝石が5%以下のスピネルハルツバージャイトと区別した。かんらん岩壁岩のモード組成変化は、斜長石レルゾライトから GBI に向かって、かんらん石の増加と単斜輝石・斜長石・スピネルの減少で特徴づけられる。ただし、斜長石レルゾライトとスピネルレルゾライトの間に斜長石の消失に伴うモード組成ギャップがある。また、壁岩かんらん岩は全体的には中粒～粗粒なイクイグラニューラー組織～ポーフィロクラスティック組織を示し、大型の残留結晶（初生結晶）をポーフィロクラスト状に含む。これらにはキンクバンドや変形ラメラが生じているが、圧碎岩組織のような強度に変形・再結晶した岩石組織を示さない。初生的かんらん石や斜方輝石は、粒径1.5～5.0mm、最大7.0mmで、0.1～1.0mmの等粒状基質に含まれる。GBI 境界に近いハルツバージャイトはイクイグラニューラー組織ないしプロトグラニューラー組織（Mercier and Nicolas, 1975）を示し、斜方輝石や単斜輝石が特徴的にかんらん石粒間を埋めている。

2. チャネル横断方向の化学組成変化

苦鉄質岩タイプ GBI の周囲のかんらん岩壁岩中で観察される層状の岩相変化（Fig. 1）について、どのような化学組成変化がチャネル横断方向に生じているかを確かめるために、全岩と主要構成鉱物の化学組成変化を検討した（Figs. 1 and 2）。全岩の主成分化学組成の分析には北海道大学理学研究科の蛍光 X 線分析計（フィリップス PW 1404型）を用いた。また、構成鉱物の化学組成分析には同大学の EPMA（日本電子 JCMA-733 型）を用い、補正計算には ZAF を使用した。

全岩化学組成変化：

GBI からおよそ350cm離れた位置の斜長石レルゾライトは、幌満かんらん岩体の一般的な斜長石レルゾライトの全岩化学組成をもっている。Fig. 1 の化学組成変化図で明らかなように、斜長石レルゾライトから GBI との境界部まで、かんらん岩壁岩には全岩主成分元素の系統的な組成変化が認められる。

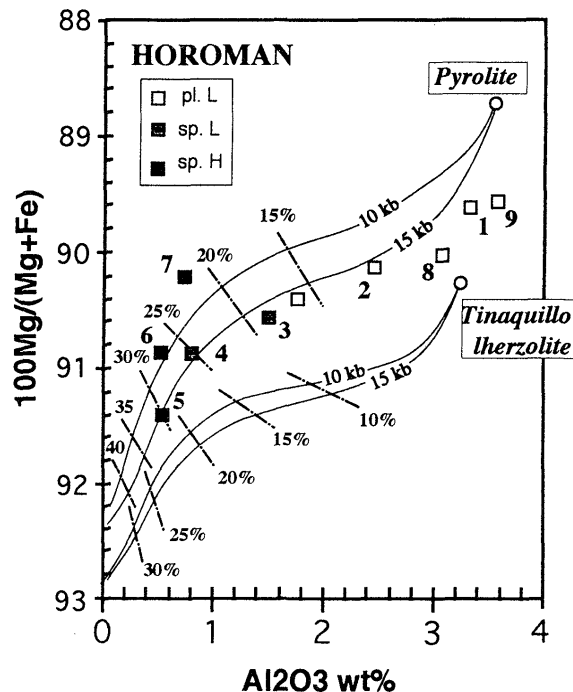


Fig. 3. $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ vs. Al_2O_3 (wt %) correlations in bulk rocks, showing degree of melting (%) (lines with dot), estimated from the 10kb and 15kb melting experiments on the Hawaiian pyrolite and the Tinaquillo lherzolite (Jaques and Green, 1980). Numbers labeled with the plots are sample Nos. 1-9 shown in Fig. 1 (No. 1=930429-13, No. 2=930429-12, No. 3=930429-10, No. 4=930429-9, No. 5=930429-8, No. 6=930429-7, No. 7=930429-5, No. 8=930429-4, No. 9=930429-3 : after Shiotani and Niida (in this volume)).

とくに、かんらん岩の潤濁度の尺度として MgO の増加や $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{TiO}_2$ の減少に注目した。斜長石レルゾライトから GBI に向かって MgO 含有量は39.49 wt %から46.53 wt %まで単調に増加し、 Al_2O_3 は3.57 wt %から0.54 wt %まで、 CaO は3.19 wt %から0.60 wt %まで、 Na_2O は0.31 wt %から0.00 wt %まで減少する。図にはプロットされていないが、 TiO_2 含有量も0.14 wt %から0.00 wt %まで減少する。ここで観察された主成分化学組成変化は、壁岩かんらん岩の鉱物モード組成変化と調和的である（Fig. 1）。

構成鉱物の化学組成変化：

チャネル横断方向に認められる構成鉱物の化学組成変化を検討した（Fig. 2）。壁岩かんらん岩中の苦鉄質鉱物の $\text{Mg}\#$ 値 ($\text{Mg}\# = 100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$) は、かんらん岩の部分融解の程度や融解メルトの抽出程度の指標となる。かんらん岩壁岩中の苦鉄質鉱物の $\text{Mg}\#$ 値は、斜長石レルゾライトから GBI に向かって明瞭に増加する。斜長石レルゾライトのかんらん石の $\text{Mg}\#$ 値は90.3(平均値)で、GBI から30cm離れたハルツバージャイトのほぼ中心部では $\text{Mg}\# = 92.1$ である。GBI との接触部周辺では91.0で、 Fe に富む。斜方輝石の $\text{Mg}\#$ 値も平均値で90.4から92.1まで、単斜輝石も91.3から93.8まで増加し、かんらん石と同様の変化を示す。ただし、単斜輝石の $\text{Mg}\#$ 値はかんらん石・斜方輝石に比べてやや高く、とくにハルツバージャイトでサブソリダス改変の影響が強い。

