

博士論文

チェコ共和国・ボヘミア地塊に産する
珪長質グラニュライトの変成温度圧力条件

2024 年 9 月

内藤 美桜

岡山大学大学院
自然科学研究科

要旨

高温高压の変成作用を経験したグラニュライトを研究することは造山帯の発達史を解明する上で重要である。グラニュライトに含まれる鉱物組合せや鉱物化学組成などから造山帯構成岩石の温度圧力条件の推定が可能であり、得られた温度圧力履歴からその造山帯の発達史に対する制約条件が与えられる。

本稿では大陸衝突帯型の造山帯の一つであるヨーロッパのヴァリスカン造山帯に属し、チェコ共和国南部に位置するボヘミア地塊 Gföhl ユニット Blanský les 岩体南東部の Plešovice 採石場に産する珪長質グラニュライトの詳細な岩石学的特徴をまとめ、ザクロ石と黒雲母などの化学組成から変成温度圧力条件の推定を行った。

Blanský les 岩体の Plešovice 採石場では藍晶石を含む珪長質グラニュライト、珪線石を含む珪長質グラニュライト、K に富む perpotassic グラニュライトが産する。藍晶石を含む珪長質グラニュライトは主にザクロ石、黒雲母、石英、斜長石、カリ長石、藍晶石で構成されている。含まれるザクロ石粒子は直径 5mm 以下の細粒のものが多く、直径約 1cm の大きなザクロ石粒子が含まれることもある。珪線石を含む珪長質グラニュライトの構成鉱物組合せは藍晶石を含む珪長質グラニュライトのそれと同じであるが、含まれる藍晶石が少なく、より珪線石を多く含む。また、黒雲母に富んでおり、白雲母も多く見られる。Perpotassic グラニュライトは直径 5mm の大きなザクロ石を多く含んでいる。構成鉱物は藍晶石を含む珪長質グラニュライトと似ており、ザクロ石、黒雲母、石英、斜長石、カリ長石、アパタイト、ジルコンであるが、藍晶石を含まない。試料によっては直径 1cm 程のザクロ石粒子が含まれることがある。マトリクスはカリ長石で占められており、直径 2–2.5mm 程にもなる粒子も多く見られる。またマトリクス中には直径約 2mm の巨大なジルコン粒子が含まれる場合がある。

Plešovice の藍晶石を含む珪長質グラニュライト中の比較的大きいザクロ石粒子はコアから最外縁部より数十 μm ほど内側へかけてほぼ均質でそこから最外縁部に向かって Fe が増加する後退型累帯構造を示している。Perpotassic グラニュライトに含まれるザクロ石もまたコアから最外縁部に向かって Fe が増加する後退型累帯構造を示すが、均質なコア持たない。また、ザクロ石

中の黒雲母包有物周辺では Fe が増加する傾向が見られた. 今回分析した限りでは Plešovice の試料では累進型累帯構造を示すザクロ石はなかった.

Plešovice の黒雲母は Fe を多く含み, Si/Al について, マトリクス粒子とザクロ石中の包有物の間に違いはあまりなく, Si/Al は 1.5 付近である. Ti 含有量について, Plešovice では, 0.0–0.23 (apfu ; O=11)の範囲に分布し, ザクロ石周辺の黒雲母と包有物の黒雲母はマトリクスのものより Ti に乏しい傾向がある. また, Mg#は包有物の黒雲母の方が高い傾向がある. Perpotassic グラニュライト中の黒雲母の組成と比較すると, Ti 量と Mg#に違いが見られた. Mg#については perpotassic グラニュライト中の黒雲母の方が高く, 多くの粒子が 50 付近の値を持ち, 包有物では最大で 70 もある. Ti 量は perpotassic グラニュライト中で 0.05–0.18 (apfu)の範囲になり, マトリクスの方で 0.10–0.18 (apfu)と多く, ザクロ石周辺や包有物はマトリクス中のものと比べると少ない (0.05–0.14 apfu). また, Plešovice の珪長質グラニュライトと perpotassic グラニュライト中の黒雲母にはフッ素と塩素が含まれている.

Plešovice の長石は Na に富む傾向が見られた. 藍晶石を含む珪長質グラニュライトのザクロ石中の包有物の斜長石は Na に富んで $X_{Ab}=0.8–1.0$ である. 対して, perpotassic グラニュライトの斜長石ではマトリクス中の斜長石が $X_{Ab}=0.75–1.0$ で Na に富み, 包有物の斜長石は $X_{Ab}=0.6–0.8$ で Ca に富む.

カリ長石では, 藍晶石を含む珪長質グラニュライトの X_{Kfs} は 0.8–0.98, perpotassic グラニュライトの X_{Kfs} は 0.60–0.91 になり, 藍晶石を含む試料の方が K に富む傾向がある.

Plešovice の珪長質グラニュライト試料についてザクロ石-黒雲母地質温度計と GASP 地質圧力計から変成温度圧力条件の推定を行った. 後退型累帯構造を示すザクロ石コアの組成に対して, Ti に富むマトリクスの黒雲母とザクロ石中の斜長石包有物の組成を使用して, 計算すると約 1.8–2.5GPa, 900–1200°Cの温度圧力条件が得られた. また, perpotassic グラニュライトについては藍晶石を含まないため, 圧力推定はできないが, ザクロ石のコアとマトリクス中の Ti に富む黒雲母の組成を用いて最高温度を推定すると, 2.0GPa の時, 約 1130°Cになる. また, 内藤他 (2024) では同じ Blanský les 岩体内の Zrcadlova Hut'の珪長質グラニュライトから約 2.3GPa,

1100°Cの温度圧力条件が得られている。また, Zrcadlova Hut'では累進型累帯構造を持つザクロ石が見つかっている。Zrcadlova Hut'では 1000°C以上の超高温条件下におかれてもザクロ石中に昇温時の情報が残るほど高温での変成期間が著しく短かったのに対し, Plešovice では減圧および冷却速度が遅く, 高温での変成期間がより長くて累進型累帯構造が保存されなかったことが考えられる。また, コース石のような超高压鉱物は見つかっていない。今回推定された温度圧力条件は超高压条件にまで達していないが, 1000°C以上で 2.0GPa 以上の高温高压条件が推定された。

はじめに

高温高压の変成作用を経験したグラニュライトを研究することは造山帯の発達史を解明する上で重要である。グラニュライトに含まれる鉱物組合せや鉱物の化学組成、含まれるザクロ石の化学組成累帯構造などから造山帯構成岩石の温度圧力条件の推定が可能であり、得られた温度圧力履歴から、その造山帯発達史に対する制約条件を与えられる。

大陸-大陸衝突型の造山帯では正片麻岩や珪長質グラニュライトなどの珪長質変成岩が広く発達し、そうした珪長質岩中に塊状もしくは層状にエクログャイトなどの苦鉄質変成岩が産する構造が見られる。塊状もしくは層状のエクログャイトにはコース石やその仮像が保持されていることがあり、そうした岩石は超高压変成岩と呼ばれている。例えば、ノルウェーの西海岸沿いに発達する Western Gneiss Region や中国東部の Sulu-Dabie region はそうした超高压変成岩が発達する典型例である (Carswell and Cuthbert, 2003; Hirajima and Nakamura, 2003)。しかし、苦鉄質変成岩中からコース石が比較的容易に見つけられるのに対して、その母岩となる珪長質変成岩からはコース石はあまり見つかってない。そのため超高压変成岩であるエクログャイトとそれを囲んでいる珪長質岩の間の関係について古くから議論がある。超高压変成岩のエクログャイトが単独で地下深部から上昇してきたとする説 (exotic model) とエクログャイトと珪長質岩はともに超高压変成作用を受けたとする説 (in-situ model) の対立である (例えば, Hirajima, 1998)。コース石が産する場所の詳細な分布調査 (例えば, Wain *et al.*, 2000) や珪長質岩に含まれるジルコン中からのコース石の発見などから (例えば, Tabata *et al.*, 1998; Ye *et al.*, 2000), in-situ model の方が一般的な考えではあるものの、超高压変成岩の分布範囲が明瞭になっている造山帯はあまりない。

大陸衝突型の造山帯の一つであるヨーロッパのヴァリスカン造山帯東端に位置するボヘミア地塊にも高压から超高压の変成岩が産出する (例えば, Massonne and O'Brien, 2003)。この地塊は片麻岩や珪長質グラニュライトが主要な構成岩石となり、その中に超苦鉄質～苦鉄質な岩塊が含まれている。その苦鉄質な岩塊は主にエクログャイトであり、超高压条件を示す岩塊 (例えば, Nakamura *et al.*, 2004) と示さない岩塊がある (例えば, Štípská *et al.*, 2014) とされている。

ザクロ石のほとんどは冷却期の後退型組成累帯構造を持つが、一部の珪長質グラニュライトからは昇温期の累進型組成累帯構造を持つザクロ石が見つかることがある。珪長質岩においても、近年、いくつかの珪長質変成岩からコース石やダイヤモンドの存在が報告されているが（例えば、Kotková *et al.*, 2011; Perraki and Faryad, 2014）、大半の珪長質変成岩の最高温度圧力条件は 2.0GPa 程度とされる（例えば、Carswell and O'Brien, 1993）。そこで内藤他（2024）では、珪長質グラニュライトの最高変成温度圧力条件を見積もった。その結果、これまでの研究よりやや高い圧力（2.5GPa）が算出されたものの、コース石の安定圧力（>約 3.0GPa）とはならなかった。このように、ボヘミア地塊においても、超高压変成岩の分布範囲は不明である。

本稿ではチェコ共和国南部に位置するボヘミア地塊 Gföhl ユニット Blanský les 岩体南東部の Plešovice 採石場に産する珪長質グラニュライトの詳細な岩石学的特徴をまとめ、ザクロ石と黒雲母などの化学組成分析と変成温度圧力条件の推定を行い、内藤他（2024）で扱った Zrcadlová Hut' 採石場で得られた結果と比較する。

地質概要

ボヘミア地塊はヨーロッパのヴァリスカン造山帯東部に位置しており(図 1a), 主に Saxothuringian, Tepla-Barrandian, Moldanubian のテクトニクスゾーンにまたがって分布している。

Blanský les 岩体が属する Moldanubian 帯は石炭紀のゴンドワナ大陸とローレンシア大陸, 一連の微小大陸の破片が衝突によって形成された地帯である (Schulmann *et al.*, 2009). さらに, Moldanubian 帯は 3 つのテクトニックユニットに分かれ, 比較的低変成度の片麻岩や角閃岩相の岩石が多い Monotonous ユニットと Varied ユニット, それらを覆うグラニュライト相に相当する高変成度の岩石で構成される Gföhl ユニットに区分される (例えば, Fuchs and Matura, 1976). Gföhl ユニットの多くは珪長質グラニュライトとミグマタイト質な片麻岩で構成されており, 珪長質グラニュライトは石英, 長石, ザクロ石, 藍晶石, 黒雲母を含むが, 少量の輝石を含む場合もある. ボヘミア地塊東部の Gföhl ユニットグラニュライト岩体は中圧か低圧の条件下の上書きを受け, ミグマタイト化を受けたり, 藍晶石が珪線石やスピネルに置換されたり, ザクロ石が斜長石や黒雲母へ分解されたりすることがある (Faryad *et al.*, 2010). ボヘミア地塊南部のグラニュライト岩体はより低圧の条件下で再平衡したとされている (Faryad *et al.*, 2010). また, 高圧から超高压の変成岩であるザクロ石橄欖岩やエクログャイトのブロックが珪長質グラニュライトに取り込まれて産する (例えば, Carswell, 1991; Medaris *et al.*, 1990, 2005).

ボヘミア地塊の Gföhl ユニットに属するグラニュライトのうちの Blanský les 岩体は南部に位置する最も大きい岩体として知られており, その大きさは $24 \times 14 \text{ km}^2$ にわたる (図 1b). その岩体も主にザクロ石珪長質グラニュライトで構成されている. また, K に富みジルコンを多く含む特徴をもつ perpotassic グラニュライトも存在しており, 本研究地域の Plešovice 採石場で多く産している. Blanský les 岩体では他にも苦鉄質グラニュライト (例えば, Usuki *et al.*, 2017), ザクロ石-スピネル橄欖岩 (例えば, Naemura *et al.*, 2009), エクログャイト (Štípská *et al.*, 2014) の岩塊を含むことがある.

Moldanubian 帯の変成年代はジルコンやモナズ石の U-Pb 年代からは約 3 億 4000 万年前とされ (例えば, van Breemen *et al.*, 1982; Wendt *et al.*, 1994), perpotassic グラニュライトからは約

3 億 3800 万年前の年代が得られている(例えば, Aftalion *et al.*, 1989; Sláma *et al.*, 2008).

