

氏名	Otgonkhuu Javkhlan		
学位の種類	博士（理学）		
学位記番号	総博甲第96号		
学位授与年月日	平成26年9月26日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項		
文部科学省報告番号	甲第525号		
専攻名	マテリアル創成工学専攻		
学位論文題目	Metamorphism of eclogites and associated metamorphic rocks in the Chandman district, Lake Zone, SW Mongolia (モンゴル南西部チャンドマン地域レイク帯のエクロジヤイトと関連する変成岩類の変成作用)		
論文審査委員	主査	島根大学教授	高須 晃
		島根大学教授	赤坂 正秀
		島根大学教授	三瓶 良和
		島根大学准教授	亀井 淳志

論文内容の要旨

Chandman district is located in the southeast part of Lake Zone, SW Mongolia, which is situated in the Central Asian Orogenic Belt. Chandman district consists of four major geologic units, i.e. Neoproterozoic ophiolites of Khantaishir Formation, eclogite-bearing orthogneisses of the Alag Khadny metamorphic complex, marbles of the Maykhan Tsakhir Formation, which lie in contact with eclogite bodies, and the basement block of the Zamtyn Nuruu Formation.

Eclogites in the Chandman district have two modes of occurrences, i.e. lenses and boudins of eclogites surrounded by orthogneisses of the Alag Khadny metamorphic complex (eclogite-1) and eclogites in marbles of the Maykhan Tsakhir Formation (eclogite-2). The marbles contain small lenses of garnet-chloritoid schists, which occur close to a body of eclogite-2. Eclogite-1 is intruded by veins of orthogneisses.

Eclogite-1 consists mainly of porphyroblastic garnet (<2 mm), clinopyroxene (omphacite, aegirine-augite), sodic, sodic-calcic, and calcic amphiboles (glaucophanes, taramite, barroisite, winchite, pargasite, tschermakite, Fe/Mg-hornblende, and actinolite) with minor amounts of epidote, phengite, paragonite, plagioclase, biotite, K-feldspar, rutile, titanite, quartz, calcite, hematite, ilmenite and zircon. Eclogite-2 consists mainly of garnet (<0.3 mm), omphacite, and minor amounts of sodic-calcic calcic amphiboles (barroisite, Mg-taramite, tschermakite, pargasite, Mg-hornblende and actinolite), epidote, paragonite, plagioclase, chlorite, calcite, biotite, quartz, titanite and rutile.

Both eclogites (eclogite-1 and -2) experienced four metamorphic events i.e. precursor metamorphism (M1) of high-temperature amphibolite facies; high-pressure metamorphism (M2) of the eclogite facies; and medium-pressure metamorphism (M3) of the epidote-amphibolite facies. Some of eclogite-1 does not preserve the evidence of M3 metamorphism.

M1 event indicate an early and relatively high-temperature metamorphism before the eclogitic metamorphism. Porphyroblastic garnets of eclogite-1 show a prograde zoning. The core of the garnets contains polyphase and discrete grain inclusions of high TiO₂ (up to 1.32%) taramite, Fe-pargasite, tschermakite, aegirine-augite (Jd=13) + taramite + quartz, plagioclase (An<19) + biotite + epidote. Those inclusions indicate relatively high-temperature metamorphism of amphibolites facies conditions (M1).

M2 event with prograde and peak stages of metamorphism represents relatively high pressure and low temperature metamorphism of the blueschist to eclogite facies, causing continuous subduction resulted in cooling of the hangingwall after the initial early M1 event. The prograde and peak stages of the high-pressure metamorphic event (M2) is characterized by cores

of glaucophane in barroisites and coexisting assemblage of rim of garnets, omphacite ($Jd < 46\%$), phengite (6.51-7.11), barroisite, rutile and quartz, respectively. THERMOCALC (v.3.33) calculations for the peak stage of eclogite yielded P-T conditions of $565 \pm 69^\circ\text{C}$ and 22.5 ± 2.6 kbar. The retrograde stage of M2 is characterized by symplectite of sodic plagioclase ($An=1-18$) + amphibole \pm Na-poor clinopyroxene ($Jd=2-25$). These mineral assemblages give $450-560^\circ\text{C}$ and 4-11 kbar.

