

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Petrological studies of granulite facies metamorphic rocks from the middle segment of Mogok metamorphic belt, central Myanmar

(ミャンマー中部 Mogok 変成帯中央部に産する
グラニュライト相変成岩類の岩石学的研究)

氏 名 Ye Kyaw Thu

論 文 内 容 の 要 旨

The Mesozoic to Cenozoic tectonic evolution of Southeast Asia is characterized by the closure of the Tethys ocean and subsequent collision of the Indian microcontinent with Eurasia. Progressive convergence between these two continental plates resulted in the development of Cenozoic high-temperature metamorphism and related magmatism in central Myanmar. The Cenozoic Mogok metamorphic belt, located at the western margin of the Shan-Thai Block forms a prominent part for understanding the continental evolution of Southeast Asia. Systematic investigations of tectonometamorphic conditions of the Mogok metamorphic belt and related magmatism are therefore essential to the discussion of tectonic evolution of this region. Geochronological studies, based on U–Th–Pb and Ar–Ar dating, indicates that an assemblage of the Mogok high-grade metamorphic rocks formed during the Paleogene to early Neogene in association with the India–Eurasia continental collision

(Bertrand et al., 1999; 2001; Searle et al., 2007; Maw Maw Win et al., 2016).

Ti-rich biotite grains commonly occur in paragneisses of the Mogok metamorphic belt, Myanmar. The TiO₂ content of biotite coexisting with rutile and/or ilmenite reaches 6.9 wt%. The compositional relationships between Ti content and other components such as total cation, total divalent cation, Si, and Al, suggest that the Ti-vacancy exchange vector of $\text{Ti}\square\text{R}_{-2}$, where R is the sum of divalent cations and \square represents vacancy in the octahedral sites, might be the most effective mechanism to control Ti-substitution into biotite that coexists with no Al₂SiO₅ phase under high-temperature conditions. On the other hand, Ti-tschermak's exchange vector of $\text{TiAl}_2\text{R}^{2+}_{-1}\text{Si}_{-2}$ is probably a common mechanism by which the TiO₂ content of biotite is increased in Al₂SiO₅ phase-bearing samples with increasing temperature.

Cordierite-bearing paragneiss and associated garnet-biotite paragneisses are also studied for the understanding of the tectonometamorphic evolution. Garnet-biotite-plagioclase-sillimanite-quartz and garnet-cordierite-sillimanite-biotite-quartz assemblages and their partial systems suggest pressure-temperature (*P-T*) conditions of 0.60–0.79 GPa/800–860°C and 0.65 GPa/830°C, respectively, for the peak metamorphic stage. The *P-T* pseudosection analyses of the inclusion phases in garnet and matrix assemblage suggest prograde path from 700–730 °C to 710–765 °C at 0.68–0.78 GPa. The Ti-in-biotite geothermometer and the Zr-in-rutile geothermometer yield temperature conditions up to 820°C and of $845 \pm 26^\circ\text{C}$, respectively. Anhedral cordierite with slightly higher X_{Mg} values and associated assemblage around garnet shows re-equilibration under lower *P-T* conditions of about 0.4 GPa/620°C. Based on the CHIME monazite age in the paragneiss, the lower-temperature equilibrium was interpreted to be related to fluid activity during exhumation in the late Oligocene (Maw Maw Win et al., 2016). The comparisons of present data and *P-T* conditions reported in literature suggest that (1) the metamorphic conditions of the Mogok metamorphic belt vary from the

lower amphibolite- to granulite facies, (2) metamorphic grade seems to increase from east to west perpendicular to the north-trending extensional direction of the Mogok belt, (3) granulite facies rocks are widespread in the middle segment of the Mogok belt, and (4) the granulite facies rocks were locally re-equilibrated at lower amphibolite facies conditions during the exhumation.