従来, Gföhl ユニットの珪長質グラニュライトの温度圧力履歴について, 900–1100°C, 1.6–1.8GPa の最高変成圧力条件が推定されており, その後ほぼ等温での減圧があったとされていた(Carswell and O’Brien, 1993). しかし近年の Blanský les 岩体中のザクロ石単斜輝石グラニュライトでの研究では, 830°Cで1.8GPaの高圧条件から1000°C付近まで温度が上昇しながら1.2–1.3GPa の中圧まで圧力が下がり, その後, 冷却と減圧をする温度圧力履歴が推定されている(Usuki *et al.*, 2017). また, Blanský les 岩体のエクログジャイト-苦鉄質グラニュライトからは 900°C 以上の時に 1.8–2.0GPa の高圧で変成され, その後, 等温で 1.2GPa まで減圧したことが示されている(Štípská *et al.*, 2014). この二つの研究(Štípská *et al.*, 2014; Usuki *et al.*, 2017)で推定されている温度圧力履歴は異なるものの, 両者の研究はそれらの変成岩が超高压変成作用を受けていないと主張している点においては一致している. しかしながら, この Blanský les 岩体 Plešovice 採石場で含まれるザクロ石橄欖岩(図 2)は 2.3–3.5GPa と超高压変成条件にまたがる温度圧力を経験していることが指摘されている(Naemura *et al.*, 2009).

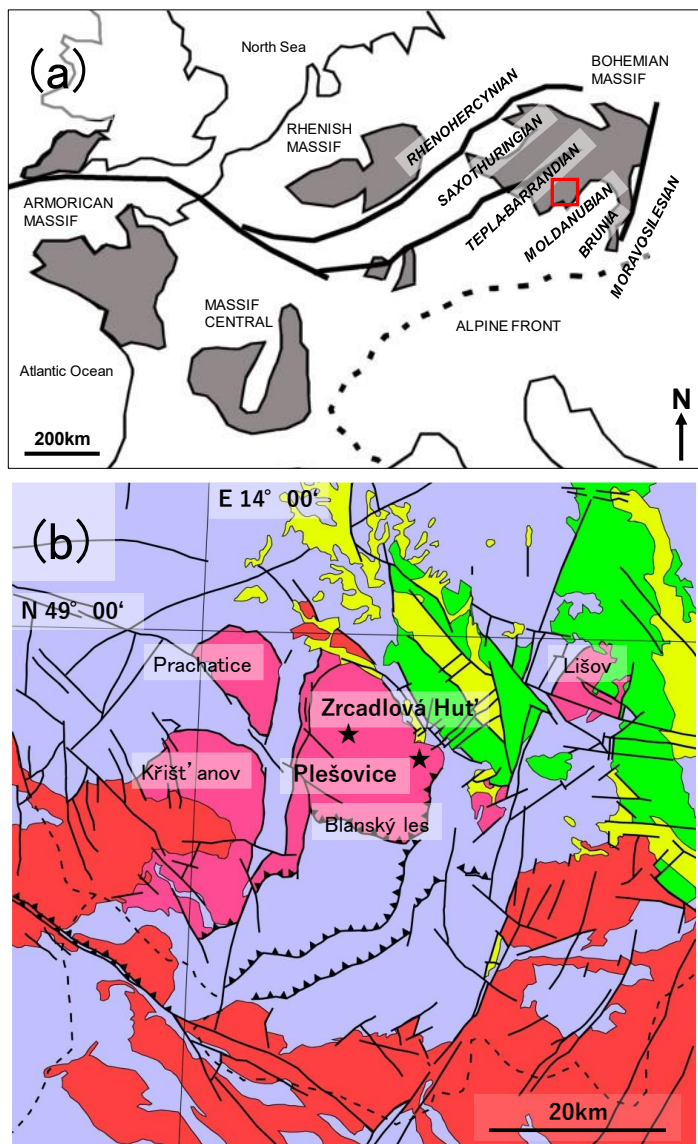


図 1. (a) 中央ヨーロッパにおけるヴァリスカン造山帯の主要テクトニクスゾーンの分布 (Arenas *et al.*, 2016 を基に作成). 灰色の地域は主要な変成岩体であり, 赤い四角は図 1. (b)に示す. (b) 地質概略図 (Cháb *et al.*, 2007 を基に作成)と試料採取地点(★印).

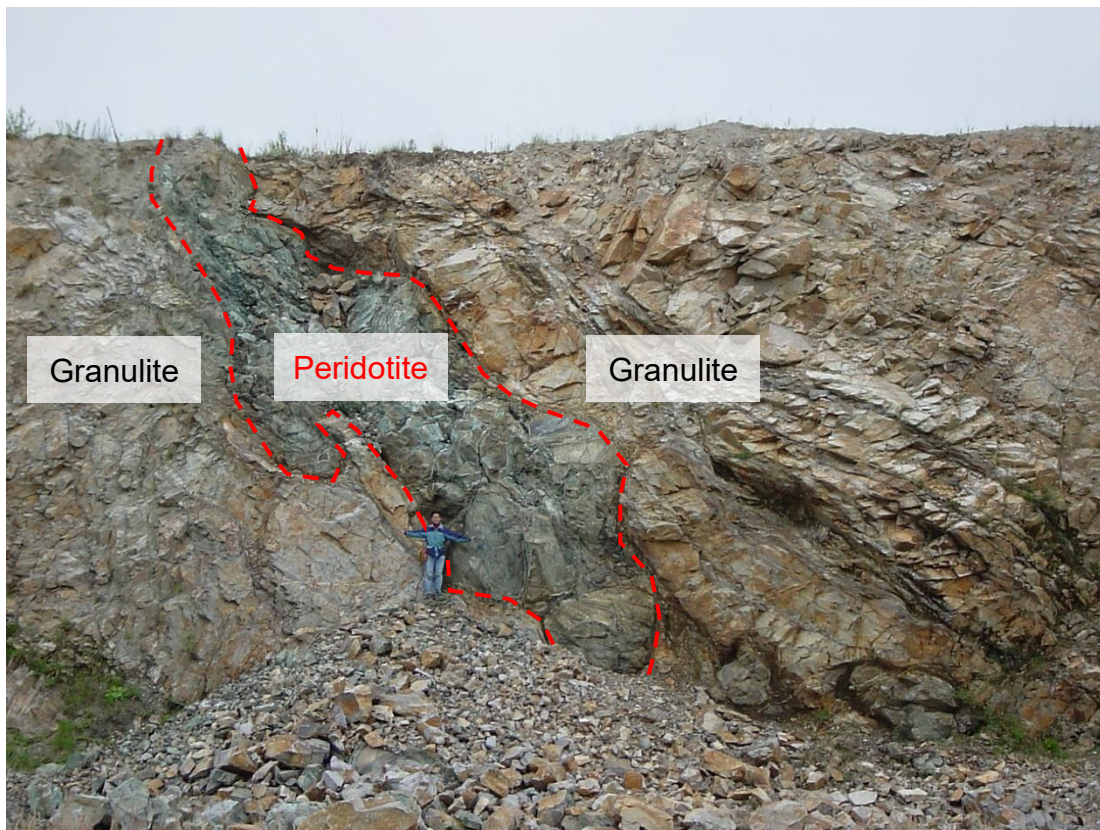


図 2. Plešovice 採石場で見られる珪長質グラニュライトに挟まれたザクロ石橄欖岩.

岩石記載

本研究で Plešovice 採石場 (N48°52'00.3", E14°20'35.0") で採取された試料の薄片観察を行い、黒雲母の少ない珪長質グラニュライト 4 試料の薄片 (PV1, PV6, PV12, PV13) と 2 試料の perpotassic グラニュライトの薄片 (15PV1, 15PV10) の分析を行った。これらの珪長質グラニュライト中のザクロ石は部分的に黒雲母によって置換されている粒子が多く、また完全に黒雲母に置き換えられて形成された仮像状の黒雲母濃集部もある。本研究ではそうした黒雲母によるザクロ石の置換の程度は低く、全体的に優白質な試料の薄片を中心に分析した。そうした優白質な珪長質グラニュライトは藍晶石を含んでいる。一方、perpotassic グラニュライトは黒雲母に富むが、大きなザクロ石粒子 (直径>5mm) が多く残っており、藍晶石を欠く。

また、本稿では内藤他 (2024) で公表した Zrcadlova Hut' 採石場 (N48°53.20', E14°13.92') で採取された珪長質グラニュライト 3 個の試料 (ZH11, ZH12, ZH6) の観察・分析結果を含めて記載し、Plešovice の結果と比較する。なお、Zrcadlova Hut' の試料では珪長質グラニュライトは藍晶石を含むもの (ZH11) と藍晶石を含まないもの (ZH12)、藍晶石を含まず二次的な輝石を含む試料 (ZH6) がある。

藍晶石を含む珪長質グラニュライト

構成鉱物は主にザクロ石、黒雲母、石英、斜長石、カリ長石、藍晶石であり、他にもジルコン、ルチル、アパタイトが含まれる。ザクロ石の周りには黒雲母が発達することが多いが、二次的な白雲母がザクロ石の周りに発達することがある。粒子サイズの大きいリボン状の石英が平行に並び、藍晶石の粒子も同じ方向に並ぶことが多く、マトリクス中の鉱物粒子は小さい (直径約 0.15mm)。試料 PV13 には直径約 1cm の比較的大きいザクロ石が含まれているが、石英や斜長石など多くの包有物を含み、それらがマトリクスとつながったように見える。また、他のザクロ石粒子は小さい (直径<5mm) (図 3a)。上記の粗粒なザクロ石は多くの包有物を含み、その包有物として、石英、斜長石、黒雲母、カリ長石、藍晶石、アパタイトがある。ザクロ石中の包有物のカリ長石は斜長石のラメラを持っている (図 5.1a)。マトリクス中のカリ長石も斜長石ラメラを持つ

ものがある(図 5.1b). PV1 は図 3b のように黒雲母がより少なく, 細粒である. 黒雲母の多くはザクロ石周辺に接して存在する. また, マトリクス中の黒雲母は線状に配列していることも多い. ザクロ石は細粒のものが多く(直径約 1mm), 分離されている粒子もある(図 4.1a, b). 一部の藍晶石は珪線石に分解される様子が見られる(図 4.1c, d). PV13 と比べるとルチルやジルコンは少ない.

珪線石を含む珪長質グラニュライト

構成鉱物は藍晶石を含む珪長質グラニュライトと変わらないが, 藍晶石が少なくなり, 珪線石をより多く含む(図 4.1e, f). マトリクス粒子は小さいが(直径約 0.15mm), 約 1cm 前後の大きいザクロ石粒子を含むことがあり(図 3c), 石英や斜長石など多くの包有物を含み, それらがマトリクスとつながっている. 藍晶石は珪線石に分解される様子が見られ, 藍晶石を含む珪長質グラニュライトのものより藍晶石の粒子は小さい(直径<0.6mm). また, 黒雲母に富んでおり, 線状に分布している(図 3c, d). 細粒のザクロ石は黒雲母に置換されることがあり, 白雲母に置換されることも多く(図 4.1g, h), マトリクス中にも白雲母は多く見られる.