M3 event is represents medium pressure metamorphism. The M3 metamorphism is characterized by prograde zoned amphiboles with winchite, actinolite, tremolite core and barroisite rim. Large prograde zoned poikiloblastic barroisitic amphibole also developed in the eclogite-2. They contain inclusions of garnet, omphacite and symplectite of amphibole + clinopyroxene+sodic plagioclase suggesting that the amphiboles crystallized after the M2 metamorphism. The cores of the amphiboles indicate $300-400^\circ\text{C}$ and 3-8 kbar, whereas the rims indicate $>400-600^\circ\text{C}$ and 3-12 kbar.

Garnet-chloritoid schists consist mainly of garnet, chloritoid, phengite, chlorite and quartz, with minor amounts of kyanite, rutile, and zircon. Prograde zoned garnet and associated minerals suggest that garnet-chloritoid schists experienced pre-peak ($500-510^\circ\text{C}$ and 7-8 kbar) and peak stages ($560-590^\circ\text{C}$ and 10-11 kbar) of medium-pressure metamorphism, corresponding with M3 metamorphism of eclogites (-1 and -2).

The fourth metamorphic event (M4) defined in the amphibolized eclogites-1 can be corresponding with metamorphism of the vein-type orthogneisses which suffered two metamorphic events, i.e., first (M1) greenschist facies metamorphism ($\sim 380^\circ\text{C}$ and 3 kbar), second (M2) amphibolite facies metamorphism ($\sim 500^\circ\text{C}$ and 4 kbar). The P-T conditions of peak

stages of M1 and M2 for vein-type orthogneiss correspond to geothermal gradients of ~ 35 °C/km and ~ 30 °C/km, respectively. The peak temperature conditions of M2 event (~ 500 °C) for the vein-type orthogneiss are lower than peak temperature of M4 metamorphic event of intruded amphibolized eclogites-1 (550-640 °C) whereas the pressure conditions of vein-type orthogneiss (4 kbar) correspond with peak pressure of M4 for amphibolized eclogites-1 (2-5 kbar). This feature suggests that geothermal gradient of M4 metamorphic event of amphibolized eclogites-1 same as vein-type orthogneiss.

Trace elements of Ba, Ce, Nb, Sc, Sr, Y and Zr contents of eclogites are comparable with MORB compositions. Major and trace element compositions of eclogites are comparable with ophiolitic metabasalts of Khantaishir Formation. Khantaishir metabasalts are plotted in the field of calc-alkaline series by AFM diagram.

We obtained K-Ar ages of c. 500-480 Ma from the vein-type orthogneiss intruded into eclogite-1 as well as c. 500-460 Ma from the orthogneisses surrounding eclogite bodies. These ages indicate that an exhumation ages of eclogite-1 and vein-type orthogneisses.

Based on the textural and geochronological evidence, after the exhumation of eclogite blocks which were decoupled from subducted oceanic slab, eclogites were suffered by the medium-pressure prograde collisional metamorphism (M3) together with garnet-chloritoid schists. Metamorphosed orthogneisses intruding into and surrounding eclogite-1 suggest the M4 event of low-pressure metamorphism took place during the collision, and subsequent exhumation at c. 500-460 Ma.

The P-T-t evolution of the Chandman metamorphic rocks reconstructs the entire tectonic sequence from initiation of subduction (M1 and M2) to collision events (M3 and M4).