Dolomitic marbles and scapolite-bearing calc-silicate rocks also dominate in the middle segment of the Mogok metamorphic belt. The high-grade assemblages of the marble samples are mainly composed of calcite + dolomite + spinel + phlogopite, and those of calc-silicate samples are represented by scapolite + calcite + quartz + calcic plagioclase + diopside + titanite. Some marble samples contain clinohumite, forsterite, diopside, and amphibole. Calcite grains in the marble samples usually show exsolution texture including small grains of dolomite. The estimated compositions of homogeneous calcite grains before the formation of exsolution texture yield 720 – 870 °C as minimum temperature conditions using calcite-dolomite solvus geothermometer. The stability relationships of mineral parageneses in the clinohumite-bearing marble and scapolite-bearing calc-silicate rocks were analyzed in the systems of CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ and CaO-MgO-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂-H₂O-CO₂ at pressure condition of 0.8 GPa, respectively. In the clinohumite-bearing sample, forsterite and calcite occur as inclusions in clinohumite porphyroblast suggesting high-temperature and X_{CO_2} conditions of > 800 °C and > 0.54, respectively. Dolomite and symplectitic aggregates of tremolite and dolomite occur at the boundary between clinohumite and calcite. This re-equilibrium texture indicates decrease of X_{CO_2} condition during retrograde stage. The assemblage of meionitic scapolite, calcite and quartz in calc-silicate samples yields minimum temperature and X_{CO_2} conditions of 770–790 °C and 0.2, respectively, suggesting peak metamorphic stage. Aggregates of zoisite/clinozoisite, calcite, and quartz replace scapolite

indicating decrease of X_{CO_2} value during retrograde stage.

The high-temperature conditions over 800 °C at peak metamorphic stage recorded in marble and calc-silicate rocks are well consistent with those estimated by paragneiss assemblages. The X_{CO_2} value of metamorphic fluid attended during the peak metamorphic stage, however, had distinctly higher in the metacarbonate rocks than the paragneisses that were free of carbonate phases. This fact suggests that migration of metamorphic fluid phases were limited between the two types of lithologies, and thus, homogenization of metamorphic fluid compositions has not extensively occurred during prograde metamorphic stage. On the other hand, decreasing X_{CO_2} values of metacarbonate rocks with decreasing temperature might indicate that infiltration of H₂O-rich fluid extensively occurred beyond the lithologic boundaries during retrograde metamorphic stage.

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Petrological studies of granulite facies metamorphic rocks from the middle segment of Mogok metamorphic belt, central Myanmar

(ミャンマー中部 Mogok 変成帯中央部に産する
グラニュライト相変成岩類の岩石学的研究)

氏 名 Ye Kyaw Thu

論 文 内 容 の 要 旨

中生代から新生代にかけて東南アジアで進行した構造運動は、テチス海の閉鎖とユーラシア大陸へのインド亜大陸の衝突によって引き起こされた。そして、その後も引き続いた両大陸プレートの収束によって、ミャンマー中央部においては中生代高温変成作用とそれと関連した火成作用が進行した。Shan-Tai 地塊の西縁に位置する新生代の Mogok 変成帯は、東南アジアの大陸地殻の進化を理解するうえで重要な地域である。それ故、Mogok 変成帯を形成した変形変成作用とそれと密接に関連する火成作用の系統的な調査は、当地域のテクトニクスの変遷に関する研究にとって、極めて重要である。主に U-Th-Pb および Ar-Ar 法による地質年代学的研究によれば、Mogok 高温変成岩はインド-ユーラシア両大陸の衝突により、古第三紀から新第三紀早期に形成されたと考えられている(Bertrand et al., 1999; 2001; Searle et al., 2007; Maw Maw Win et al., 2016)。

Mogok 変成岩の主要な岩相である泥質片麻岩類は、角閃岩相高温部からグラニュラ

イト相に至る高温条件下で再結晶しており、その形成条件は 0.77–0.84 GPa/780–850 °C 程度と見積もられている。この泥質片麻岩中には Ti に富む黒雲母が広く産し、ルチルもしくはイルメナイトと共存する黒雲母の TiO₂ 量は 6.9 wt% に達する。黒雲母の Ti 量と陽イオンの総量、2 価の陽イオンの総量、Si や Al 量との相関関係から、Al₂SiO₅ 相と共存しない黒雲母の Ti 量は、主に空席が関与する Ti□R²⁺₂ 置換（□と R²⁺ は、それぞれ空位の席と二価の陽イオンを示す）によって制御されていると考えられる。他方、Al₂SiO₅ 相と共存する黒雲母の Ti 量は、変成温度の上昇にともない主に Ti-チェルマック置換 (TiAl₂R²⁺₁Si₂) によって増加すると考えられる。