Perpotassic グラニュライト

約 5mm 以上の大きなザクロ石が多く含まれる perpotassic グラニュライトは黒雲母を多量に含む試料(15PV10)(図 3e)とあまり含まない試料(15PV1)(図 3f)があり, どちらも藍晶石を含まない. 試料によっては直径約 1cm 以上のザクロ石を含むものもある. 主な構成鉱物は藍晶石を含む珪長質グラニュライトと似ており, 石英, カリ長石, 斜長石, ザクロ石, 黒雲母, アパタイト, ジルコンである. ザクロ石中の包有物は黒雲母, 石英, 斜長石, カリ長石, アパタイト, 磁鉄鉱, ルチルである. 長石や石英にはミルメカイトが見られることがある(図 4.2a). マトリクスは主にカリ長石で占められており, カリ長石の粒子は比較的大きい(直径 2–2.5mm). 黒雲母が少ない試料(15PV1)の黒雲母のほとんどはザクロ石周辺に分布しているか, ザクロ石から伸びるプレッシャーシャドウを形成するように分布しており, ザクロ石から離れている黒雲母はザクロ石周辺のもの

よりも粒子が小さい。また、マトリクス中には直径約 2mm の大きいジルコン粒子が見られる(図 4.2b)。黒雲母が多い試料(15PV10)の黒雲母は、ザクロ石周辺の粒子とザクロ石から離れた粒子の間で大きさに違いはない。マトリクス中にアパタイトが集中する部分も見られる(図 4.2c, d)。

Zrcadlova Hut'の珪長質グラニュライト

直径 1cm を超える大きいザクロ石粒子が多く含まれており、構成鉱物は主にザクロ石、黒雲母、石英、斜長石、カリ長石である。ザクロ石中の包有物は主に黒雲母、石英、斜長石、カリ長石であり、粗粒なザクロ石中の包有物として藍晶石が産することがあるが、マトリクス中には藍晶石は見られない。スピネル+斜長石のシンプレクタイトを囲むザクロ石コロナが含まれている(図 5.2a)。輝石を含む珪長質グラニュライトの構成鉱物は主にザクロ石、黒雲母、石英、斜長石、カリ長石、斜方輝石、単斜輝石であり、藍晶石は含まれていない。マトリクス中には単斜輝石+斜長石のシンプレクタイトが含まれており(図 5.2b)、単斜輝石はシンプレクタイトとしてしか産しない。斜方輝石はザクロ石中の包有物とマトリクス中のものがあるがどちらもザクロ石と接していない(図 5.2c)。

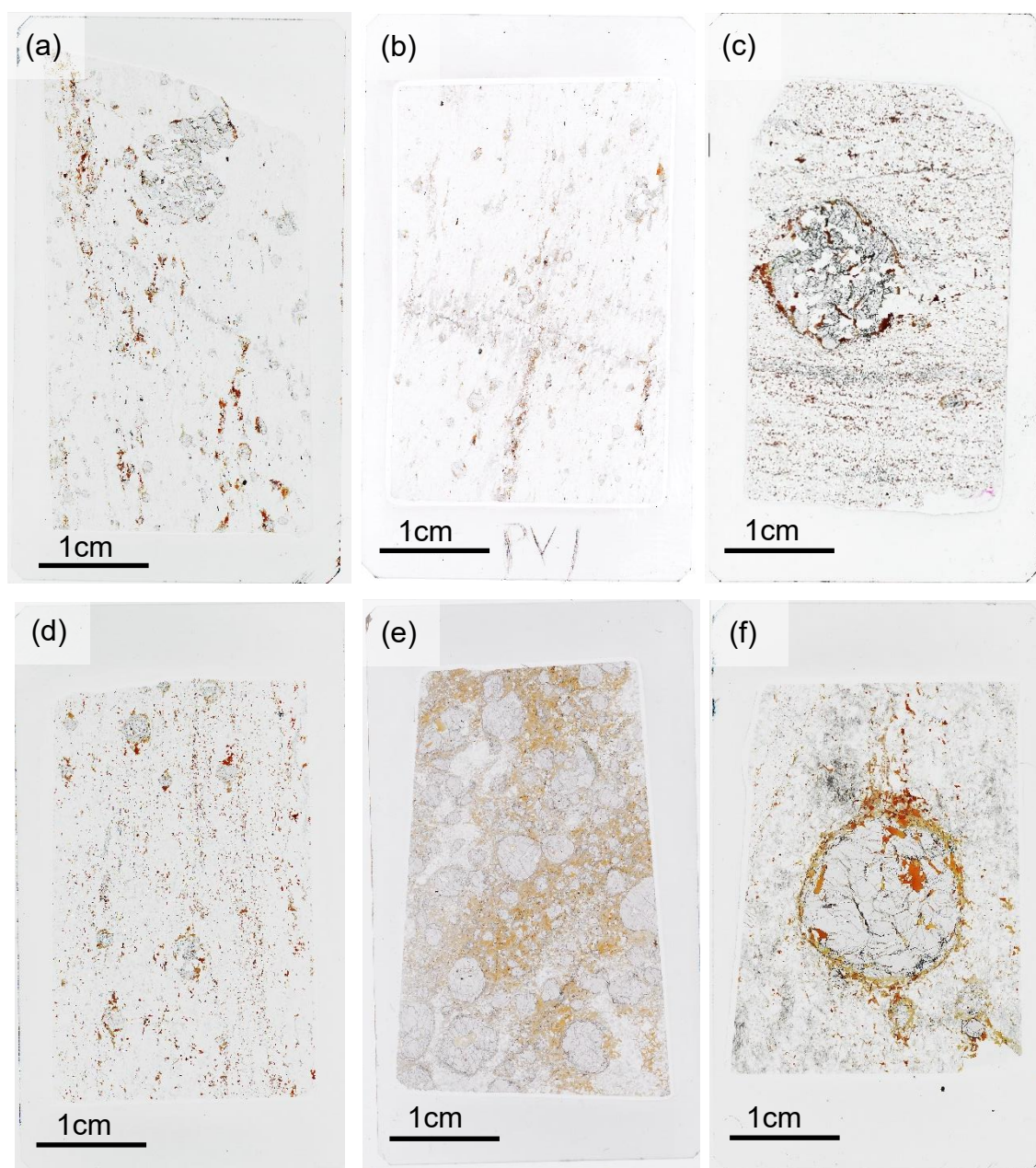


図 3. Plešovice のグラニュライト試料の薄片の全体像. (a) 黒雲母にやや富む藍晶石を含む珧長質グラニュライト(PV13). 大きい(直径 1cm 程)が分離したザクロ石が含まれる. (b) 黒雲母が少ない藍晶石を含む珧長質グラニュライト(PV1). (c) 珧線石を含む珧長質グラニュライト(PV7). 大きい(直径 1cm 以上)ザクロ石が含まれる. (d) 珧線石を含む珧長質グラニュライト(PV5). (e) Perpotassic グラニュライト(15PV10). 比較的大きい(直径 5mm 程)ザクロ石が多数含まれる. (f) Perpotassic グラニュライト(15PV1). ザクロ石の巨晶があり, 黒雲母にやや富む.

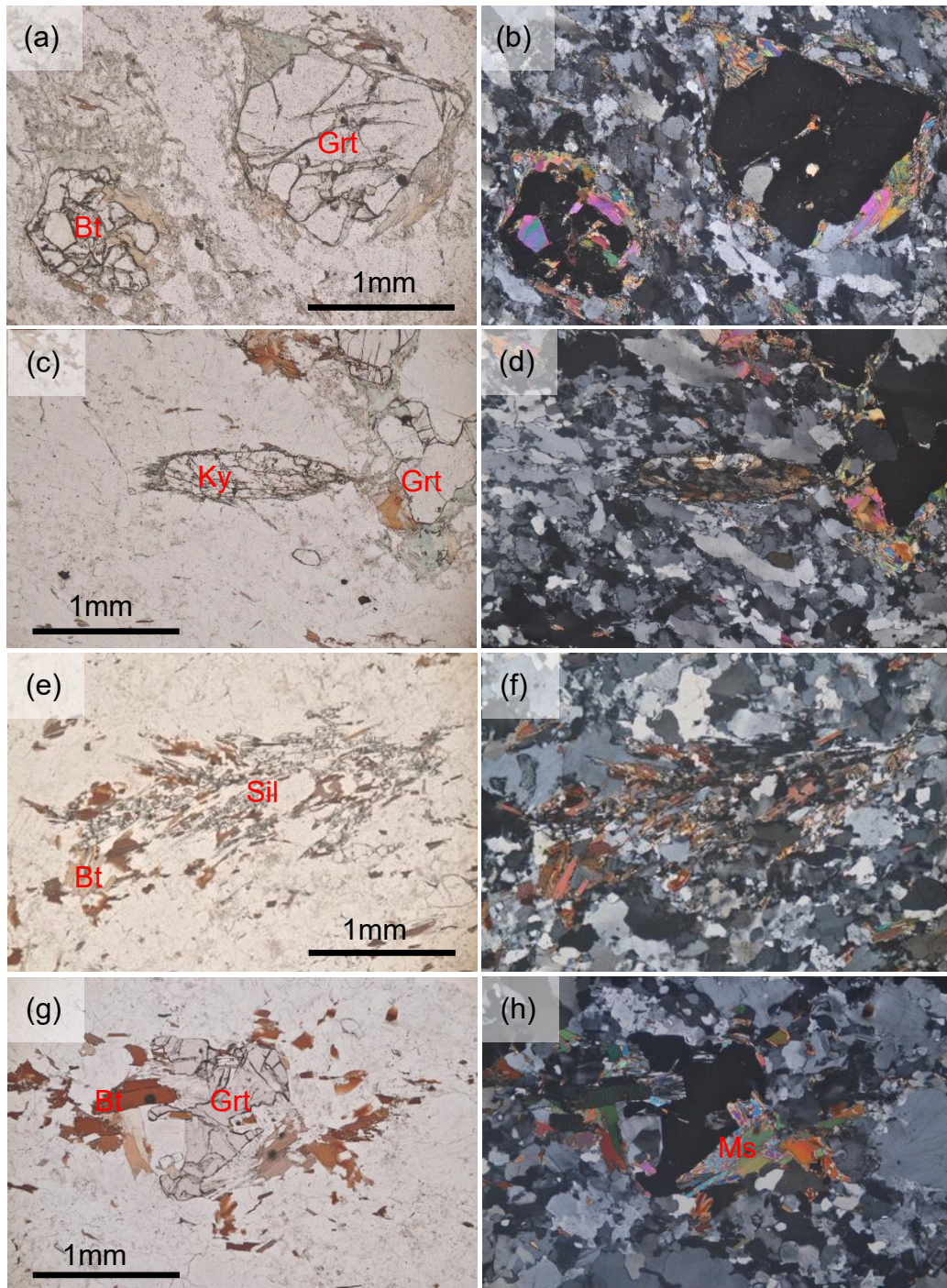


図 4.1. Plešovice のグラニュライト試料の薄片写真. (a) 黒雲母 (Bt) がザクロ石 (Grt) の近くに産出し、ザクロ石は割れ目に沿って黒雲母に置き換えられている (単ポーラー) (PV13). (b) (a) の直交ポーラー. (c) 藍晶石粒子に珪線石が発達している (単ポーラー) (PV13). (d) (c) の直交ポーラー. (e) マトリクス中に珪線石 (Sil) が発達する (単ポーラー) (PV5). (f) (e) の直交ポーラー. (g) 黒雲母 (Bt) と白雲母 (Ms) がザクロ石 (Grt) の近くに産出し、ザクロ石 (Grt) は白雲母や黒雲母に置き換えられている (単ポーラー) (PV5). (h) (g) の直交ポーラー.

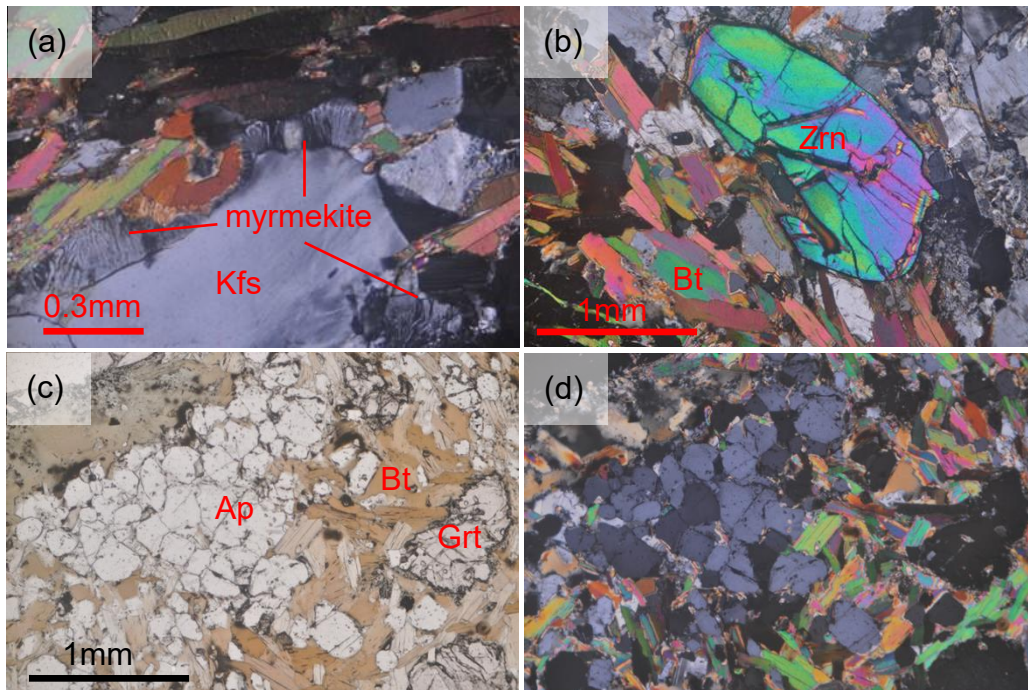


図 4. 2. Plešovice の perpotassic グラニュライト試料の薄片写真. (a) マトリクス中に発達するミルメカイト(直交ポーラー) (15PV1). (b) マトリクスに存在する大きいジルコン (Zrn) (直交ポーラー) (15PV1). (c) マトリクス中のアパタイト濃集部(単ポーラー) (15PV10). (d) (c)の直交ポーラー.

