超高圧変成作用のジルコンインクルージョン法 による温度圧力時間経路

片山 郁 夫*

P-T-time Path of Ultrahigh-Pressure Metamorphism Induced by Zircon Inclusion Method

Ikuo KATAYAMA *

Abstract

Zircon is an excellent capsule to protect primary evidences of the ultrahigh-pressure(UHP) metamorphism, whereas mineralogic evidences of the UHP conditions were mostly obliterated in the matrix minerals of the rock due to the extensive retrograde overprinting related to exhumation. Zircons from the Kokchetav UHP-HP massif contain numerous inclusions of graphite, quartz, garnet, clinopyroxene, phengite, phlogopite, rutile, albite, K-feldspar, amphibole, zoisite, kyanite, calcite, dolomite, apatite and monazite, as well as diagnostic UHP minerals, microdiamond and coesite, which are identified by laser Raman spectroscopy. The diamond inclusions coexist with coesite and garnet, and appear also with low-pressure minerals, especially graphite in single zircon grains with zonal arrangements. Internal structure of zircon displays distinct zonal fabrics, which comprise inherited core, wide mantle and outer rim, each with distinctive inclusion micro-assemblages. These observations indicated that zircon has been grown at several distinct stages including UHP mineral-bearing mantle, low-pressure mineral-bearing rim and inherited core containing low-pressure minerals. Sensitive high resolution ion micro-probe (SHRIMP) analyses of the zoned zircons resulted four discrete ages of the Kokchetav ultrahigh-pressure metamorphic rocks (1) Middle Proterozoic protolith age, $(2)537 \pm 9$ Ma for the UHP metamorphism, $(3)507 \pm 8$ Ma for the late-stage amphibolite facies overprint, and (4) 456 461 Ma for the post-orogenic thermal events. The zircon inclusion method presented here is a comprehensive technique to demonstrate the history of ultrahigh-pressure metamorphic rocks, and can be applied to understand P-T-time history of other UHP-HP metamorphic terranes.

Key words : ultrahigh-pressure metamorphism, zircon, P-T-time path, continental collision zone

キーワード:超高圧変成作用,ジルコン,温度圧力時間経路,大陸衝突帯

^{*} エール大学地質地球物理学科

^{*} Department of Geology and Geophysics, Yale University

I.はじめに

超高圧変成岩は大陸衝突型造山帯に多く報告さ れ,ダイヤモンドもしくはコーズ石を含むことか ら少なくとも100 km 以深まで沈み込み その後地 表まで戻ってきた岩石である。そのため, 超高圧 変成岩は非常に複雑なそして広範囲の温度圧力条 件を経験している。しかしながら,地表に上昇す る過程での後退変成作用の影響が大きく,高圧条 件での変成ピークやそれ以前の証拠はほとんど失 われているという問題点が挙げられる。とくに, ダイヤモンドやコーズ石などの超高圧変成作用の 指標鉱物の存在は稀であり,その多くはザクロ石 やジルコン等の包有物(インクルージョン)とし てのみ残存する。このため,従来の鉱物相平衡を 用いた岩石学的手法ではこれらの岩石は中圧型変 成作用の条件しか示さず,そのような温度圧力経 路が大陸衝突型変成作用の典型とされていた (例 えば,都城,1965)。しかし, Chopin によるザク ロ石中のコーズ石の発見(西アルプスにおいて: Chopin, 1984) 以降多くの衝突型造山帯において 鉱物インクルージョンとして超高圧変成作用の証 拠が確認されるようになった(例えば, Liou et al., 2004)。これらの事実は従来の大陸衝突型変 成作用の温度圧力経路を根本的に覆し,高圧変成 岩の温度圧力決定には主要構成鉱物の組織および 組成だけでなく鉱物中のインクルージョンを詳細 に調べる必要性を示した。