泥質片麻岩を構成するザクロ石-黒雲母-斜長石-珪線石-石英、ザクロ石-堇青石-珪線石-黒雲母-石英の鉱物組合せは、変成作用のピーク時の圧力 (P) -温度 (T) 条件として、それぞれ 0.60–0.79 GPa/800–860°C および 0.65 GPa/830°C を与える。一方、ザクロ石の包有物と基質の鉱物共生の P-T シュードセクション解析の結果は、0.68–0.78 GPa のほぼ定圧条件下での 700–730 °C から 710–765 °C への昇温 P-T 経路を示す。また、黒雲母中への Ti の固溶とルチル中への Zr の固溶をもとにした地質温度計は、それぞれ 650–820°C および 845 ± 25°C の高温条件を示す。これに対し、ザクロ石の周囲に産する堇青石を含む共生は、およそ 0.4 GPa/620°C 条件下での再平衡を示す。そのような低温条件下での再平衡は、Sagaing ridge の試料からも報告されており、CHIME monazite 年代をもとにして、漸新世後期の変成帯上昇時に起こった大規模な変成流体の流入に関係すると考えられる (Maw Maw Win et al., 2016)。今回の成果と従来報告されている変成条件を考慮すると、主に以下の 4 点が結論づけられる：(1) Mogok 変成帯の変成条件は、角閃岩相高温部からグラニュライト相に達する、(2) 変成度は、Mogok 変成帯の南北の延び方向に直交するように東から西へ上昇する、(3) グラニュライト相の変成岩類は南北に延びる Mogok 変成帯の中央部に広く産する、(4) これらの変成岩類は、変成帯上昇時に角閃岩相低温部程度の条件下で再平衡している。

ドロマイトを含む結晶質石灰岩やスカポライトを含む石灰珪質岩もミャンマー中央部の Mogok 変成帯の中央部に広く産する。結晶質石灰岩の主要な鉱物組合せは方解石 + ドロマイト + スピネル + 金雲母であり、石灰珪質岩のそれは主にスカポライト + 方解石 + 石英 + Ca に富む斜長石 + 単斜輝石 + チタナイトである。結晶質石灰岩は、斜ヒューム石、フォルステライトや角閃石を含むことがある。結晶質石灰岩中の方解石は

多くの場合ドロマイトが離溶した組織を示すが、離溶する以前の組成を復元して方解石-ドロマイト地質温度計を適用すると、平衡温度の下限として 720–870 °C を示す。斜ヒューム石を含む結晶質石灰岩と、スカポライトを含む石灰珪質岩の鉱物共生の安定関係を、変成圧力を 0.8 GPa と仮定して、それぞれ CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ と CaO-MgO-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂-H₂O-CO₂ 系で解析した。斜ヒューム石を含む結晶質石灰岩では、斜ヒューム石がフォルステライトと離溶組織を示す方解石を包有しており、それらは 800°C 以上の高温条件下で CO₂ に富む変成流体 [$X_{CO_2} = CO_2 / (CO_2 + H_2O) > 0.5$] と共存していたと考えられる。また、斜ヒューム石と方解石との境界には、ドロマイトやトレモラ閃石とドロマイトからなるシンプレクタイト状集合体が産し、この組織は、降温変成作用時に X_{CO_2} 値が低下したことを示す。石灰珪質岩に認められるスカポライト+方解石+石英の共生も、高温 (> 770–790°C)・高 X_{CO_2} (> 0.2) 条件下での平衡を示す。スカポライトは、ゾイサイト/斜ゾイサイト、方解石や石英の集合体に一部が置換されており、この組織もまた降温変成作用時に起こった X_{CO_2} の低下によって形成されたと考えられる。

変炭酸塩岩に記録されている変成作用ピーク時の 800°C 以上の高温条件は、泥質片麻岩の解析によって得られている高温条件と調和的である。一方、変成ピーク時における変炭酸塩岩類の変成流体は、泥質片麻岩の流体組成に比べて著しく高い X_{CO_2} 値を示す。この点から、昇温変成作用時には、変成流体の移動とそれに伴う組成の均質化は、広範囲には起こらなかったと推定される。一方、変成ピーク時以降に認められる X_{CO_2} 値の低下は、降温変成作用時に変炭酸塩岩類や泥質片麻岩の全域にわたって広範囲に H₂O に富む流体の流入があったことを示していると思われる。