論文審査結果の要旨

本論文は、モンゴル南西部の Chandman 地域に分布する Lake 帯の高圧型変成岩類の変成岩岩石学的研究、地球化学的研究、及び地質年代学的研究を行い、それらの成果を総合して中央アジア造山帯中央部における高圧型変成岩の形成のテクトニクスを論じたものである。

Chandman 地域に分布するエクロジャイトには正片麻岩中のブロック（エクロジャイト-1）及び大理石中のブロック（エクロジャイト-2）の産状がある。組織と鉱物化学組成の研究より、エクロジャイト-1 の変成作用は M1~M4 の 4 回の変成イベントを経たことがわかる。M1 イベントはエクロジャイト相に達する高圧型変成作用にさきがけておこった低圧の角閃岩相変成作用である。M2 イベントは青色片岩相からエクロジャイト相に達する高圧型変成作用で特徴づけられ、ピーク変成条件は 565 ± 69 °C, 22.5 ± 2.6 kbar (TERMOCALC) に達した。M3 イベントは 400–600 °C, 3–12 kbar の中圧型変成作用であり、大理石中のブロックとして産するざくろ石-クロリトイド片岩のピーク変成作用（560–590 °C, 10–11 kbar）と調和的である。M4 イベントは低圧型変成作用（角閃岩相）を示し、ピーク条件は 550–640 °C, 2–5 kbar である。一方、エクロジャイト-2 は M1~M3 はエクロジャイト-1 と共通であるが、M4 イベントの変成作用の証拠は認められない。このことは、ともに大理石中のブロックとして産するエクロジャイト-2 とざくろ石-クロリトイド片岩が M3 イベントの中圧型変成作用を受けた後、地表近くにまで上昇し M4 イベントの変成作用を受けなかったことによると考えられる。

エクロジャイト-1 中の角閃石と白雲母の K-Ar 年代は 600 Ma を示した。また、エクロジャイト-1 を貫く脈状正片麻岩は 500–480 Ma, エクロジャイト-1 ブロックの基質の正片麻岩の白雲母 K-Ar 年代は 500–460 Ma であった。これらのうち最も若い K-Ar 年代である 460 Ma が正片麻岩とエクロジャイト-1 の最終的な上昇年代と考えられる。エクロジャイトの Sm-Nd 年代測定を試みたが、ざくろ石及びオンファス輝石中の包有物あるいは置換鉱物としての緑れん石類鉱物の影響のため地質学的意味のあるアイソクロンを得ることができなかった。

Chandman 地域の高圧変成岩の形成は非活動的大陸縁辺域の海洋プレートの沈み込みによって始まった。非活動的大陸縁辺域の海洋プレートは形成年代が古く、密度が高かったと推定される。このような海洋プレートの沈み込みの初期は地温勾配の高い大陸プレートとの接触により相対的に高温低圧型の変成作用がおこる（M1 イベント）。その後サブダクションの継続に伴って大陸側のマントルは冷たい海洋プレートにより冷却され、きわめて低い地温勾配が達成される。この時期に青色片岩相からエクロジャイト相への低温高圧型の変成作用が起こった（M2 イベント）。さらにサブダクションがつづき、ついに海洋プレート反対側の大陸が沈み込み帯に接近する。接近する大陸の縁辺に堆積していた石灰岩とざくろ石-クロリトイド片岩の原岩が沈み込むとともに大陸の衝突が起こり、中圧型変成作用を受けた（M3 イベント）。エクロジャイト-1 とざくろ石-クロリトイド片岩が大理石とともに上昇した後、大陸衝突に伴う火成活動がおこり、まだ深部に留まっていたエクロジャイト-2 が高温型の変成作用を受けた（M4 イベント）。これらの変成岩は 460 Ma 頃にすべて地表付近にまで上昇した。

本論文では高圧型変成岩の詳細な変成履歴の解析、地質年代学的研究、地球化学的研究を総合して、きわめて低地温勾配下で形成された高圧変成岩を非活動的大陸縁辺域の沈み込みとそれに引き続く大陸衝突モデルで説明したもので、世界の高圧変成型帯研究に大きな貢献をした。よって博士の学位に値する学術的価値があるといえる。