このように,高圧変成岩の温度圧力経路につい ては鉱物インクルージョンが盛んに議論されるよ うになったが,なかでもジルコンは以下の特徴か らホスト鉱物として優れている。(1)広範囲の温 度圧力条件で安定(<100kbar,<2500),(2) 物理的に非常に硬い(剛性率は109GPa),(3) 泥質および花崗岩質変成岩において普遍的な鉱物 である(4)U-Pb年代測定を適用できる。したがっ て,ジルコンは複雑な高圧変成岩の温度圧力経路 をインクルージョンとして保存することができ, 且つ同位体年代測定によりその温度圧力経路に時 間軸を入れることができる有能な鉱物といえる。 本稿ではこのジルコンインクージョン法を用い, ダイヤモンドを多産する等から超高圧変成帯の中 でも最も高圧条件(Okamoto *et al.*, 2000 による と70 kbar)を経験したとされるカザフスタン北部 のコクチェタフ超高圧変成帯の温度圧力時間経路 を議論する。

II.ジルコン中に観察されるインクルージョン

コクチェタフ変成帯から採取した約250個の岩 石試料をそれぞれ別々に粉砕し,磁選及び重液分 離等の行程を経て合計 8000 粒のジルコンを選別 した。ジルコンの形態は主に自形から半自形であ るが,高変成度の岩石では角がなく楕円体を呈す るジルコンが多く観察される。ジルコンの粒径は 100 µm 程度であり,確認されるインクルージョ ンは一般に非常に細粒(~10 µm)である。その ため,インクルージョンの分析には主にレーザー ラマン分光器を用いた。ジルコン中のインクルー ジョンとしてはダイヤモンドやコーズ石などの超 高圧鉱物に加えて,石墨,石英,ザクロ石,オン ファス輝石,ひすい輝石,角閃石,ゆうれん石, 藍晶石,ルチル,白雲母,金雲母,曹長石,カリ 長石,方解石,苦灰石,燐灰石,モナズ石(合計 20種)が確認された。ジルコン中に存在するイン クルージョンの顕微鏡写真を図1に,いくつか代 表的なサンプルのインクルージョンの組合せを表 1 に示す。

ジルコン中に確認されるダイヤモンドは自形の 八面体のものから多結晶の集合体を示すものまで その形態は多岐にわたる。これらのラマンスペク トルは1330 cm ⁻¹付近の非常に顕著なピークで特 徴づけられる(図2)。ダイヤモンドと接し共存す る鉱物としては単斜輝石,ザクロ石および金雲母 などが確認される。ダイヤモンドは同岩石中のザ クロ石や単斜輝石のインクルージョンとしても確 認される。なお Sobolev and Shatsky(1990)に よると,これらダイヤモンドは非常に低い炭素同 位体比(13 C= - 10.4 ~ - 21.6‰)を示し,その 起源は地殻物質中の有機物である可能性が高いと 報告されている。コーズ石は卵型をした単結晶と してジルコン中に確認される(図1)。そのような コーズ石の産状はザクロ石中など他の鉱物中に観



図 1 ジルコン中のダイヤモンドおよびコーズ石インクルージョンの顕微鏡写真. ホスト鉱物はすべてジルコン.

Fig. 1 Photomicrographs showing diamond and coesite inclusions in zircon. Host minerals are zircon.

Sample No.	Rock type	Dia	Grp	Coe	Qtz	Grt	Phn	Phl	Rt	Ab	Kfs	Amp (Срх	Ky	Cal	Dol	Ap
A8	pelitic gneiss	+	+	+	+	+			+				+				+
A12	pelitic gneiss	+	+	+	+		+							+			
A28	pelitic gneiss		+		+	+	+		+	+							
A21	eclogite			+	+	+			+	+		+	+				+
A60	eclogite			+	+	+			+				+				+
H2	pelitic gneiss	+		+		+									+		
H5	pelitic gneiss	+	+												+		
K18	pelitic gneiss		+		+		+				+						+
N21	marble	+	+	+		+		+				+	+		+	+	+

表 1 コクチェタフ超高圧変成帯のジルコン中に確認される鉱物インクルージョン. Table 1 Mineral inclusions in zircon from the Kokchetav UHP massif.