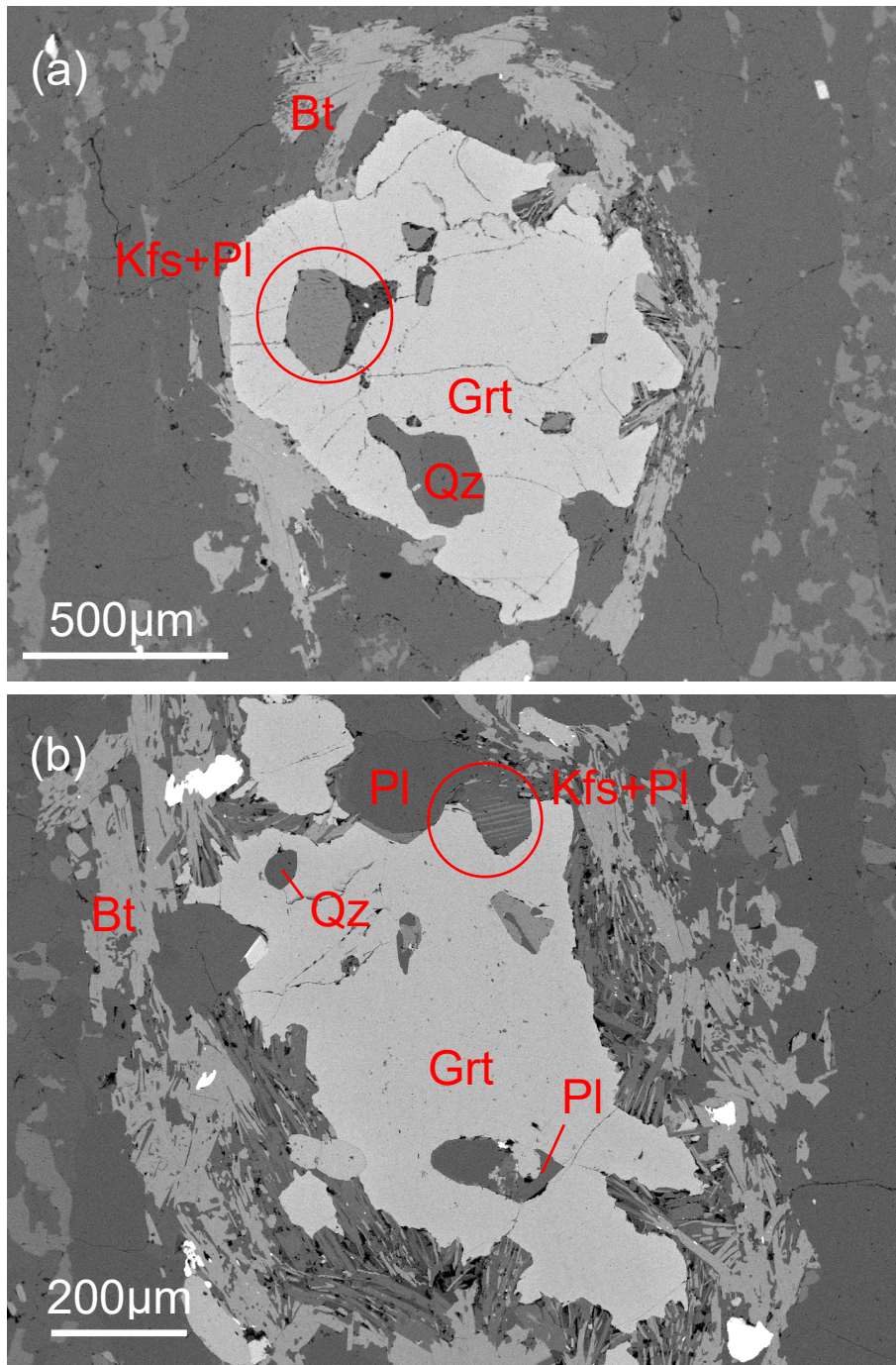


図 5.1. Plešovice の珪長質グラニュライトの BSE 像. (a) ザクロ石中のカリ長石包有物中に発達するパーサイト組織 (PV13). (b) マトリクスの斜長石に発達するアンチパーサイト組織 (PV13).

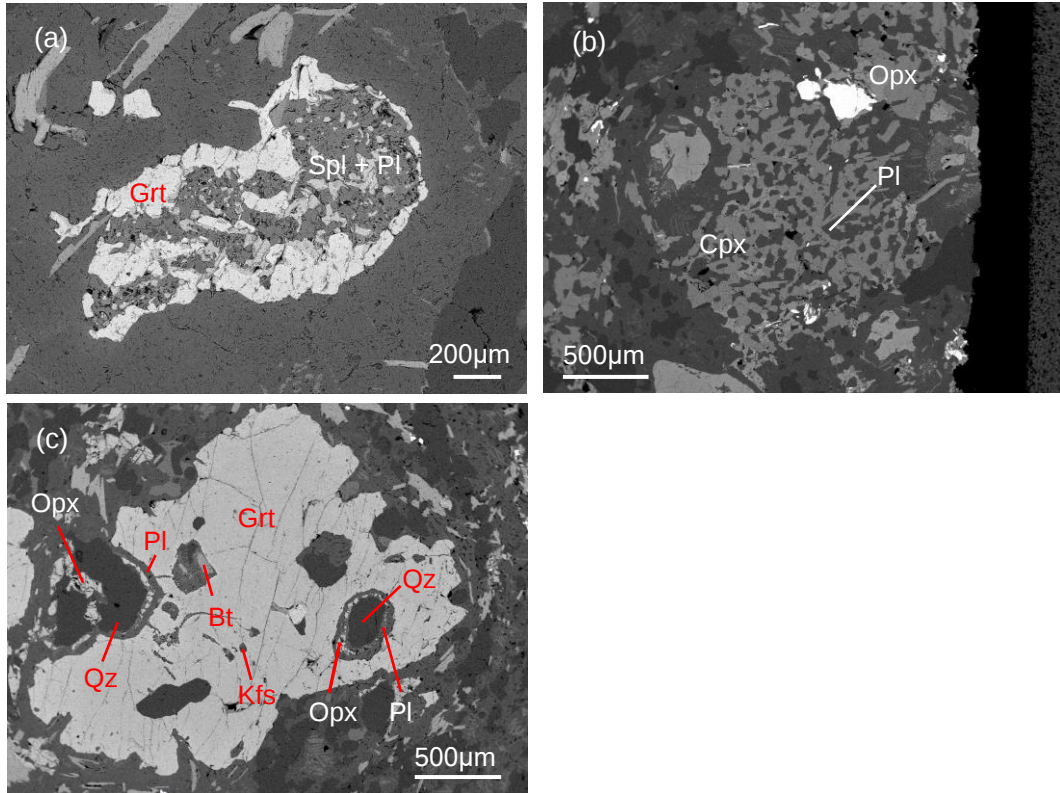


図 5. 2. Zrcadlová Hut'の珪長質グラニュライトの BSE 像. (a) スピネル(Spl) + 斜長石(Pl)シ
ンプレクタイトを囲むザクロ石のコロナ(ZH11). (b) 単斜輝石(Cpx) + 斜長石(Pl)シンプレク
タイト周辺にある斜方輝石(Opx)(ZH6). (c) ザクロ石周辺やザクロ石中の斜方輝石(Opx). 斜
方輝石(Opx) + 斜長石(Pl)コロナが石英(Qz)を囲んで存在し, 斜方輝石はザクロ石と接する
ことはなく, 石英とザクロ石の間に斜長石が発達する(ZH6).

構成鉱物の化学組成

分析には岡山大学の日本電子 (JEOL) 製電子プローブマイクロアナライザー JXA-8230 を使用した。測定条件は加速電圧 15kV, 照射電流 20nA, ビーム径 3 μm にした。ピークとバックグラウンドの測定時間はそれぞれ 10 秒と 5 秒に設定し, Bence and Albee 補正を用いて化学組成を決定した。ザクロ石, 黒雲母, 斜長石, カリ長石の化学組成は表にリスト化した (表 1-3)。鉱物名の略号は Whitney and Evans (2010) に従った。

ザクロ石

分析したザクロ石の化学組成プロファイル図を図 6 に示す。どの試料のザクロ石でも $X_{\text{sps}} [= \text{Mn}/(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca})]$ は <0.03 であり, スペサルティン含有量はリム付近で増加する。Plešovice の藍晶石を含む珪長質グラニュライト中のザクロ石の $X_{\text{grs}} [= \text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca})]$ は 0.1 付近であり, $X_{\text{prp}} [= \text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca})]$ は 0.1–0.3 であった。 $X_{\text{alm}} [= \text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca})]$ は 0.6–0.8 の範囲内で, 珪長質グラニュライト中の比較的大きい粒子はコアから最外縁部より数十 μm ほど内側へかけてほぼ均質でそこから最外縁部に向かって Fe が増加する後退型累帯構造を示した (図 6.1a)。

Perpotassic グラニュライトに含まれるザクロ石は均質なコアを持たず, コア付近では X_{alm} が 0.5–0.6 であり, リム付近では X_{alm} が 0.8 まで最外縁部へ向かって増加する。コア周辺の X_{prp} は 0.3 前後, X_{grs} は 0.15 前後であり, それらはリム付近では減少し, 後退型累帯構造を示す (図 6.1b)。また, ザクロ石中の黒雲母包有物周辺の位置では X_{alm} がリムと同等の 0.7–0.8 まで増加し, X_{prp} と X_{grs} が減少する傾向が見られた (図 6.1c)。今回分析した限りでは Plešovice の試料には累進型累帯構造を示すザクロ石はなかった。

Plešovice のザクロ石の X_{grs} と $\text{Mg\#}$ について図 7 にプロットした。 X_{grs} はどの試料のザクロ石においても数点を除いて 0.15 よりも小さく, Ca が少ない。藍晶石を含む珪長質グラニュライト (PV1, PV6, PV13) 中のザクロ石では X_{grs} が 0 付近から 0.15 までばらつく。 $\text{Mg\#}$ は藍晶石を含む試料中のザクロ石のコアでは 20–30 で広がり小さく, リムでは 15–30 で少しばらつく (図 7a-c)。

Perpotassic グラニュライトのザクロ石コアのほとんどの Mg# は 30–38 と藍晶石を含む珪長質グラニュライト(PV1, PV6, PV13)より高い値になる(図 7d, e).

Zrcadlova Hut'の珪長質グラニュライト中のザクロ石でも X_{sps} は <0.03 であり, リム付近で増加する. 輝石を含まない珪長質グラニュライトでは大きいザクロ石粒子が累進型累帯構造を持つことがあり(図 6.2a), それらの内の一部のザクロ石はコアで X_{prp} と X_{grs} がほぼ一定となっている(図 6.2c). 一方で細粒のザクロ石は後退型累帯構造をもつ(図 6.2b). 輝石を含む珪長質グラニュライトではコア付近で X_{prp} がリム方向へ増加する累進型累帯構造を持つザクロ石が含まれる(図 6.2d). また, スピネルと斜長石のシンプレクタイトを囲む二次的なザクロ石コロナはコロナ以外のザクロ石より Ca に乏しい(図 7f-h).

Plešovice と Zrcadlova Hut'では Ca 量に大きな違いが見られ, 同じ Blanský les 岩体内でも地域によってザクロ石の化学組成の違いがある.