単斜輝石やスピネルの TiO_2 含有量は、一般にかんらん岩中

ではメルト成分としてふるまう。斜長石レルゾライトの単斜輝石の TiO_2 は平均で0.76 wt %含まれるが、ハルツバージャイトでは0.02 wt %以下まで涵濁する。スピネルの TiO_2 も、同様に明瞭な減少トレンドを示し、この場合スピネルレルゾライトで最少となる。GBI との境界に近いハルツバージャイトでは、GBI に直接する7~20cmの範囲で $\text{Mg}\#$ 値の減少 (Fe の増加) と調和的に単斜輝石・スピネルの TiO_2 含有量の増加が検出される。

3. 壁岩かんらん岩のメルト涵濁度

かんらん岩の部分融解に伴う残留かんらん岩の MgO の増加や $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{TiO}_2$ の減少は、一般によく知られている(例えば, Mysen and Kushiro, 1977; Hanson and Langmuir, 1978; Jaques and Green, 1980)。ここで、壁岩かんらん岩がどの程度部分融解し、どの程度メルト成分の涵濁が生じたかを見積るために、全岩の主成分化学組成を用いてかんらん岩の涵濁度を検討した (Fig. 3)。図の一点鎖線は、10kb と 15kb におけるかんらん岩の融解実験 (Jaques and Green, 1980) から得られた部分融解の程度 (%) である。100Mg/(Mg+Fe) vs. Al_2O_3 (wt %) 変化図の上にプロットされた GBI 周辺の壁岩かんらん岩の涵濁度は、部分融解の進行に伴う Hawaiian pyrolite と Tinaquillo lherzolite の組成変化および部分融解の程度を参照値として見積ることができる。

GBI から最も離れた斜長石レルゾライト (Sample Nos. 1 and 9) は最も低い $\text{Mg}\#$ 値をもち ($\text{Mg}\# = 89.5 \sim 89.6$), Al_2O_3 に富む (3.34~3.57 wt %)。これらの組成は、肥沃な上部マントルの代表として提唱された初生的かんらん岩組成 (Hawaiian pyrolite: Green, 1973) と涵濁した上部マントルの代表として提唱された初生的かんらん岩組成 (Tinaquillo lherzolite: Jaques and Green, 1980) に極めて近く、両者のほぼ中間である。かんらん岩壁岩の涵濁度は GBI に向かって大きくなり、スピネルレルゾライト (Sample Nos. 3 and 4) で15~25%、ハルツバージャイト (Sample No. 5) で20~30%に達している。斜長石レルゾライト (Sample Nos. 2 and 8) の涵濁度は、最大でも10%に達していない。GBI に直接する境界面周辺のハルツバージャイト (Sample Nos. 6 and 7) はこれらの涵濁トレンドから外れて著しく Fe に富む。

4. 形成モデル (1): メルト抽出を伴うマグマチャネル

斜長石レルゾライト中の苦鉄質岩タイプ GBI の場合、以上の観察結果および鉱物モード組成・全岩化学組成・主要構成鉱物化学組成のチャネル横断方向の変化の特徴から、「メルト抽出を伴うマグマチャネリング」モデルが考えられる (Fig. 4)。

はんれい岩質苦鉄質岩タイプ GBI をつくったマグマが斜長石レルゾライト質のかんらん岩壁岩中をシル状に通過した。通過マグマは、N-MORB タイプの玄武岩質マグマであったと推定される (塩谷・新井田, 本論集)。現在の GBI の厚さは約 13cm であるが、これがマグマ通過時のメルト空間の厚さであっ

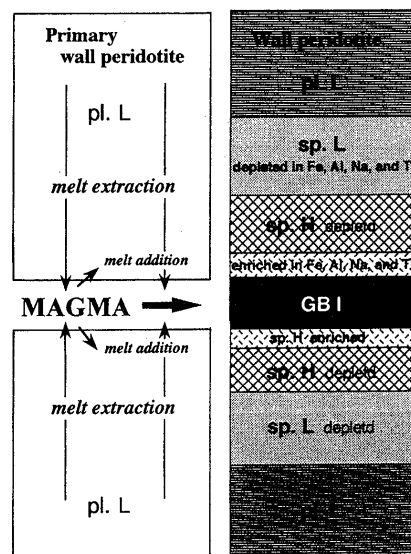


Fig. 4. A schematic model for the Case 1 magma channeling, characterized by a melt extraction from the wall peridotite. Gabbroic magma penetration is assumed to have been accompanied by a localized partial melting in the wall peridotite (pl. L). The compositional gradients observed in the depleted spinel lherzolite (sp. L) and harzburgite (sp. H) next to the gabbroic sill (GBI) suggest that the amount of melts extracted from the wall peridotite gradually increases toward the channeling magma. The spinel harzburgite enriched in melt components was formed within the narrow bands in contact to the GBI.