察されるものとは異なる。例えば,ザクロ石中で はコーズ石自身はほとんど残存せず石英に転位し ており,その反応による体積変化のためザクロ石 中に放射状の割れ目がよく確認される。この観察 事実はジルコンが他の鉱物に比べてとくに優れた ホスト鉱物であることを如実に表している。ジル コン中のコーズ石は524 cm⁻¹の顕著なラマン ピークと 271 cm⁻¹,182 cm⁻¹および 149 cm⁻¹の比 較的弱いピークで特徴づけられる。一方,ザクロ 石中に確認されるコーズ石ではピークが若干低波 数側(520 cm⁻¹)に出現する。高圧その場観察実 験によるとコーズ石のラマンピークが圧力増加に 伴い高波数側にシフトすることから(Hemley, 1987),ジルコン中に観察されるコーズ石は現



- 双方ともホスト鉱物であるジルコンのピー ク(360 cm⁻¹,44 cm⁻¹,1010 cm⁻¹)を含む.
- Fig. 2 Raman spectra of (a) diamond and (b) coesite. Inclusion spectra always contains host zircon peaks at 360 cm⁻¹, 440 cm⁻¹ and 1010 cm⁻¹.

在も高圧条件を維持していると解釈されている (Parkinson and Katayama, 1999)。

図3ではジルコン中に確認されるインクルー ジョンとその母岩である泥質片麻岩を構成する主 な鉱物組合せを表す。上述のように,ジルコン中 にはダイヤモンドやコーズ石などの超高圧鉱物が 確認される一方,泥質変成岩のマトリックスには 超高圧の証拠は残されていない。そのため,マト リックスの鉱物組合せを用いると変成条件は主に 角閃岩相を示す。これは泥質片麻岩など間隙や含 水鉱物が多い岩石では地表に上昇する際の後退変 成作用の影響が著しいためと考えられる。ジルコ ンインクルージョンによればコクチェタフ変成帯 は変成度の高い順にダイヤモンドエクロジャイト 相,コーズ石エクロジャイト相,石英エクロジャ イト相,高圧角閃岩相に分帯することができるが, マトリックス鉱物の組合せではその違いが有意と はいえない。これは超高圧変成岩における従来の 相平衡解析に従う変成分帯の限界を意味している

(a) Mineral inclusion in zircon

metamorphic zone mineral	DEC	CEC	QEC	HAMP
diamond graphite coesite				
quartz clinopyroxene				
K-feldspar				
phengite				
biotite rutile				
kyanite apatite				
monazite				

(b) Host metapelite

metamorphic zone mineral	DEC	CEC	QEC	HAMP
diamond				
graphite				
coesite				
quartz				
clinopyroxene				
plagioclase				
K-feldspar				
garnet				
phengite				
biotite				
rutile				
kyanite				
sillimanite				
zoisite				
epidote				
chloritoid				
apatite				
monazite				
zircon				

DEC: diamond-eclogite zone, CEC: coesite-eclogite zone, QEC: quartz-eclogite zone, HAMP: high-pressure amphibolite zone

- common ----- rare

- 図 3 ジルコン中のインクルージョン(a)とその 母岩(b)の鉱物消長図.
- Fig. 3 Mineral assemblages in(a)zircon and(b) host metapelites.

のだろう。なお,ジルコン中には高圧鉱物だけで なく低圧条件で安定なインクルージョンも出現す るが,これは後の項で詳しく述べる。ここまで, とくに泥質変成岩について述べてきたが,塩基性 変成岩では変成ピーク時の高圧条件での鉱物組合 せが比較的よく保存されている(Ota *et al.*, 2000)。 しかしながら,やはりコーズ石などの超高圧鉱物 はインクルージョンに限られるため,温度圧力解 析にはマトリックス鉱物だけでなくインクルー ジョン鉱物が必要となる。