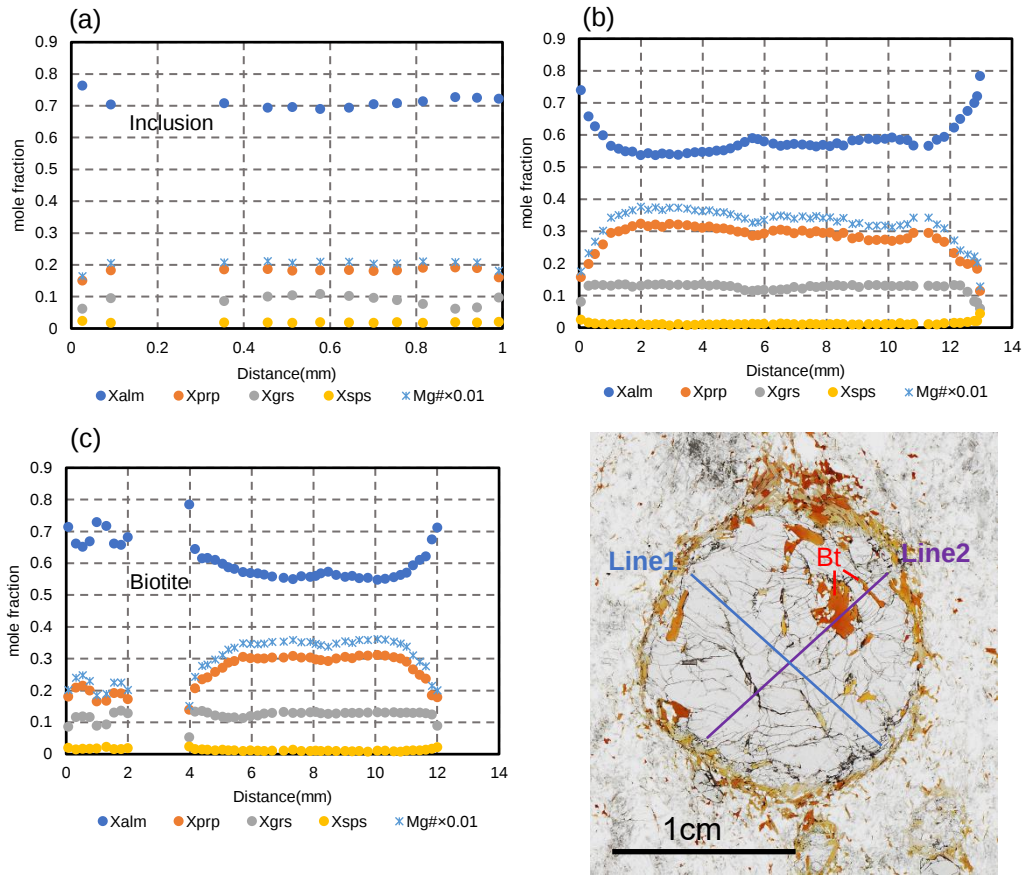


図 6. 1. Plešovice のザクロ石粒子の化学組成プロファイル図. (a) コアからリムに向かって後退型累帯構造をもつザクロ石の組成プロファイル図 (PV13). (b) ザクロ石はコアからリムに向かって後退型累帯構造をもつザクロ石の組成プロファイル図 (Line1) (15PV1). (c) 黒雲母包有物を通して (b)と交差する方向に測定し、後退型累帯構造を示すザクロ石の組成プロファイル図 (Line2). リムとザクロ石中の黒雲母包有物周辺で X_{alm} が増加する傾向がある. 右下の写真は測定した線, Line1 (b)と Line2 (c)を示している.

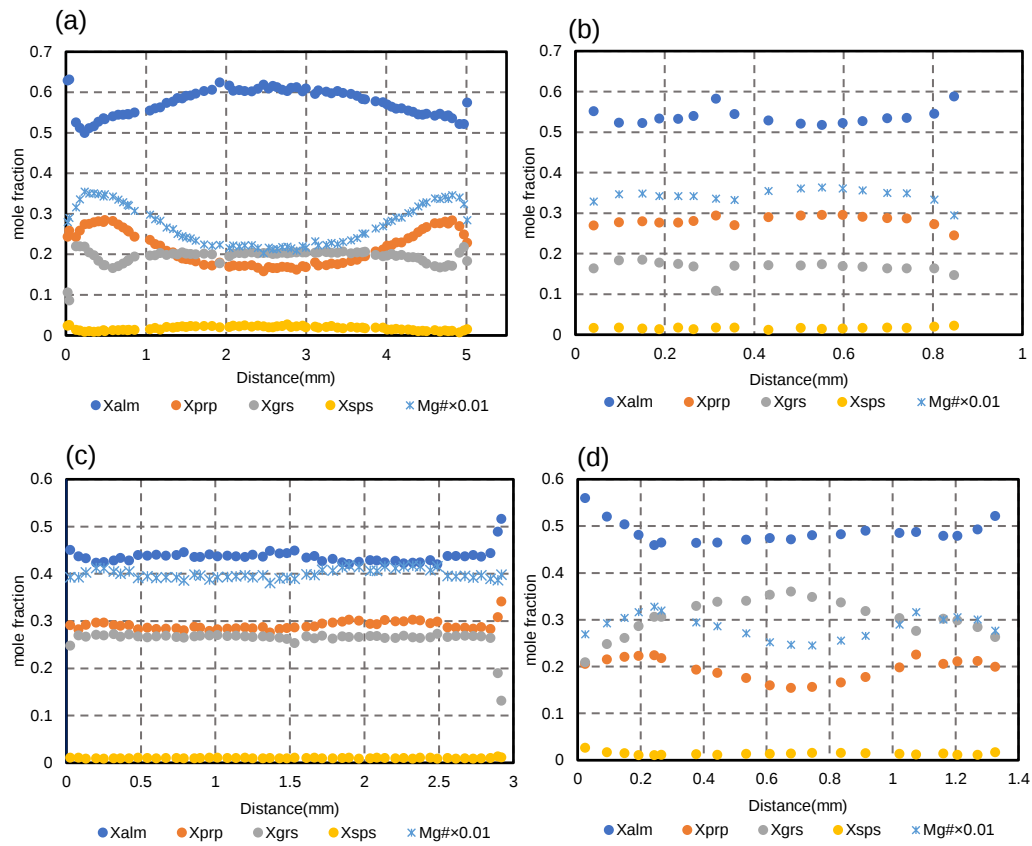


図 6. 2. Zrcadlová Hut' のザクロ石粒子の化学組成プロファイル図. (a) コアからリムに向かって累進型累帯構造をもつザクロ石の組成プロファイル図 (ZH11). (b) コアからリムに向かって後退型累帯構造をもつザクロ石の組成プロファイル図 (ZH11). (c) コアで均質的な組成をもち、リムで後退型累帯構造が見られるザクロ石の組成プロファイル図 (ZH12). (d) コアからリムに向かって X_{prp} が増加し、 X_{grs} が減少する累進型累帯構造を持つザクロ石の組成プロファイル図 (ZH6).

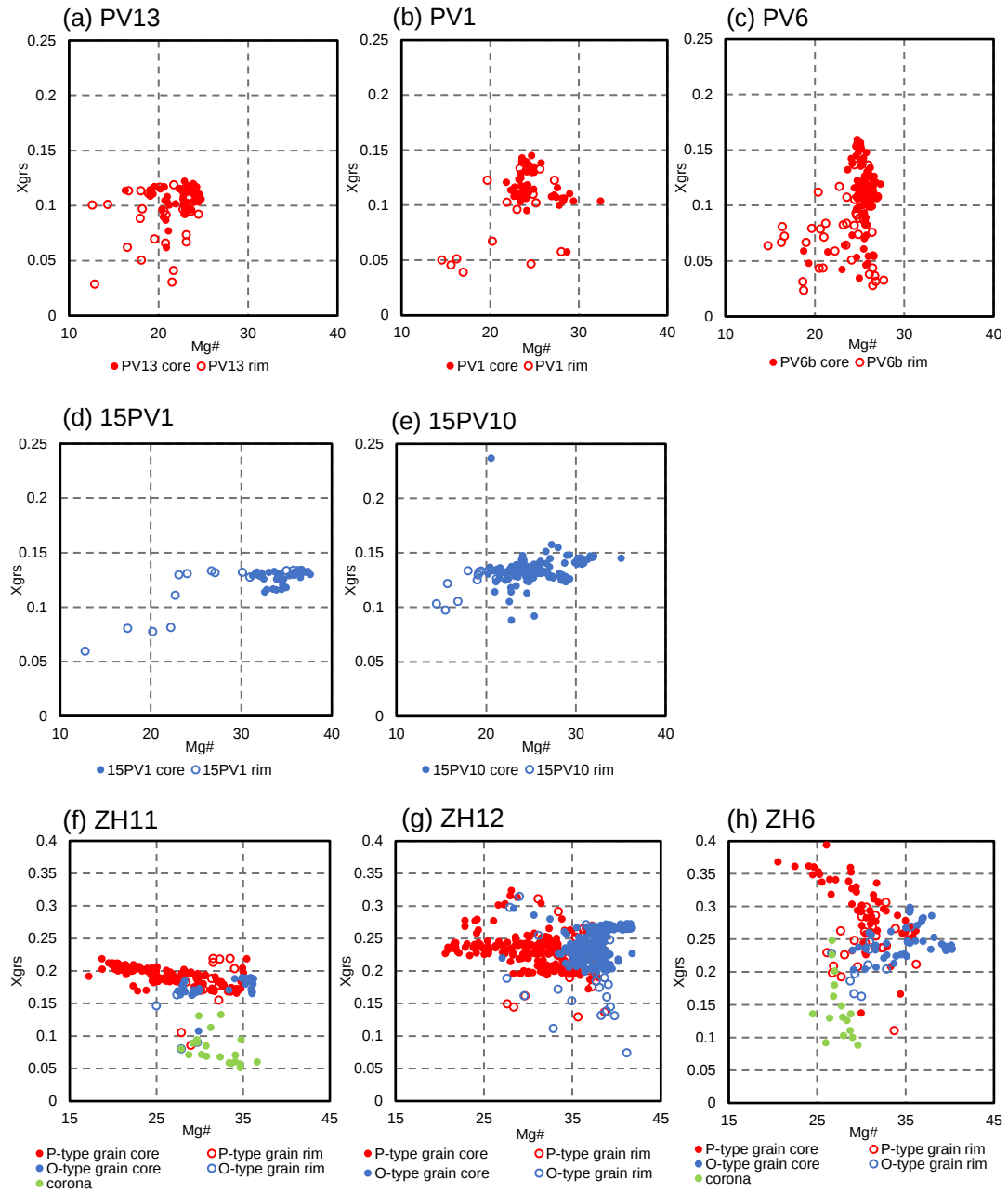


図 7. 縦軸 $X_{\text{grs}} [= \text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Ca}+\text{Mn})]$, 横軸 $\text{Mg\#} [=100 \text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})]$ のザクロ石化学組成図. PV13, PV1, PV6b, 15PV1, 15PV10 の “core” はコア組成, “rim” はリム組成. ZH11, ZH12, ZH6 の “P-type grain core” は累進型累帯構造を持つザクロ石粒子のコアであり, “P-type grain rim”はその粒子のリムである. “O-type grain core” は累進型累帯構造を持たないザクロ石粒子のコア組成であり, “O-type grain rim” はその粒子のリムである. “corona” はコロナ状のザクロ石の組成である.

表 1. ザクロ石の主な化学組成.

	PV13 Grt core*1	PV13 Grt rim	PV1 Grt core	PV1 Grt rim	15PV1 Grt core	15PV1 Grt by inc Bt	15PV1 Grt rim	15PV10 Grt core	15PV10 Grt rim
SiO ₂	37.68	37.26	38.28	38.52	38.77	37.68	37.68	39.11	38.23
TiO ₂	0.05	0.04	0.02	0.06	0.04	0.00	0.04	0.11	0.05
Al ₂ O ₃	22.16	20.53	20.73	20.65	21.95	20.96	21.20	21.33	21.20
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	-	-	-	-	-	0.06	0.01
FeO	30.75	35.82	29.50	29.45	26.13	34.42	33.06	26.64	31.40
MnO	0.76	1.89	0.76	0.61	0.56	1.01	1.07	0.67	0.88
MgO	5.24	2.97	5.22	5.05	7.88	3.44	3.92	7.00	3.87
CaO	3.40	0.99	4.10	4.69	4.25	1.82	2.81	5.30	4.71
Na ₂ O	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.00	0.03	0.04
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
Total	100.09	99.53	98.66	99.05	99.62	99.37	99.77	100.25	100.39
Si	2.965	3.022	3.047	3.054	3.000	3.031	3.008	3.025	3.021
Ti	0.003	0.002	0.001	0.004	0.003	0.000	0.002	0.006	0.003
Al	2.055	1.963	1.944	1.929	2.002	1.987	1.995	1.945	1.974
Cr	0.000	0.000	-	-	-	-	-	0.003	0.001
Fe	2.024	2.430	1.964	1.953	1.691	2.316	2.208	1.723	2.075
Mn	0.050	0.130	0.051	0.041	0.036	0.069	0.072	0.044	0.059
Mg	0.615	0.359	0.620	0.597	0.908	0.413	0.467	0.807	0.455
Ca	0.287	0.086	0.349	0.398	0.353	0.157	0.240	0.439	0.399
Na	0.008	0.005	0.004	0.002	0.005	0.005	0.000	0.004	0.006
K	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001
Total	8.008	7.996	7.983	7.979	7.999	7.978	7.992	7.998	7.993

陽イオン数は酸素数 O = 12 で計算した. *1(PV13)の化学組成は, ザクロ石-黒雲母地質温度計, GASP 地質圧力計, GBAQ 地質圧力計に使用した.