たかどうかは不明である。後述するように、通過マグマの温度が周囲のかんらん岩壁岩 (斜長石レルゾライト) のソリダスより高かったために、マグマ通過時にかんらん岩壁岩は局部的に部分融解した。この時、かんらん岩の部分融解が生じた範囲は、壁岩中で GBI に向かう組成勾配が現在観察される範囲として GBI の貫入面からおよそ 3.5m である。しかし、部分融解の過程で融解メルトは壁岩から分離・抽出されているので、融解範囲は短縮したはずである。したがって、かんらん岩壁岩で生じた部分融解の範囲は、通過マグマの貫入面から 3.5m 以上であったと予想される。また、部分融解時ないしその後、残留かんらん岩内部で変形短縮が起こった可能性があり、3.5m という現在の実測距離は予想される最小値である。

鉱物モード組成や全岩化学組成・主要構成鉱物化学組成からは、GBI に向かって抽出されたメルト量が系統的に大きくなっていると見なされる。壁岩から分離したメルト抽出量は GBI 周辺のハルツバージャイトで最大となり、100Mg/(Mg+Fe) vs. Al_2O_3 変化図 (Fig. 3) から 20~30% であったと見積られる。壁岩かんらん岩から抽出されたメルトは玄武岩質であり、壁岩は主要なメルト成分として SiO_2 , FeO^* , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , および TiO_2 に涵濁した。一方、GBI に直接するハルツバージャイトは、その外側の涵濁したハルツバージャイトに比べて SiO_2 , FeO^* , Al_2O_3 , Na_2O , TiO_2 などのメルト成分に富む (Figs. 2-4 の enriched sp. H)。部分融解メルトの抽出で特徴づけられるチャネル内部で、メルト成分の付加も貫入面のごく近辺で生じていたと見なされる。

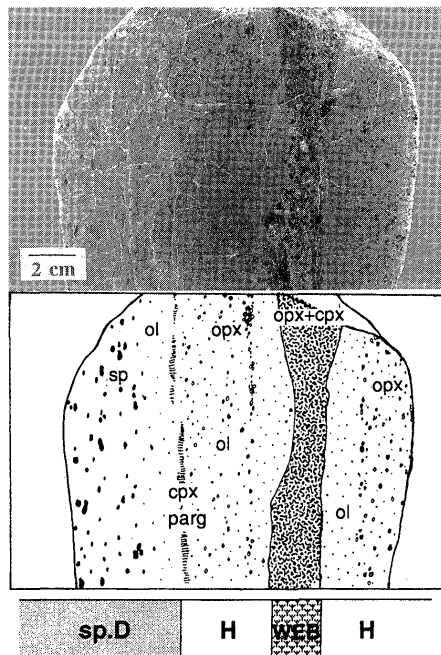


Fig. 5. Websterite dyke (WEB), 2-3cm thick, crosscutting spinel dunite (sp. D). The spinel dunite wall is composed mostly of olivine (ol) and spinel (sp). Replacement bands of harzburgite (H), containing interstitial orthopyroxene (opx), clinopyroxene (cpx), and pargasitic amphibole (parg), are observed both sides of the websterite dyke. Hydration front, made up of aggregations of clinopyroxene and pargasitic amphibole, marks the border surface of the replacive harzburgite. Sample No. RS 908-1.

チャネリング様式 (2): スピネルダナイト中のウェブステライトダイク

1. 産状および岩石記載

次に、もう1つの異なるマグマチャネリング様式を示す。Fig. 5は、スピネルダナイトを貫くウェブステライトダイクの例である。この試料は、幌満かんらん岩体のほぼ中央部に位置する不動の沢で採取された転石である。母岩のかんらん岩壁岩は、おもにモード組成比で94.8~98.0%のかんらん石と0.8~3.7%のスピネルからなるダナイトで、Takahashi (1991)のSDW系列に極めて類似し、構成鉱物の化学組成の特徴からともともとキュームライトであったと見なされる。少量の単斜輝石（モード組成比1.0~1.3%）とパーガサイト質角閃石（0.1~0.2%）および斜方輝石（0.1~0.2%）を含む。転石試料の採集地点が岩体上部に位置することから判断して、このチャネリングも幌満岩体上部で起こったと考えられる。

Fig. 5のように、試料中央部に幅およそ2~3cmのダイク状のウェブステライトがあり、その左右両側に幅5~7cmのハルツバージャイト質置換バンドが形成されている。ウェブステライトは、おもに斜方輝石・単斜輝石からなり、周縁部にかんらん石とスピネルを少量含む。斜方輝石と単斜輝石は、粗粒なポーフィロクラストとしてモード組成比でそれぞれ60.9%および25.9%含まれる。ダイク中に粒径0.2mm以下の細粒な再結晶鉱物集合からなる苦鉄質部（斜長石+かんらん石+単斜輝石+斜方輝石+スピネル+チタンパーガサイト質角閃石）

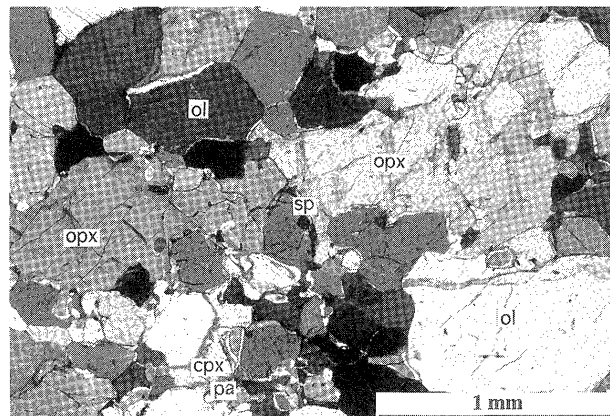


Fig. 6. Photomicrograph of replacive harzburgite (Sample No. RS 908-1d), showing textural features of interstitial orthopyroxene (opx), clinopyroxene (cpx), and pargasitic amphibole (pa), among equigranular, polygonal olivines. No porphyroclastic textures are observed in the replacive harzburgite. Crossed polarized light.