次にインクルージョンに確認される鉱物の化学 組成を簡単に述べる。高圧変成岩ではマトリック ス鉱物中によく離溶組織が確認される。そのよう な組織は一般に減圧(減温)過程に発達したと解 釈されている (Liou et al., 1998)。例えば, エク ロジャイト中のオンファス輝石中には[010]方位 に平行な石英の離溶が見られる。一方で同岩石の ジルコン中に確認されるオンファス輝石にはその ような離溶組織は見られない。そのため,インク ルージョンのオンファス輝石は石英を離溶する前 の鉱物組成を保持していると期待される。電子線 マイクロアナライザーで分析した結果,両者の間 にはCa-Eskola 成分という格子欠陥を持つ輝石端 成分において顕著な違いが見られ,インクルー ジョンでは最大 9.6 mol %の Ca-Eskola 成分を固 溶していた (マトリックスでは平均 1.3 mol%)。 高温高圧合成実験によるとCa-Eskola成分は高圧 下でのみ単斜輝石に固溶すると報告されており (Mao, 1971), マトリックスでのオンファス輝石 に石英の離溶が発達するのはこの Ca-Eskola 成分 が低圧条件で分解したためと解釈できる(Katayama et al., 2000)。また,ジルコン中に確認され るザクロ石および白雲母はマトリックスに確認さ れるものに比べ組成バリエーションがあり, それ ぞれパイロープ成分(~28 mol%)およびセラド ナイト成分 (Si~3.51 p.f.u.) に富んでいる。こ れらはマトリックスの鉱物が後の後退変成の影響 を顕著に被り低圧条件で再平衡に達しているのに 対し,ジルコン中のインクルージョンが後退変成 の影響を受けず変成ピーク時の鉱物組成を保持し ていることを意味している。

III.ジルコン累帯構造とU-Pb年代測定

ジルコンインクルージョンにはダイヤモンドや コーズ石などの高圧鉱物とともにその低圧多形鉱 物である石墨や石英も同一のジルコン中に確認さ れる(表1)。これらの共存は一見矛盾するように

思えるが,実は以下のようにジルコンの累帯構造 と密接な関係を持っている。カソードルミネッセ ンスおよび二次電子像の観察ではジルコンは顕著 な累帯構造を示す。ダイヤモンドを産出する泥質 片麻岩においてはジルコンは主に暗色のマントル 部とそれを取り囲む薄いリム部から構成される (図4)。また, 蛍光が強くメタミクト組織を示す コアも稀に観察される。ダイヤモンドなどの高圧 鉱物は主にマントル部に出現し,一方石墨や石英 などの低圧鉱物は主にリム部に確認される。蛍光 の強いコアにはインクルージョンはほとんど存在 しないが,稀にアパタイトや石英が観察される。 この累帯構造とインクルージョンの関係はジルコ ンが様々な温度圧力条件で成長したことを示唆し ている。また,ジルコンの希土類元素パターンも 上記の観察事実に調和的な結果を示す。図5は累 帯構造を持つジルコンの希土類元素パターンを示 しており 高圧鉱物を含むマントル部が Eu 負の異 常を示さないのに対し,低圧鉱物(斜長石を含む) が出現するリム部は若干の Eu 負の異常が確認さ れる。また,コアは顕著な Eu 負の異常を示し且 つ重希土元素に富んだパターンを示す。以上から, ジルコンのコアは比較的低圧条件もしくは火成岩 起源であり , ダイヤモンドなどを含むマントル部 は超高圧変成作用時に成長し、その外側のリム部 は後の低圧後退変成作用時に累帯成長したと考え られる。どのような機構でジルコンが成長したか は明らかではないが,高圧変成時にはジルコニウ ムを多く固溶できる黒雲母および角閃石の脱水分 解が,後退変成時にはジルコニウムを含んだ流体 による加水作用が有力である。

以上,ジルコンが温度圧力条件の異なる様々な ステージで成長したことが明らかになったが,次 にそれぞれのステージに時間軸を入れるためジル コンの U-Pb 年代測定を行った。分析には広島大 学設置の二次イオン質量分析計(SHRIMP II)を 用いた。測定時のビームサイズは約20µmを用い たため,観察される累帯構造の領域を別々に分析 することができた。なお,分析後には測定スポッ トを観察し,異なる領域を混同していないか確認 した。その結果を²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb と²³⁸U/²⁰⁶Pb の同位体



図 4 累帯構造を持つジルコンのカソードルミネッセンス像.