黒雲母

Plešovice の黒雲母は Fe を多く含み、マトリクス中の黒雲母の Mg# は 35–60 の範囲内である (図 8.1a-f). これに対し, Zrcadlova Hut' の黒雲母の Mg# は 55 以上の値を示し, Plešovice のものよりも高い値を示す傾向がある (図 8.2a-f). Si/Al について, Plešovice の黒雲母のマトリクス粒子とザクロ石中の包有物の間に違いはあまりなく, Si/Al は 1.5 付近である (図 8.1a-c). 一方, Zrcadlova Hut' の Si/Al は 2.0 付近に集中する (図 8.2a-c). Ti 含有量についても二つの採石場の間で違いがあり, Plešovice では, 0.0–0.23 (apfu ; O=11) の範囲に分布し (図 8.1d-f), Zrcadlova Hut' では最大 0.5 (apfu) になり (図 8.2d-f), 両地域ともにザクロ石周辺の黒雲母と包有物の黒雲母はマトリクスのものより Ti を少量に含む傾向にある. これはザクロ石から遠くにある黒雲母の Ti 量が多くなることを示している. また, Mg# は包有物の黒雲母の方が高い傾向がある. Plešovice のザクロ石周辺の黒雲母と包有物の黒雲母の多くの粒子の Ti 量は 0.0–0.1 (apfu) の範囲になる. Perpotassic グラニュライトと藍晶石を含む珪長質グラニュライト中の黒雲母の組成と比較すると, Ti 量と Mg# に違いが見られた. Mg# については, perpotassic グラニュライト中の黒雲母の方が大きく, 多くの粒子が 50 付近であり, 包有物は最大で 70 もある. 黒雲母の Ti 量は perpotassic グラニュライト中で 0.05–0.18 (apfu) の範囲になり, マトリクスの方が 0.10–0.18 (apfu) で, ザクロ石周辺のものや包有物のもの (0.05–0.14 apfu) より多い傾向がある. また, perpotassic グラニュライト (15PV1) の試料中のザクロ石と黒雲母の位置関係においてザクロ石周辺の黒雲母よりザクロ石から遠い位置にある黒雲母は Ti 量がより多く, Mg# の変動も小さい (図 9).

Plešovice と Zrcadlova Hut' の両方の地域の黒雲母はフッ素と塩素を含んでおり, Plešovice のマトリクス粒子と包有物とともに F 量は 0.1–0.6 (apfu), Cl 量は 0–0.02 (apfu) で, 包有物の方にばらつきがみられる (図 8.1g-i). Perpotassic グラニュライト (15PV1) 中の黒雲母の F 量はマトリクスと包有物とともに 0.3–0.5 (apfu) であり, Cl 量はマトリクスにおいて 0.013–0.023 (apfu) で, 包有物では 0.001–0.019 (apfu) と幅広く, マトリクスの方が全体的に Cl に富む. 藍晶石を含む珪長質グラニュライトより perpotassic グラニュライトの方がフッ素と塩素に富む傾向がある (図 8.1g-i).

一方で, Zrcadlová Hut'ではフッ素量が 0.06–0.37 (apfu)で, 塩素量がマトリクスのもので 0.02 (apfu)以下であり, 包有物中の黒雲母で 0.01–0.15 (apfu)であり, Plešovice よりもフッ素量が少なく, 塩素量が多い傾向がある(図 8.2g-i).

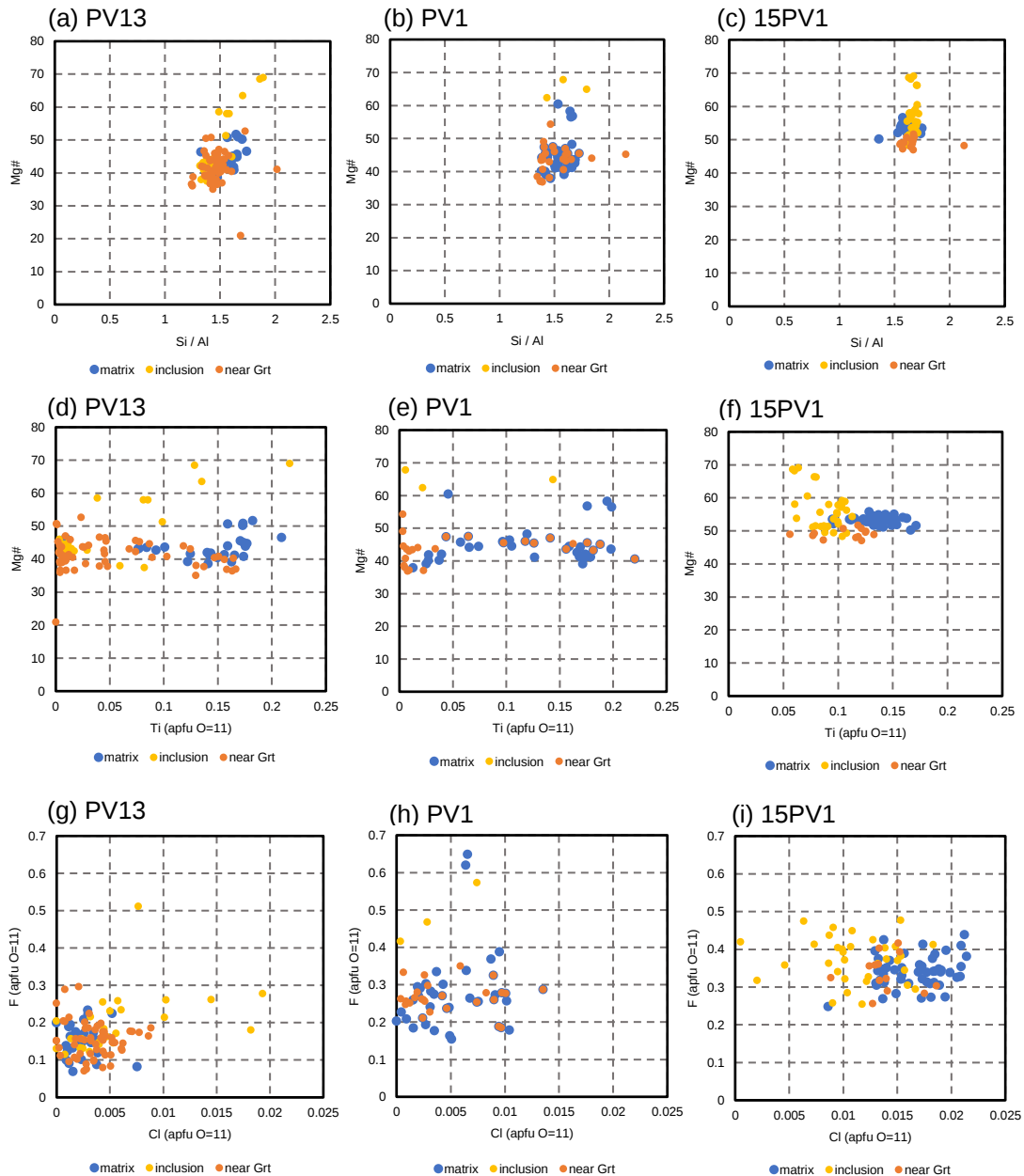


図 8. 1. Plešovice の黒雲母化学組成図. (a-c) $Mg\#$ [=100Mg/(Fe + Mg)]対 Si/Al, (d-f) $Mg\#$ 対 Ti (apfu), (g-i) F 対 Cl (apfu), 酸素数は 11 で計算した. “matrix” はザクロ石から遠くに離れたマトリクス黒雲母粒子. “inclusion” はザクロ石中の黒雲母包有物. “near Grt” はザクロ石周辺にある黒雲母.

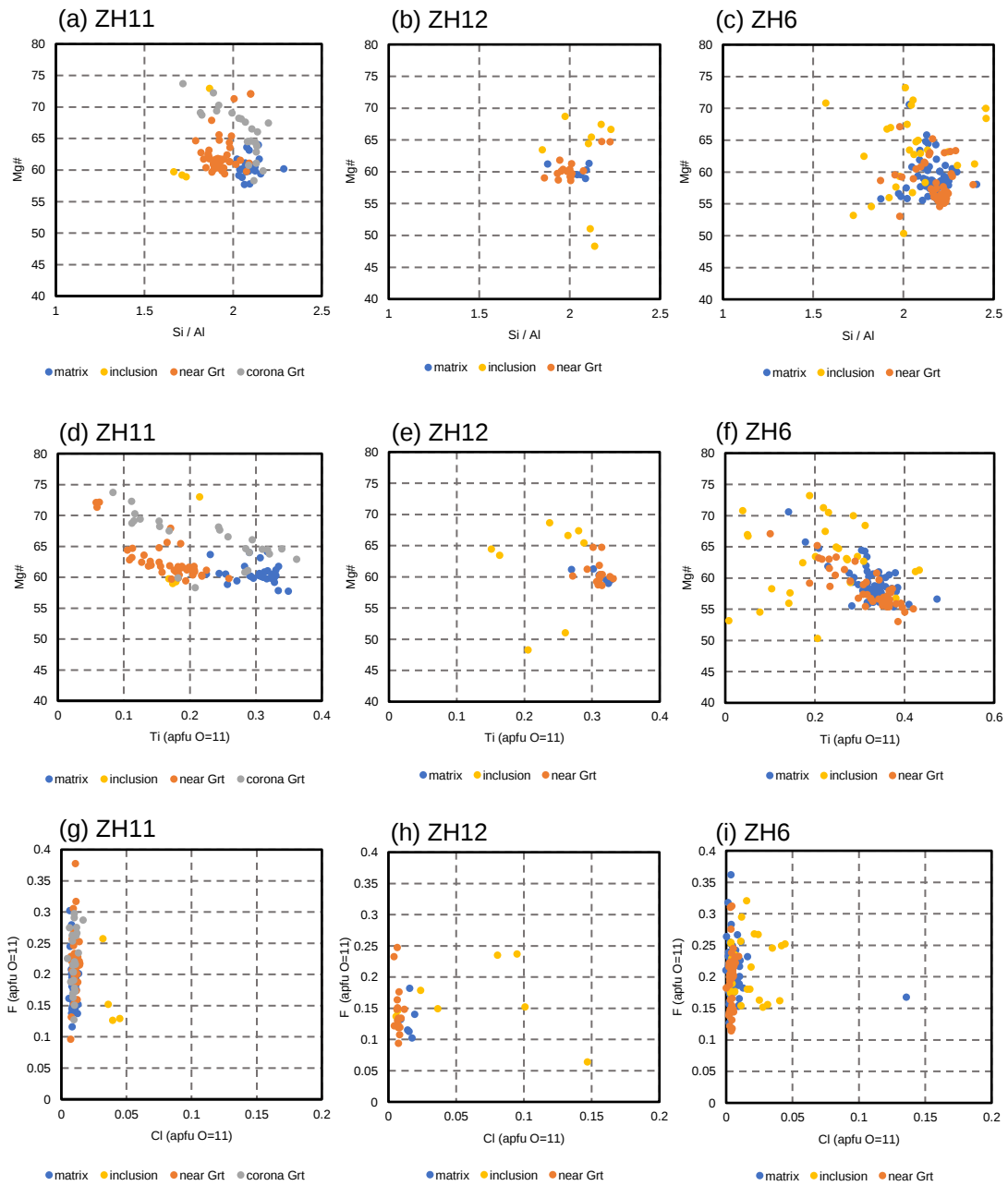


図 8.2. Zrcadlová Hut' の黒雲母化学組成図. (a-c) $Mg\# [=100Mg/(Fe + Mg)]$ 対 Si/Al , (d-f) $Mg\#$ 対 Ti (apfu), (g-i) F 対 Cl (apfu), 酸素数は 11 で計算した. “matrix” はザクロ石から遠くに離れたマトリクス黒雲母粒子. “inclusion” はザクロ石中の黒雲母包有物. “near Grt” はザクロ石周辺にある黒雲母. “corona Grt” はコロナ状のザクロ石周辺にある黒雲母.