を少量伴う。置換バンドは、オリーブ色をした壁岩のスピネルダナイトと対照的に淡黄褐色を呈し、斜方輝石に著しく富む（最大で20.1%）。置換バンドのウェブステライト側（幅1~2cm）とスピネルダナイト側（幅4~5cm）では斜方輝石含有量に違いがあり、それぞれ9.9~15.9%と19.9~20.1%の斜方輝石を含む。これらには、3.2%以下の単斜輝石と1.2%以下のスピネル、0.9%以下のチタンパーガサイト質角閃石、および極めて少量のNi-Fe酸化物鉱物が伴われる。置換バンドの外側境界部近くに単斜輝石+チタンパーガサイト質角閃石の濃集層が認められる（Fig. 5）。これは、ダナイト壁岩中を通過したマグマが壁岩を改変した際に生じた濃集層で、置換性ハルツバージャイトを生じた改変の範囲を示す加水フロント（hydration front）として注目される。また、置換バンド中には、粗粒で他形粒状のスピネル（粒径0.5~3.0mm）と極めて小型の自形~半自形スピネル（粒径0.05~0.3mm）とが共存する。

Fig. 6は、置換性ハルツバージャイトの顕微鏡写真である。置換性ハルツバージャイトの岩石組織は、おもに粗粒~中粒のかんらん石・斜方輝石からなるイクイグラニューラー組織ないしプロトグラニューラー組織で特徴づけられ、ポーフィロクラスティック組織を示さない。斜方輝石は、最大粒径がおよそ2.0mmで、単斜輝石やチタンパーガサイト質角閃石とともに、粒径0.2~1.8mmの等粒状かんらん石の粒間を埋めて晶出している。このような岩石組織は、幌満かんらん岩体下部で一般的なかんらん石や斜方輝石のポーフィロクラストを含むハルツバージャイト質の残留かんらん岩の岩石組織（Niida, 1975）と著しく異なり、後述する置換性ハルツバージャイトの改変様式（鉱物のモーダルな付加）を特徴づけている。

2. チャネル横断方向の化学組成変化

チャネル横断方向に認められる構成鉱物の化学組成変化を検討した（Fig. 7）。壁岩ダナイトのかんらん石コアのMg#値は90.8~92.0であるが、ウェブステライトに向かって系統

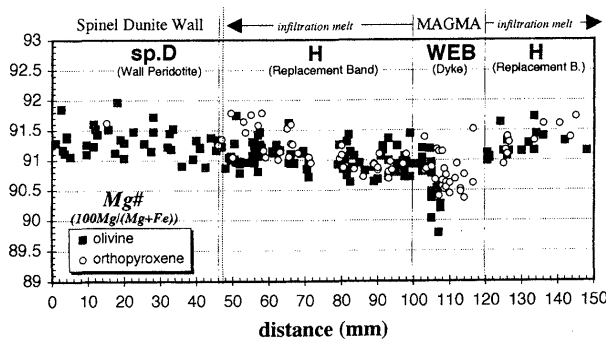


Fig. 7. Across-channel chemical variations of Mg# ($100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$) for olivine and orthopyroxene cores from the Case 2 magma channel. Horizontal axis is distance (mm) perpendicular to the channel. Solid vertical lines show the borders of websterite dyke (WEB) in contact with harzburgitic replacement band (H). Dotted double vertical lines are the outer border of replacement band (H) marked by clinopyroxene-pargasite rich layer in contact with spinel dunite wall (sp. D).

的に減少する。壁岩ダナイトとの境界部付近の置換性ハルツバージャイト中のかんらん石は $\text{Mg}\# = 90.8 \sim 91.7$ であり、置換バンド中をウェブステライトに向かって漸減し、その境界部で $\text{Mg}\# = 90.6 \sim 91.4$ となる。ウェブステライトダイクの内部では、中心部でかんらん石の $\text{Mg}\#$ 値は急減し、 $\text{Mg}\# = 89.7 \sim 90.6$ である。かんらん石の NiO 含有量は明瞭な減少傾向を示さない ($\text{NiO} = 0.29 \sim 0.41 \text{ wt}\%$)。置換バンドのハルツバージャイト中の斜方輝石の $\text{Mg}\#$ 値にも著しい勾配が認められ、ウェブステライトにむかって $\text{Mg}\# = 91.0 \sim 91.8$ から接触部付近で $\text{Mg}\# = 90.7 \sim 91.2$ まで減少する。ウェブステライト中の斜方輝石も鉄に富み、中心部で $\text{Mg}\# = 90.3 \sim 91.0$ である。

かんらん岩中の単斜輝石の Na や Ti はメルト成分を代表し、かんらん岩に関与したメルトの挙動を示唆しうる。Fig. 8 に示されるように、壁岩中の単斜輝石はもともと著しく Na に富み、 Ti に乏しい ($100\text{Na} = 6.39 \sim 9.09$, $100\text{Ti} = 0.25 \sim 0.43$)。一方、ウェブステライトの単斜輝石は Na に乏しく、著しく Ti に富んでいる ($100\text{Na} = 1.92 \sim 4.71$, $100\text{Ti} = 0.59 \sim 1.07$)。置換バンド中の単斜輝石には明瞭な組成勾配が認められ、 Na は壁岩ダナイトからウェブステライトに向かって減少 ($100\text{Na} = 7.73 \sim 5.28$)、 Ti は増加 ($100\text{Ti} = 0.34 \sim 1.13$) する。置換バンド中のパーガサイト質角閃石も単斜輝石とよく似た化学組成勾配を示す ($\text{Na}_2\text{O} = 3.90 \sim 2.86 \text{ wt}\%$, $\text{TiO}_2 = 0.78 \sim 2.49 \text{ wt}\%$)。置換バンド中のスピネルの $\text{Mg}\#$ 値はウェブステライトに向かってやや減少する。しかし、壁岩ダナイトのもともとのスピネルもキュムラスで、ウェブステライトのスピネルと同じレベルの $\text{Cr}\#$ 値 ($\text{Cr}\# = 35 \sim 55$) と TiO_2 含有量 ($\text{TiO}_2 = 0.12 \sim 0.34 \text{ wt}\%$) をもつために、置換バンドで明瞭な組成勾配を示さない。