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons showing internal zonal structure.



希土類元素パターン . Fig. 5 Rare earth element (REE) pattern of

rig. 5 Kare earth element (REE) pattern o zircon normalized to chondrite.

比を軸にとる Tera-Wasserburg 図にプロットし た(図6)。ダイヤモンドなどの高圧鉱物を包有す るマントル部はコンコーディア(年代一致曲線) にのり,550 530 Maの年代を示した。一方,低 圧鉱物を包有するリム部はマントル部に比べ若干 若い年代値を示し,520 490 Ma および 470 450 Maに集中する。ジルコン中に稀に観察されるコア 部は明らかに古い年代値(1400 1100 Ma)を示 すものとコンコーディアから外れるものが観察さ れた。コンコーディアから外れるデータは 500 Ma 頃に鉛を失い始めたと仮定すると(ディスコー ディア)およそ1400 Maの年代値が得られ,他の コアの領域と調和的な年代を示す(図6)。

VI.超高圧変成岩の温度圧力時間経路

以上の結果をもとにダイヤモンドを産するコク チェタフ超高圧変成岩の温度圧力時間経路を議論 する。ジルコン中のインクルージョンの分布と同 位体年代測定の結果からこれら超高圧変成岩の変 成経路を少なくとも以下の4つのステージに分類 することができる。

1) 原岩形成

メタミクト組織を示すジルコンのコアはダイヤ モンドを含むマントル部などに比べ明らかに古い 年代値(1400 1100 Ma)を示す。これは大陸の 衝突に関係する一連の変成作用の前にこのコア領 域が形成されたことを意味している。これらのジ ルコンのコア部には高圧鉱物は確認されないこと から,この領域は火成作用もしくは低圧の変成作 用の時に成長したのだろう。希土類元素パターン は顕著な Eu 負の異常を示し且つ重希土類元素に 富んでいることから斜長石の安定領域において形 成したといえる。また,年代値が若干ばらつくの は原岩の堆積岩が形成時期の異なる岩石片を含ん でいたためであろう。

2) 超高圧変成作用の変成ピーク

ジルコンのマントル部はダイヤモンドやコーズ 石などの高圧鉱物インクルージョンを含むことか



図 6 (a) Tera-Wasserburg 図にプロットしたジルコン累帯領域ごとの年代測定結果. (b) 異なる累帯領域²⁰⁶Pb/²³⁸U 年代ヒストグラム.



ら超高圧変成作用時に成長した領域である。また, これらの領域にはザクロ石と単斜輝石が共存し, Fe-Mg 元素分配を用いて温度を見積もると 920 が得られる。これはエクロジャイト中の 1020 マトリックスに存在するザクロ石と単斜輝石(両 者ともコアの組成を用いた)から見積もった温度 (920 1000)とほぼ調和的である。圧力に関し ては,ダイヤモンドの安定領域から 40 kbar 以上 であると推定されるが,これは圧力条件の下限を 示しているに過ぎない。炭酸塩岩から分離したジ ルコン中には,K₂O(~0.54 wt%)を固溶する単 斜輝石が金雲母と共存している様子が確認される。 単斜輝石中のK₂O含有量は圧力とともに増加する と報告されており,Luth(1997)による金雲母と 単斜輝石系での高圧高温実験と比較すると,圧力 は約 60 kbar と推定される。またエクロジャイト から分離したジルコン中のオンファス輝石が Ca-Eskola 成分を固溶すること(最大で 9.6 mol %) も高圧の証拠であり,玄武岩組成の合成実験から およそ 60 80 kbar と見積もられる。一方,エク ロジャイトのザクロ石中にも K₂O を含む単斜輝石