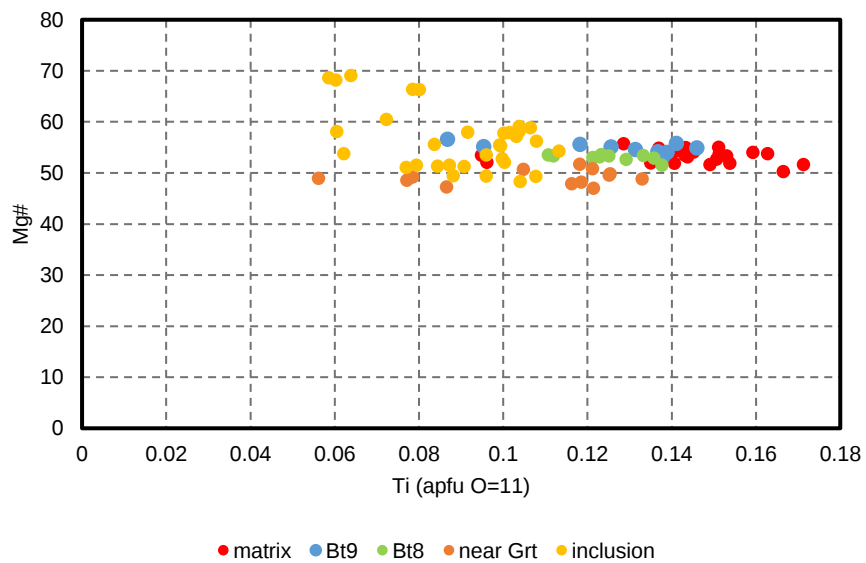
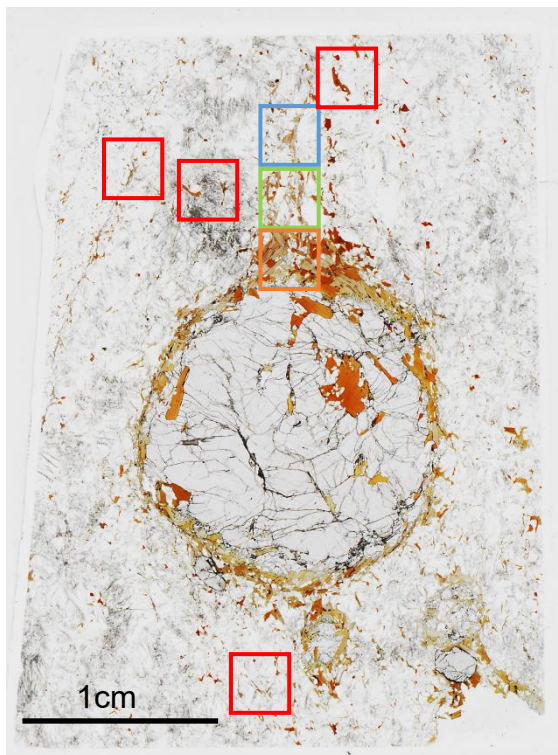


図 9. ザクロ石と黒雲母の位置による $Mg\# [=100Mg/(Fe + Mg)]$ 対 Ti (apfu) の化学組成図. “matrix”, “Bt8”, “Bt9” はザクロ石から遠くに離れたマトリクス黒雲母粒子. “inclusion” はザクロ石中の黒雲母包有物. “near Grt” はザクロ石周辺にある黒雲母. 各枠の色はそれぞれの黒雲母の位置を示す.

表 2. 黒雲母の主な化学組成.

	PV13 Bt mt* ¹	PV13 Bt mt* ¹	PV13 Bt inc	PV13 Bt near Grt	PV1 Bt mt	PV1 Bt inc	PV1 Bt near Grt	15PV1 Bt mt	15PV1 Bt inc	15PV1 Bt near Grt
SiO ₂	36.72	36.38	38.27	35.04	36.24	36.99	35.37	37.01	36.87	36.72
TiO ₂	3.09	2.89	3.95	0.07	3.45	2.57	3.83	3.04	1.14	1.00
Al ₂ O ₃	19.66	19.22	17.17	23.78	18.20	17.50	18.98	19.32	18.68	19.99
FeO	17.45	18.96	11.57	19.50	18.97	13.91	19.64	15.82	12.27	18.31
MnO	0.14	0.08	0.04	0.13	0.18	0.00	0.19	0.12	0.04	0.09
MgO	7.66	7.46	14.44	6.16	8.21	14.41	7.52	9.46	15.35	9.84
CaO	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00
Na ₂ O	0.16	0.12	0.31	0.12	0.18	0.65	0.14	0.22	0.38	0.15
K ₂ O	9.94	9.84	10.19	7.99	9.58	8.70	9.43	9.85	9.52	9.85
F	0.60	0.73	2.22	0.47	1.14	2.44	0.78	1.38	1.79	1.66
Cl	0.02	0.01	0.06	0.04	0.03	0.06	0.07	0.16	0.00	0.12
-O = F, Cl	0.26	0.31	0.95	0.20	0.49	1.04	0.35	0.62	0.75	0.73
Total	95.17	95.38	97.27	93.10	95.72	96.21	95.63	95.76	95.29	96.99
Si	2.777	2.769	2.790	2.694	2.760	2.747	2.701	2.776	2.739	2.752
Ti	0.176	0.166	0.217	0.004	0.198	0.144	0.220	0.171	0.064	0.056
Al	1.752	1.724	1.475	2.155	1.634	1.532	1.709	1.708	1.635	1.766
Fe	1.104	1.207	0.706	1.254	1.208	0.864	1.254	0.992	0.762	1.148
Mn	0.009	0.005	0.002	0.008	0.012	0.000	0.012	0.007	0.002	0.006
Mg	0.863	0.846	1.569	0.706	0.932	1.596	0.856	1.058	1.699	1.099
Ca	0.001	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.000	0.000
Na	0.023	0.017	0.044	0.018	0.027	0.093	0.021	0.031	0.055	0.021
K	0.959	0.955	0.948	0.784	0.930	0.825	0.919	0.942	0.902	0.941
Total	7.663	7.689	7.752	7.625	7.704	7.802	7.694	7.686	7.859	7.790
F	0.143	0.175	0.511	0.113	0.274	0.573	0.189	0.328	0.420	0.393
Cl	0.002	0.002	0.008	0.005	0.003	0.007	0.009	0.021	0.001	0.015

陽イオン数は酸素数 O = 11 で計算した. *1(PV13)の化学組成は, ザクロ石-黒雲母地質温度計, GBAQ 地質圧力計に使用した.

長石

Plešovice の長石は $X_{Ab} [=Na/(Ca+Na+K)]$ が 0.6–1.0 で Na に富む傾向が見られた (図 10a)。

藍晶石を含む珪長質グラニュライトのザクロ石中の斜長石包有物は一部を除いて $X_{Ab}=0.6–1.0$ で範囲が広い。対して, perpotassic グラニュライトの斜長石ではマトリクス中の斜長石が $X_{Ab}=0.75–1.0$ で Na に富み, 包有物の斜長石は $X_{Ab}=0.6–0.8$ で Ca に富む。また, ザクロ石と黒雲母が多量に含まれる試料の 15PV10 の斜長石包有物は $X_{Ab}=0.4–0.5$ でより Ca に富む。

カリ長石について, 藍晶石を含む珪長質グラニュライトにおいて, $X_{Kfs} [=K/(Ca+Na+K)]$ が 0.8–0.98, perpotassic グラニュライトの X_{Kfs} は 0.60–0.91 になり, 藍晶石を含む試料中のカリ長石の方が K に富む傾向がある。

Zrcadlová Hut' の珪長質グラニュライト中のほとんどの斜長石の X_{Ab} は 0.4–0.8 になり, Plešovice の斜長石の方がより Na に富んでおり地域差が見られる (図 10b)。

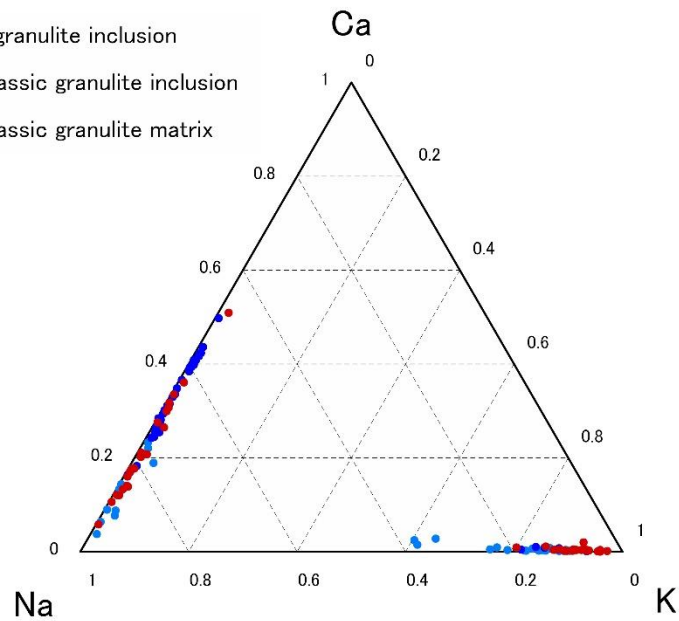
表 3. 長石の主な化学組成.

	PV13 Pl inc*1	PV13 Pl inc	PV13 Kfs inc	PV6 Pl inc	PV6 Pl inc	PV6 Kfs inc	15PV1 Pl inc	15PV1 Kfs inc	15PV1 Pl mt	15PV1 Kfs mt	15PV1 Kfs mt
SiO ₂	65.73	67.35	64.72	64.51	61.98	64.15	61.33	65.27	66.88	65.19	65.01
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	22.32	21.08	19.13	21.90	23.70	18.95	25.20	18.86	21.56	19.02	18.93
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	0.21	0.23	0.78	0.54	0.23	0.15	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
MnO	0.03	0.03	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.08	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.13	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
CaO	2.62	1.28	0.07	2.57	4.27	0.05	5.98	0.02	1.89	0.03	0.03
Na ₂ O	10.47	11.39	0.84	10.26	9.17	0.70	8.36	0.73	10.58	1.09	1.22
K ₂ O	0.22	0.09	15.94	0.13	0.18	16.56	0.15	15.99	0.09	15.54	15.44
Total	101.60	101.47	101.52	100.07	99.57	100.62	101.09	100.88	101.01	100.97	100.63
Si	2.854	2.917	2.958	2.848	2.760	2.962	2.697	2.987	2.904	2.978	2.979
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.142	1.076	1.031	1.140	1.244	1.031	1.306	1.017	1.103	1.024	1.023
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	-	-	-
Fe	0.007	0.008	0.030	0.020	0.009	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000
Mg	0.001	0.000	0.000	0.009	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Ca	0.122	0.059	0.003	0.121	0.204	0.002	0.282	0.001	0.088	0.002	0.001
Na	0.882	0.957	0.074	0.879	0.791	0.063	0.712	0.065	0.891	0.097	0.108
K	0.012	0.005	0.930	0.007	0.010	0.975	0.008	0.933	0.005	0.906	0.902
Total	5.022	5.025	5.028	5.025	5.019	5.042	5.009	5.004	4.992	5.010	5.015

陽イオン数は酸素数 O = 8 で計算した. *1 (PV13) の化学組成は, GASP 地質圧力計に使用した.

(a)

- Felsic granulite inclusion
- Perpotassic granulite inclusion
- Perpotassic granulite matrix



(b)

- Felsic granulite inclusion
- Felsic granulite matrix
- Pyroxene-bearing felsic granulite inclusion
- Pyroxene-bearing felsic granulite matrix
- Pyroxene-bearing felsic granulite symplectite
- Felsic granulite corona
- Pyroxene-bearing felsic granulite corona

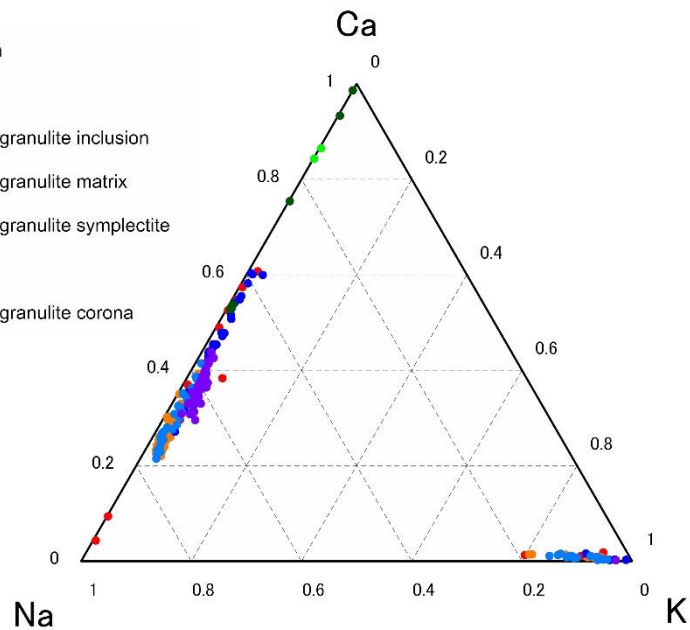


図 10. グラニュライト中の長石の Ca-Na-K 三角図. (a) Plešovice のグラニュライト, (b) Zrcadlová Hut' のグラニュライト. “inclusion” はザクロ石中の包有物, “matrix” はマトリクス中の長石, “symplectite” は単斜輝石とシンプレクタイトを形成する斜長石, “corona” はザクロ石コロナに囲まれてスピネルとシンプレクタイトを形成する斜長石を示す.