3. 壁岩かんらん岩の置換

マグマ通過 (dyking) に伴ってスピネルダナイト質の壁岩中にハルツバージャイト質の置換バンドがつけられたことは、すでに述べたチャンネルの産状から明らかである (Fig. 5)。こ

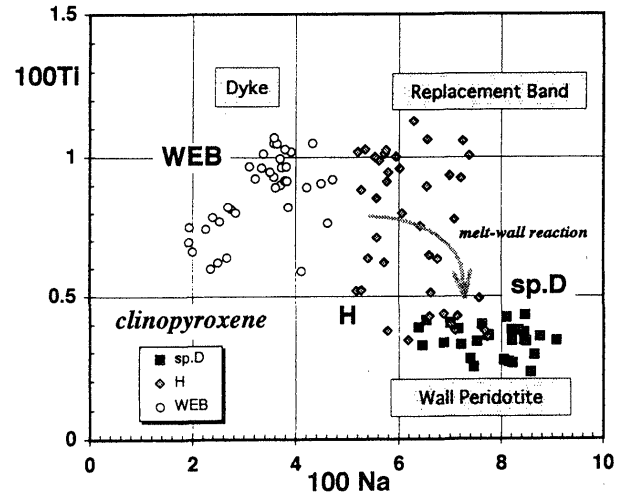


Fig. 8. Plots of 100 Ti vs. 100 Na (atomic proportions for $\text{O} = 6$) for clinopyroxenes from the spinel dunite wall (sp. D), harzburgitic replacement band (H), and websterite dyke (WEB), showing clinopyroxene crystallization in the replacement harzburgite accompanied by reactions between the spinel dunite wall and the melts infiltrated from the channeling magma.

の場合、壁岩は、かんらん石とスピネルの単純な鉱物組合せからなるスピネルダナイトであり、ハルツバージャイト質の置換バンドとの鉱物モード組成の違いは明瞭である。そのため、壁岩ダナイトの置換によってモデルに付加した鉱物が特定される。岩石記載で示した鏡下の特徴から、置換によって生じた鉱物はかんらん石・斜方輝石・単斜輝石・パーガサイト質角閃石および少量のスピネル・ Ni-Fe 酸化物鉱物であるとみなされる。

しかし、置換性かんらん岩の改変で分解ないし付加した鉱物が、分解や付加を示す組織上の特徴や化学組成の違いを示さない場合、一般にモデルな改変を特定するのは難しい。この置換バンド中に含まれるかんらん石は、もともと壁岩ダナイトに含まれていた残留かんらん石と新たに晶出した置換性かんらん石からなる。一部に初生的な粗粒残留かんらん石が観察されるものの、細粒～中粒の基質部中では両者の識別は困難である。大多数のかんらん石は等粒状の多角形かんらん石の集合組織を示し、両者の化学組成 (主成分) には違いが認められない。また、壁岩ダナイト中にはスピネルが最大 3.7% 含まれているが、置換バンド中には極めて少量 (1.2% 以下) しか含まれていない。この置換バンド中には一部に少量の粗粒スピネルが残留し、粒間には極めて小型の自形～半自形スピネルが新たに晶出している。したがって、このチャンネルの実例では、上述したスピネルの分解が推定されるものの、様式 (1) の壁岩かんらん岩で観察されたようなメルト成分の潤濁は検出されない。

置換バンドは、最大でモード組成比 20% の斜方輝石および 2～3% の単斜輝石が付加されており、大量の SiO_2 の付加で特徴づけられる。また、斜方輝石・単斜輝石の付加とともに少量のパーガサイト質角閃石 (モード組成比でおよそ 1%) も生じているので、 CaO , TiO_2 , Na_2O , K_2O および H_2O も付加し、壁岩は加水されたものとみなされる。このような壁岩ダ

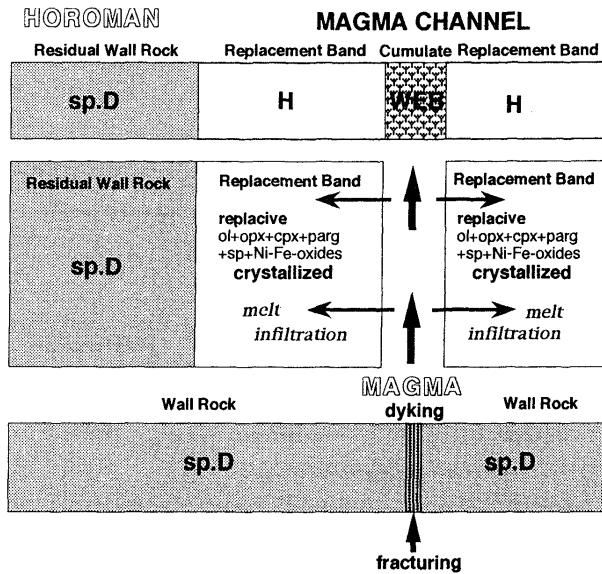


Fig. 9. A schematic model for generation of the replacive harzburgite, showing a modal enrichment of orthopyroxene, clinopyroxene and pargasite crystallized from infiltration melt as a major process of the Case 2 magma channeling. sp. D : spinel dunite, H : harzburgite, WEB : websterite.