が報告されており,最大圧力は70kbarであると 報告されている(Okamoto et al., 2000)。また, 炭酸塩岩中のチタナイトにはコーズ石の離溶組織 が確認され,チタナイトは高圧条件でのみシリカ を固溶することから,圧力は60kbar以上である と推定されている(Ogasawara et al., 2002)。本 研究により見積もられたコクチェタフ超高圧変成 岩の変成ピーク温度圧力条件をこれまでに報告さ れている条件とともに図7に示してある。

これらの超高圧鉱物を含むジルコンのマントル 部からは 537 ± 9 Ma の年代値が得られ,これは 本変成帯が超高圧変成作用を被った年代を意味し ている。これまでにもジルコンの U-Pb 年代が Claoue-Long らにより報告されているが(530 ± 7Ma: Claoue-Long *et al.*, 1991),彼らはジルコ ンの累帯構造を観察せず得られた年代値の平均か ら変成年代を見積もっている。このため,その年 代値は変成ピークや後退変成時など異なるステー ジの混合年代である可能性が高い。一方,エクロ ジャイトを構成するザクロ石と単斜輝石からは 533 ± 20 Ma の Sm-Nd 鉱物アイソクロン年代が



図 7 コクチェタフ超高圧変成岩の温度圧力時間経路. 本研究の結果とともに同地域でこれまでに報告されている温度圧力経路も示す.なお, 変成相は Okamoto and Maruyama (1999)から引用した.



報告されており (Shatsky *et al.*, 1999), この年 代値は本研究で得られた超高圧変成作用時年代と 調和的である。

3)角閃岩相での後退変成作用

マトリックスの鉱物組合せや組織から,これら 超高圧変成岩が角閃岩相での後退変成作用を強く 被っているのは明らかである。例えば,泥質片麻 岩は主にザクロ石,石英,白雲母,斜長石から構 成され,またエクロジャイトではザクロ石や単斜 輝石の周囲にそれぞれ黒雲母と角閃石や斜長石と 角閃石から成るシンプレクタイトが顕著に発達し ている。Zhang らはこれらの組織および鉱物組成 から後退変成作用の条件を680 790 ,~10 kbar と見積もっている(Zhang *et al.*, 1997)。ジルコ ンにはダイヤモンドインクルージョンを含む領域 の外側に石英や斜長石などの低圧鉱物を含むリム が観察される。このリム部には高圧鉱物が出現し ないことから,超高圧変成作用後の後退変成作用 時に成長した領域と解釈できる。この領域に出現 する緑泥石インクルージョンはマトリックスでの ザクロ石反応縁に観察される緑泥石と似た組成を 持つ。ザクロ石と緑泥石の Fe-Mg 分配によると 温度は 740 830 と見積もられる。また,このジ ルコンリム部の希土類元素パターンが若干の Eu 負の異常を示すこともこの領域が低圧条件で形成 したことを支持する。

これらジルコンのリム部は 507 ± 8 Ma の年代 値を示す。上記の議論から,これは後退変成作用 の年代を表している。同地域では,泥質変成岩中 の白雲母と黒雲母の Ar/Ar 年代がそれぞれ 517 ± 5 Ma および 516 ± 5 Ma と報告されている(Shatsky *et al.*, 1999)。インクルージョンから推定さ れる後退変成条件は雲母 Ar/Ar の閉鎖温度である 300 400 よりやや高温条件だが,両者の年代は 誤差を含め近い値を示す。

4) 花崗岩貫入などによる二次的な熱イベント

ジルコンのリム部には 470 450 Ma の年代値を 示す領域がいくつか確認される。これらは上記の 後退変成作用の年代より明らかに若く,後退変成 作用後に何らかの熱イベントによって成長したと 考えられる。同地域にはオルドビス紀からシルル 紀にかけての花崗岩バソリスが多く貫入しており (Dobretsov *et al.*, 1995), これらの若いジルコン は花崗岩貫入などの熱源により成長した可能性が 高い。

以上,ジルコン中のインクルージョンと累帯構 造および同位体年代測定を組み合わせることによ リ,超高圧変成岩の温度圧力時間経路を読み取る ことができた。従来は閉鎖温度の異なる同位体元 素および鉱物を用いて,高圧変成岩の温度圧力時 間経路が議論されてきたが,ここではジルコンの U-Pb 法のみから異なるステージに時間軸を入れ られることを示した。ジルコンは堆積岩起源の変 成岩に普遍的な副成分鉱物であるため,他の変成 帯においても同様にこの手法を応用することがで きるであろう。なお,今回の結果からコクチェタ フ超高圧変成岩の上昇速度を見積もると5mm/yr が得られる。これは超高圧変成岩が断熱的な上昇 経路を示す結果と調和的である (Zhang et al., 1997; Okamoto et al., 2000)。このような上昇速 度は地表の削剥侵食による高圧変成岩の露出では

説明することができず, テクトニックな機構で高 圧変成岩が上昇する必要性を示唆している。超高 圧変成岩の出現は大陸衝突帯に限られることから も(例えばLiou *et al.*, 2004), 密度の低い大陸地 殻の沈み込みと何らかの関係があると予想される。

V.ま と め

超高圧変成岩では地表に上昇する際の後退変成 作用の影響が強く,初生的な高圧条件での痕跡は ほとんど失われている。しかし,ジルコン中のイ ンクルージョンは後退変成作用の影響をほとんど 被らず,ダイヤモンドやコーズ石を含む超高圧変 成作用の証拠を保持していた。また,ジルコン中 には高圧鉱物のみならず低圧で安定な鉱物も確認 され,それらインクルージョンの分布はジルコン の累帯構造と密接に関係していた。これはジルコ ンが超高圧条件を含む様々なステージにおいて形 成成長したことを意味している。これらのインク ルージョンおよびその鉱物組成と同位体年代測定 を組み合わせることにより、ここでは超高圧変成 岩の温度圧力時間経路を決定できることを示した。 これらの結果は変成岩の主要構成鉱物による相解 析だけでなく,ジルコンなど物理的に硬い鉱物中 のインクルージョンの解析が高圧変成岩の変成経 路決定には必要不可欠であることを意味している。

謝辞

本研究を進めるにあたり,東京工業大学の丸山茂徳教 授には貴重なご教示を頂いた。コクチェタフ地質調査所 のAnton Zayachkovsky氏には野外および室内作業に おいてご協力頂いた。広島大学の佐野有司教授(現:東 京大学海洋研究所)および寺田健太郎博士には同位体分 析の際に,東京工業大学の飯塚 毅氏には微量元素測定 の際にご協力頂いた。横浜国立大学の金子慶之博士,台 湾科学院の岡本和明博士および岡山大学固体地球内部セ ンターの太田 努博士には有益な助言を頂いた。東京大 学の鳥海光弘教授には本稿を発表する機会を頂いた。ま た,2名の匿名査読者からは本稿に対し有益なコメント を頂いた。これらの方々に深く感謝します。なお,本研 究に日本学術振興会特別研究員の研究奨励金を使用した。