ナイトの改変を起こした作因子（エージェント）としては、 SiO_2 に富む珪酸塩メルトが有力である。それは、チャネルの産状から、ウェブステライトダイクをつくった玄武岩質マグマから壁岩中に浸入したメルトであったと考えられる。

このハルツバージャイト質置換バンドの形成には、壁岩ダナイトと通過マグマから壁岩中に浸入したメルトとの間で相互作用（メルト-壁岩反応）があったと考えられる。そのメルト-壁岩反応を確かめるために、単斜輝石の化学組成を検討した（Fig. 8）。置換バンド中の単斜輝石のTiとNa含有量は、壁岩ダナイトとウェブステライトダイクの単斜輝石のほぼ中間の含有量である。これらが置換バンドの中でチャネル横断方向に組成勾配を示すことはすでに述べた。したがって、壁岩中にモデルに付加した単斜輝石の結晶作用はメルト-壁岩間の反応系の中で進行したと考えられる。同様に、置換バンド中のかんらん石や斜方輝石のMg#にも、上述したような系統的な組成勾配が観察されており、メルト-壁岩反応が示唆される（Fig. 7）。

4. 形成モデル (2)：メルト付加を伴うマグマチャネル

スピネルダナイト中に貫入したウェブステライトダイクの場合、以上の観察結果とくに鉱物モード組成・主要構成鉱物化学組成のチャネル横断方向の変化の特徴から、「メルト付加を伴うマグマチャネリング」モデルが考えられる（Fig. 9）。

まず、上部マントルにあったキュームレイト質スピネルダナイトに割れ目が生じ、玄武岩質マグマが通過した。通過マグマから晶出した斜方輝石と単斜輝石は残液マグマから分別し、壁岩の壁に付着して幅2~3cmのウェブステライトダイクをつくった。この通過マグマは、ウェブステライトダイクの輝石やかんらん石のMg#が中心部に向かって急減する（Fig. 7）ことから、やや分化していた。このときマグマが通過した

ダイクの幅（マグマに充填されたメルト空間の幅）は、残液マグマの大半が残存していないのでわからない。通過した玄武岩質マグマは、ウェブステライトに含まれる斜方輝石・単斜輝石・かんらん石および角閃石の化学組成の類似から、はんれい岩質苦鉄質岩タイプGBIのマグマ（塩谷・新井田、本論集）に類似していたと推定される。

通過マグマから壁岩ダナイト中にメルトが浸入し、そのメルトは浸入と同時に壁岩と反応してかんらん石に飽和し、よりMg#値の高いかんらん石を晶出した（Kelemen, 1990）。その後、斜方輝石・単斜輝石・パーガサイト質角閃石および極めて少量のスピネル・Ni-Fe酸化物を晶出した。このとき晶出した斜方輝石・単斜輝石・パーガサイト質角閃石は、かんらん石の結晶粒間を埋め、マグマ関与を強く示唆する特徴的な等粒状組織をつくった。このような壁岩かんらん岩の改変は、主に鉱物のモデルな付加によって説明される。結果としてダイクの接触部には、壁岩ダナイトにもともと含まれていた残留かんらん石と新たに晶出したかんらん石・斜方輝石・単斜輝石・パーガサイト質角閃石とが混在するハルツバージャイト質の置換バンドができた。壁岩ダナイトの加水改変範囲は、パーガサイト質角閃石の晶出範囲として明瞭に識別され、それはダイクの貫入面から5~7cmの置換性ハルツバージャイトの形成範囲と一致している。置換性ハルツバージャイトの形成の際に壁岩ダナイトに浸入したメルトは、鉱物モード組成を改変し、全岩化学組成としておもに SiO_2 、 TiO_2 、 FeO^* 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O および H_2O を付加した。

議論：チャネリングマグマの温度と壁岩かんらん岩のソリダス温度

幌満かんらん岩体上部で観察されたチャネリング様式は、壁岩かんらん岩から部分融解メルトが抽出され、壁岩にメルト成分の溜湯を生じたチャネリング様式(1)と、壁岩かんらん岩の溜湯を伴わずに、通過マグマから一方的にメルト成分が付加したチャネリング様式(2)である。これら2つの異なる様式は、おもにチャネリングマグマの温度と壁岩かんらん岩のソリダス温度の違いに因っていたと考えられる。

チャネリングマグマの温度を推定するために、輝石ペアの地質温度計を用いて、チャネル(1)内部の斜方輝石-単斜輝石コアの温度見積りを行なった。その結果、Wood and Banno (1973)の温度計で930~1,100°C、Wells (1979)でおおよそ840~1,040°Cであった。壁岩かんらん岩の温度も無水かんらん岩のサブソリダス温度を示し、ハルツバージャイトでは斜長石レルゾライトより約80~100°C高い温度が見積もられた。関与したマグマの実際の温度はもっと高温で、凍結されているサブソリダス温度の最高温度以上であったはずである。チャネル(2)内部の斜方輝石-単斜輝石コアの温度見積り結果も同様で、チャネリングマグマの温度を示さない。ここでは、融解実験で得られた無水かんらん岩のソリダス温度を参考にした。チャネル形成深度は、チャネル(1)および(2)の内部にざくろ石の初生結晶が含まれないことから、とりあえず約10~15kbの深さであったと考える。Jaques and Green (1980)の無水かんらん岩の融解実験によると、Pyrolite組成のかん

らん岩のこの深度におけるソリダス温度は1220~1290°Cであり、Tinaquillo lherzolite 組成のソリダス温度は1240~1,300°Cである。チャネル (1)の場合、実際には壁岩の斜長石レルゾライトに少量のパーガサイト質角閃石が含まれるので、壁岩のソリダス温度はこれよりもやや低かった可能性が示唆され、さらに、チャネリングマグマから壁岩中に揮発性成分が浸入して壁岩のソリダス温度が低下していた可能性もある。チャネル (1)の場合、壁岩かんらん岩の融解程度はハルツバージャイトで20~30%に達しているので、部分融解をひきおこした通過マグマの温度は壁岩のソリダス温度よりさらに約80°C高かったと推定される。この温度差が、壁岩かんらん岩の部分融解の程度(メルト抽出の量)や改変の範囲(置換性かんらん岩の厚さ)を左右し、温度差が小さい場合はチャネルに伴われる置換バンドが薄くなる。一方、チャネル (2)の場合、壁岩はスピネルダナイトであったために、そのソリダス温度は極めて高く(1,450°C以上:例えば Takahashi, 1986)、チャネリングマグマの温度は壁岩ダナイトのソリダスに達していなかった。そのために、壁岩からメルト抽出が起らず、通過マグマ側からメルト成分が一方向的に付加したと考えられる。

ま と め

1. 幌満かんらん岩体上部には、2つの異なるマグマチャネリング様式が識別される。チャネリング様式 (1)は、壁岩かんらん岩から部分融解メルトが抽出され、壁岩にメルト成分の涸渇を生じた様式であり、チャネリング様式(2)は、壁岩かんらん岩の涸渇を伴わずに、通過マグマから一方向的にメルト成分が付加した様式である。
2. 斜長石レルゾライト中の苦鉄質岩タイプ GBI の場合、壁岩かんらん岩は局所部分融解によって涸渇し、斜長石レルゾライトースピネルレルゾライトースピネルハルツバージャイトのモード組成勾配がつくられた(チャネリング様式 (1))。全岩主成分化学組成や構成鉱物化学組成のチャネル横断方向の変化からは、融解メルト抽出量が GBI に向かって増大したことが示唆される。
3. スピネルダナイト中に貫入したウェブステライトダイクの場合、ダイクの周囲の壁岩ダナイトが改変されてハルツバージャイト質の置換バンドがつくられた(チャネリング様式 (2))。置換バンドは、斜方輝石・単斜輝石・パーガサイト質角閃石などの鉱物のモーダルな付加で特徴づけられる。このモード組成改変は、壁岩ダナイトに全岩化学組成として SiO_2 , TiO_2 , FeO^* , CaO , Na_2O , K_2O , および H_2O などのメルト成分が付加したことを意味し、かんらん岩改変のエージェントとしてはチャネリングマグマから浸入した玄武岩質メルトが候補である。構成鉱物の化学組成のチャネル横断方向の変化からは、置換性ハルツバージャイトの形成に壁岩かんらん岩と浸入メルトの反応が伴われたことが示唆される。
4. このような2つの異なるチャネリング様式を生じた原因として、チャネリングマグマの温度と壁岩かんらん岩のソリダス温度の差が議論された。すなわち、チャネリング様式

(1)の場合、チャネリングマグマの温度は壁岩の斜長石レルゾライトのソリダス温度より約80°C高かったこと、およびチャネリング様式 (2)の場合、チャネリングマグマの温度は壁岩のスピネルダナイトのソリダス温度よりも低かったことが考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学の桑島俊昭・野村秀彦技官には薄片製作で、寺田省一技官には EPMA 分析および XRF 分析でご協力いただいた。野外調査に際しては、北海道大学理学部付属えりも地殻変動観測所にお世話になった。ウェブステライトダイクを含むスピネルダナイトのサンプリングに際しては、ノボシビルスク連合研究所の I.V. Ashchepkov, S. Esin, Y. Litasov の協力を得た。また、匿名の査読者からは示唆に富む貴重な指摘をいただいた。以上の方々に深く感謝する。研究費の一部に文部省科学研究費補助金重点領域研究 (2) (06222201:代表者・新井田清信)および一般研究 (C) (07640630:代表者・新井田清信)を使用した。

文 献

- Arai, S. and Yurimoto, H., 1994, Podiform chromitites of the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as mantle-melt interaction products. *Econ. Geol.*, **89**, 1279-1288.
- Bloomer, S.H., Natland, J.H. and Fisher, R.L., 1989, Mineral relationships in gabbroic rocks from fracture zones of Indian Ocean ridges: evidence for extensive fractionation, parental diversity, and boundary-layer recrystallization. In Saunders, A.D. and Morris, M.J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **42**, 107-124.
- Boudier, F. and Nicolas, A., 1985, Harzburgite and lherzolite subtypes in ophiolitic and oceanic environments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **76**, 84-92.
- Bodinier, J.L., Vasseur, G., Vernieres, D.C. and Fabries, J., 1990, Mechanism of mantle metasomatism: geochemical evidence from the Lherz orogenic peridotite. *Jour. Petrol.*, **31**, 597-628.
- Dick, H.J.B., 1977, Partial melting in the Josephine peridotite, Part 1: The effect on mineral composition and its consequence for geobarometry and geothermometry. *Amer. Jour. Sci.*, **277**, 801-832.
- Green, D.H., 1973, Experimental studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-undersaturated and water-saturated conditions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 37-53.
- Hanson, G. N. and Langmuir, C.H., 1978, Modeling of major elements in mantle-melt systems using trace element approaches. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 725-741.
- Harte, B., Hunter, R.H. and Kinny, P.D., 1993, Melt geometry, movement and crystallization, in relation to mantle dykes, veins and metasomatism. *Phil. Trans. R. Soc. Lond., Series A*, **342**, 1-21.
- Hopson, C.A., Coleman, R.G., Gregory, R.T., Pallister, J. S. and Bailey, E.H., 1981, Geologic section through the Semai ophiolite and associated rocks along a Muscat-Ibra transect, Southeastern Oman Mountains. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 2527-2544.
- Irving, A.J., 1980, Petrology and geochemistry of compo-