- Chopin, C.(1984) Coesite and pure pyrope in highgrade blueschists of the western Alps: A first record and some consequences. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 107–118.
- Claoue-Long, J.C., Sobolev, N.V., Shatsky, V.S. and Sobolev, A.V. (1991): Zircon response to diamond pressure metamorphism in the Kokchetav massif, USSR. *Geology*, **19**, 710–713.
- Dobretsov, N.L., Sobolev, N.V., Shatsky, V.S., Coleman, R.G. and Ernst, W.G. (1995) Geotectonic evolution diamondiferous paragneisses, Kokchetav Complex, northern Kazakhstan: The geologic enigma of ultrahigh-pressure crustal rocks within a Paleozoic foldbelt. *The Island Arc*, 4, 267 79.
- Hemley, R.J.(1987) Pressure dependence of Raman spectra of SiO₂ polymorphs: A-quartz, coesite and stishovite. In Manghani, M.H. and Syono, Y. eds.: *High-Pressure Research in Mineral Physics.* Amer. Geophys. Union, 347 359.
- Katayama, I., Parkinson, C.D., Okamoto, K., Nakajima, Y. and Maruyama, S. (2000) Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *Amer. Mineral.*, **85**, 1368 1374.
- Liou, J.G., Zhang, R.Y., Ernst, W.G., Rumble, D. and Maruyama, S. (1998) High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. In Hemley, R.J. ed.: Ultrahigh-pressure Mineralogy: Physics and Chemistry of the Earth's Deep Interior. Rev. Mineralogy, 37, 33 96.
- Liou, J.G., Tsujimori, T., Zhang, R.Y., Katayama, I. and Maruyama, S. (2004) Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model. *Inter. Geol. Rev.*, 46, 1 27.
- Luth, R.W. (1997). Experimental study of the system phlogopite-diopside from 3.5 to 17 GPa. *Amer. Mineral.*, 82, 1198 1209.
- Mao, H.K. (1971) The system jadeite (NaAlSi₂O₆)anorthite(CaAl₂Si₂O₈) at high pressures. *Carnegie Inst. Year Book*, **69**, 163–168.
- 都城秋穂(1965) 変成岩と変成帯 . 岩波書店 .
- Ogasawara, Y., Ohta, M., Fukasawa, K., Katayama, I. and Maruyama, S. (2000) Diamond-bearing and diamond-free metacarbonate rocks from Kumdy-kol in the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, **9**, 400 416.

Ogasawara, Y., Fukasawa, K. and Maruyama, S.

(2002) Coesite exsolution from titanite in UHP marble from the Kokchetav Massif. *Amer. Mine-ral.*, **87**, 452 461.

- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1999). The highpressure synthesis of lawsonite in the MORB+ H₂O system. *Amer. Mineral.*, **84**, 362–373.
- Okamoto, K., Liou, J.G. and Ogasawara, Y. (2000). Petrological study of the diamond grade eclogite in the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, **9**, 379–399.
- Ota, T., Terabayashi, M., Parkinson, C.D. and Masago, H. (2000). Thermobaric structure of the Kokchetav UHP-HP massif deduced from a northsouth traverse in the Kulet and Saldat-kol regions, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, **9**, 328 357.
- Parkinson, C.D. and Katayama, I. (1999) Present day ultrahigh-pressure conditions of coesite inclusions in zircon and garnet: Evidence from laser Raman microspectroscopy. *Geology*, 27, 979 982.
- Shatsky, V.S., Sobolev, N.V. and Vavilov, M.A. (1995) Diamond-bearing metamorphic rocks of the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. In Coleman, R.G. and Wang, X. eds.: Ultrahigh Pressure Metamorphism. Cambridge Univ. Press., 427 455.
- Shatsky, V.S., Jagoutz, E., Sobolev, N.V., Kozmenko, O.A., Parkhomento, V.S. and Troesch, M. (1999). Geochemistry and age of ultra-high pressure rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **137**, 185 205.
- Sobolev, N.V. and Shatsky, V.S. (1990): Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks. *Nature*, **343**, 742–746.
- Terabayashi, M., Ota, T., Yamamoto, H. and Kaneko, Y. (2002) Contact metamorphism of the Daulet Suite by solid intrusion of the Kokchetav HP-UHPM slab. *In* Parkinson, C.D., Katayama, I., Liou, J.G. and Maruyama, S. eds: *The Diamond-Bearing Kokchetav Massif, Kazakhstan.* Univ. Acad. Press, 413 426.
- Zhang, R.Y., Liou, J.G., Coleman, R.G., Ernst, W.G., Sobolev, N.V. and Shatsky, V.S. (1997). Metamorphic evolution of diamond-bearing and associated rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. J. Metamor. Geol., 15, 479 496.

(2004年6月14日受付,2004年9月3日受理)