- site ultramafic xenoliths in alkalic basalts from the southwestern United States and eastern Australia and implication for magmatic processes within the mantle. *Amer. Jour. Sci.*, **280-A**, 389-426.
- Jaques, A.L. and Green, D.H., 1980, Anhydrous melting of peridotite at 10-15kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**, 287-310.
- Kelemen, P.B., 1990, Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite. *Jour. Petrol.*, **31**, 51-98.
- Kelemen, P.B., Dick, H.J.B. and Quick, J.E., 1992, Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature*, **358**, 635-641.
- Kelemen, P.B., Shimizu, N. and Salters, V.J.M., 1995, Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature*, **375**, 747-753.
- Lago, B.L., Rabinowicz, M. and Nicolas, A., 1982, Podiform chromite ore bodies : a genetic model. *Jour. Petrol.*, **23**, 103-125.
- Menzies, M.A. and Dupuy, C., 1991, Orogenic massifs : protholith, process and provenance. *Jour. Petrol., Special Lherzolite Issue*, 1-16.
- Mercier, J.-C.C. and Nicolas, A., 1975, Textures and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by basalt xenoliths. *Jour. Petrol.*, **16**, 454-487.
- Mysen, B.O. and Kushiro, I., 1977, Compositional variation of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. *Amer. Mineral.*, **62**, 843-865.
- Nicolas, A., 1986, A melt extraction model based on structural studies in mantle peridotites. *Jour. Petrol.*, **27**, 999-1022.
- Nicolas, A., 1989, *Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Kluwer Dordrecht, 367p.
- Nicolas, A. and Prinzhofer, A., 1983, Cumulative or residual origin for the transition zone in ophiolites : structural evidence. *Jour. Petrol.*, **24**, 188-206.
- Niida, K., 1974, Structure of the Horoman ultramafic massif of the Hidaka metamorphic belt in Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **80**, 31-44.
- Niida, K., 1975, Textures and olivine fabrics of the Horoman ultramafic rocks, Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **70**, 265-285.
- Niida, K., 1984, Petrology of the Horoman ultramafic rocks. *Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. IV*, **21**, 61-81.
- Quick, J.E., 1981, Petrology and petrogenesis of the Trinity peridotite, an upper mantle diapir in the Klamath Mountains, northern California. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 11837-11863.
- 塩谷由美・新井田清信, 1997, 幌満かんらん岩体の苦鉄質岩層の起源. 地質学論集, no.47, (本論集).
- Streckeisen, A., 1973, Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geotimes*, **18**, 26-30.
- Takahashi, E., 1986, Melting of a dry peridotite KLB-1 up to 14 GPa : implications on the origin for peridotitic upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 9367-9382.
- Takahashi, N., 1991, Origin of three peridotite suites from Horoman peridotite complex, Hokkaido, Japan : Melting, melt segregation and solidification processes in the upper mantle. *Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **86**, 199-255.
- Takahashi, N., 1992, Melt segregation by crack formation observed in the Horoman mantle peridotite complex. *Nature*, **359**, 52-55.
- Takazawa, E., Fray, F.A., Shimizu, N., Obata, M. and Bodinier, J.L., 1992, Geochemical evidence for melt migration and reaction in the upper mantle. *Nature*, **359**, 55-58.
- Wells, P.R.A., 1979, Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **62**, 129-139.
- Wood, B.J. and Banno, S., 1973, Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **42**, 109-124.

(要旨)

新井田清信・塩谷由美, 幌満かんらん岩に記録されたマグマチャネリング様式：メルト成分の溜濁や付加で生じた置換性かんらん岩, 1997, 地質学論集, no. 47, 139-147. (Niida, K. and Shiotani, Y., 1997, Modes of magma channeling recorded in the Horoman peridotites : Replacive peridotites formed by melt extraction and addition. *Mem. Geol. Soc. Japan.*, no.47, 139-147.)

幌満かんらん岩体上部には, 2つの異なるマグマチャネリング様式が認められる. 斜長石レルゾライト中の苦鉄質岩タイプ GBI の周囲で観察されるチャネリング様式は, 壁岩かんらん岩から部分融解メルトが抽出され, 壁岩にメルト成分の溜濁を生じた様式 (1)である. もう1つは, スピネルダナイト中に貫入したウェブステライトダイクの周囲で観察される様式で, 壁岩かんらん岩の溜濁を伴わずに通過マグマから一方的にメルト成分が付加した様式(2)である. このような様式の違いは, チャネリングマグマの温度と壁岩かんらん岩のソリダス温度の差によって生じたと考えられ, 様式 (1)のチャネリングマグマの温度は斜長石レルゾライト壁岩のソリダス温度よりも約80°C高かったこと, 様式(2)のチャネリングマグマの温度はスピネルダナイト壁岩のソリダス温度よりも低かったことが議論された.