考察

Zrcadlová Hut'の珪長質グラニュライト(ZH11)について推定したように(内藤他, 2024), まず, 従来型の地質温度圧力計を用いて, Plešovice の珪長質グラニュライト試料(PV13)の変成温度圧力条件の推定を行う. その地質温度計としてザクロ石と黒雲母の Fe-Mg 交換反応, アルマンディン+フロゴパイト=パイロープ+アノナイトを利用した地質温度計の式(Hodges and Spear, 1982 ; Dasgupta *et al.*, 1991)を使用し, 変成温度条件を制約する. 一方, 地質圧力計としてアノナイト=グロシユラー+藍晶石+石英の反応を利用するザクロ石-Al₂SiO₅相-石英-斜長石(GASP)地質圧力計(Koziol and Newton, 1988)を用いた. この圧力計算では, ザクロ石は理想固溶体として扱い, 斜長石中のアノナイト成分の活動度モデルにはローカルチャージバランスモデル [$a_{An}=X_{An}=Ca/(Ca+Na+K)$]を使用した. これに加え, $3\text{phogopite} + 4\text{kyanite} = 3\text{eastonite} + \text{pyrope} + 4\text{quartz}$ というザクロ石-黒雲母-Al₂SiO₅相-石英間の等化学的式の平衡を用いた圧力計(GBAQ 圧力計)も使用した. この圧力計ではザクロ石中のパイロープ成分の活動度に正則溶液モデルを使用し, 過剰相互作用パラメーターの値に関しては $W_{alm-prp}=2.4\text{kJmol}^{-1}$ と $W_{prp-grs}=33\text{kJmol}^{-1}$ (Holland and Powell, 1998)を採用した. 黒雲母中のフロゴパイトとイーストナイト成分の活動度モデルには Holland and Powell (2006)で提案されているモデルを用いた. また, 上記の反応式中の各鉱物端成分のエンタルピー, エントロピー, モル体積等の熱力学データは Holland and Powell (1998)を使用した.

まず, 後退型累帯構造を示す PV13 のザクロ石のコアの組成 ($X_{alm}=0.68, X_{prp}=0.21, X_{grs}=0.10$) に対して, Ti に富むマトリックスの黒雲母の組成 2 点と ($Ti=0.17, Mg\#=41; Ti=0.18, Mg\#=44$), ザクロ石中の包有物の斜長石の組成 ($X_{An}=0.12$) を使用して計算すると, 約 1.8–2.5GPa, 900–1200°C の温度圧力条件が得られた(図 11). また, GBAQ 地質圧力計では温度を 1000°C として計算すると約 1.5–1.7GPa が推定され, より低圧になり, GASP 地質圧力計とは結果が異なった. これらの値はこの珪長質グラニュライト(PV13)の最高変成温度圧力条件を反映していると考えられる. Perpotassic グラニュライト(15PV1)は藍晶石が含まれてないため圧力の推定はできないが, 試料 15PV1 のザクロ石のコア ($X_{alm}=0.76, X_{prp}=0.15, X_{grs}=0.06$), マトリックス中の Ti に富む黒

雲母の組成 ($Ti=0.17$, $Mg\#=52$)を用いて最高温度を推定すると、2.0GPa の時、約 1130°Cになる。ザクロ石中の黒雲母包有物の周辺でザクロ石の Fe 含有量が多くなっているのは冷却期に黒雲母とザクロ石が元素交換したためと思われる。

内藤他 (2024) では、試料 ZH11 の累進型累帯構造を示し、藍晶石を包有する大きなザクロ石のリムの組成 ($X_{alm}=0.57$, $X_{prp}=0.30$, $X_{grs}=0.12$) に対して、マトリックスの黒雲母の組成 ($Mg\#=0.58$) と包有物の斜長石の組成 ($X_{An}=0.23$) を使用して、最高温度圧力を推定し、約 2.3GPa, 1100°C の値が得られた (図 11)。GBAQ 地質温度圧力計では 1000°C で固定して計算すると、約 2.3GPa が推定された。輝石を含む珪長質グラニュライト (ZH6) については斜方輝石-単斜輝石地質温度計 (Bertrand and Mereier, 1985) と THEARMOCALC ver. 3.21 (Holland and Powell, 1998 のデータが 2002 年に改訂されたデータを使用) を利用した Jd-Qz-Ab 地質圧力計を組合せて推定された温度圧力条件は 0.5–0.8 GPa, 約 750 °C になった。単斜輝石はシンプレクタイトを形成していることから、この温度圧力は減圧期の温度圧力条件を反映していると考えられる。

Plešovice および Zrcadlova Hut' の珪長質グラニュライト試料 (PV13; ZH11) から推定された最高温度圧力条件 (約 1.8–2.5GPa, 900–1200°C および約 2.3GPa, 1100°C) は、これまで提案された Gföhl ユニットのグラニュライトに対する最高変成温度圧力条件 (例えば, Carswell and O'Brien, 1993; Usuki *et al.*, 2017) と比べると僅かではあるがより高温高压条件となっている。ただし、Plešovice の珪長質グラニュライト中の黒雲母の方が $Mg\#$ が低く、Ti 量などの化学組成がばらついているため、使用した鉱物組成が最高変成時の組成を保持しているかが問題となる。

Plešovice の珪長質グラニュライトには累進型の累帯構造を持つザクロ石は見つからず、コロナザクロ石やシンプレクタイトも見られなかった。試料によっては藍晶石が珪線石に置換され、珪線石を多く含む。Plešovice の珪長質グラニュライトの方が、累進型の組成累帯構造を持つザクロ石を含む Zrcadlova Hut' の珪長質グラニュライトよりも減圧および冷却速度が遅く、最高変成作用の保持時間が長く、累進型の組成累帯構造が失われたと考えられる。

しかしながら、黒雲母は流体がない条件でも $phlogopite + quartz = enstatite + sanidine + melt$

という反応を通して 900°C以上で分解することが実験によって確認されている(Bohlen *et al.*, 1983). よって, 今回, 推定された 1000°Cを超える変成温度は本来であれば黒雲母が不安定となる条件となる. しかし, 今回, 分析を行った結果, 研究試料の黒雲母はかなりの量のフッ素(最大 0.65 apfu; O = 11)を含んでいることが明らかとなった. フッ素の黒雲母中への混入は, 黒雲母の安定領域を超高温条件まで広げることが知られており(例えば, Hensen and Osanai, 1994), 本試料においてもそうしたフッ素の混入で黒雲母が安定化された可能性がある.

Plešovice 採石場内では 2.3–3.5GPa の超高压変成作用を経験したとされるザクロ石橄欖岩が塊状や層状に産出する. しかし, 周辺の珪長質グラニュライトはそこまでの高压条件を受けておらず, このようなザクロ石橄欖岩は上昇過程において珪長質グラニュライトに取り込まれた可能性が高い.

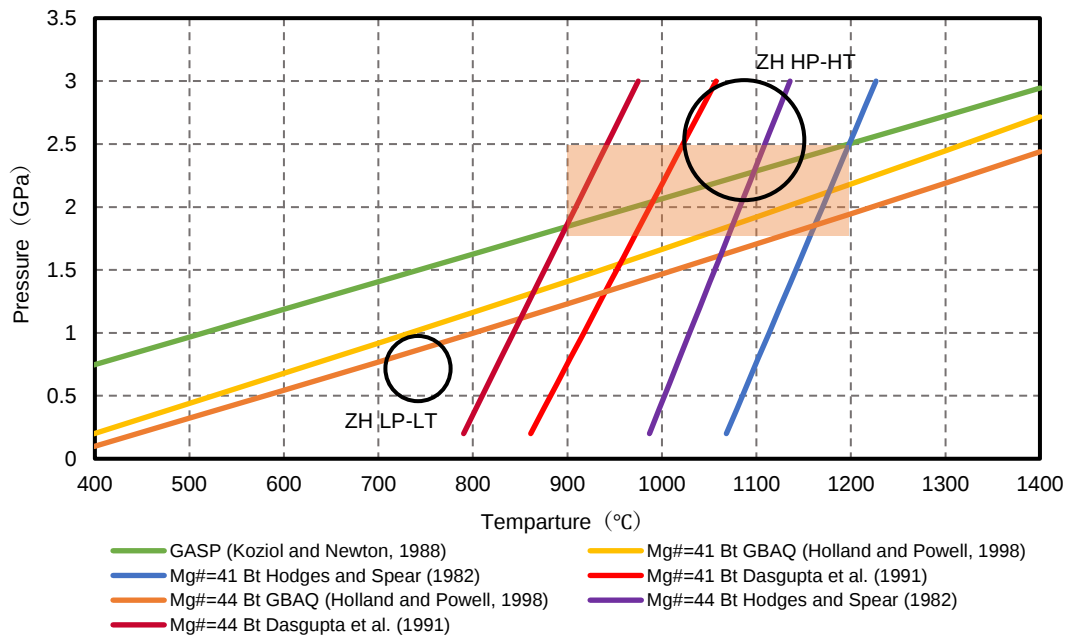


図 11. Plešovice の珧長質グラニュライトの温度圧力条件(PV13). 最高温度圧力条件の推定にはザクロ石のコアの組成, マトリクスの黒雲母の組成, ザクロ石中の斜長石包有物の化学組成をそれぞれ用い, ザクロ石-Al₂SiO₅ 相-石英-斜長石 (GASP) 地質圧力計 (Koziol and Newton, 1988), ザクロ石-黒雲母-Al₂SiO₅ 相-石英 (GBAQ) 地質圧力計 (Holland and Powell, 1998; 2006), 二つの地質温度計 (Hodges and Spear, 1982; Dasgupta *et al.*, 1991) を使用した. 赤枠は Plešovice の珧長質グラニュライトの温度圧力条件を示し, 黒丸は内藤他 (2024) で得られた Zrcadlova Hut' の珧長質グラニュライトの温度圧力条件を示す. 高温条件はザクロ石のコア, マトリクス中の黒雲母, ザクロ石中の斜長石包有物の化学組成を使用し, Plešovice の珧長質グラニュライトに用いたものと同じ地質温度圧力計で計算された. 低温条件は輝石を含む珧長質グラニュライトに対して, 斜方輝石-単斜輝石地質温度計 (Bertrand and Mercier, 1985) と THERMOCALC v3.21 を利用した Jd-Qz-Ab 地質圧力計 (Holland and Powell, 1998 のデータが 2002 年に改訂されたデータを使用) から得られた.

結論

Blanský les 岩体の Plešovice と Zrcadlová Hut' の珪長質グラニュライトの両方が 2.3GPa, 1000°C 以上の高圧高温の変成作用を経験したと考えられるが, Plešovice の変成温度 (最大 1200°C) の方が Zrcadlová Hut' のそれ (1100°C) よりやや高温条件を示している.

また, Zrcadlová Hut' のザクロ石には累進型組成累帯構造が見られたが, Plešovice のザクロ石には累進型組成累帯構造は見られなかった. Zrcadlová Hut' では 1000°C 以上の超高温条件下におかれてもザクロ石中に昇温時の情報が残るほど変成期間が著しく短かったのに対し, Plešovice では変成期間がより長くて累進型組成累帯構造が保存されなかったのだろう.

加えて, Plešovice と Zrcadlová Hut' の間にはザクロ石や黒雲母, 長石の化学組成における顕著な違いが見られた. こうした違いの原因として, 変成温度圧力条件の違いも考えられるが, この二つの地域間に大きな変成温度圧力の違いは得られなかった. 全岩化学組成の違いが構成鉱物組成の違いの原因となっているのだろう.

超高温条件下において, KMASH のようなモデル系では黒雲母は不安定になるが (例えば, Bohlen *et al.*, 1983), フッ素が少なからず含まれていて超高温条件下でも安定したことが考えられる (例えば, Hensen and Osanai, 1994).

今回研究したどの珪長質グラニュライトにもコース石などの超高压条件の指標になるような鉱物は見つからず, 温度圧力推定を行った試料の算出圧力も石英が安定となる 2.2–2.5GPa となった. この算出圧力はこれまでの先行研究 (例えば, Carswell and O'Brien, 1993) における推定結果 (約 2.0GPa) と比べてやや高いが, 超高压条件には達していないという内藤他 (2024) の結論を支持する. Blanský les 岩体の珪長質グラニュライトは 1000°C 以上, 2GPa 以上の高温高圧の変成作用を経験しているが, ザクロ石橄欖岩の変成圧力 (>3GPa) には達していない. ザクロ石橄欖岩は超高压変成作用を受けた後に単独で上昇し, 珪長質グラニュライト中に取り込まれた可能性が高い.

謝辞

本研究で用いた岩石試料は 2014 年, 2015 年に行われたチェコ科学アカデミーとの共同研究調査で, チェコ科学アカデミーのマルチン・スフォイッカ博士およびその調査に参加した方々にはご協力を頂いた。また, **Plešovice** の試料は柴田玲央氏の修士論文で使用された薄片で再度それらを観察・分析した。また, 薄片は岡山大学の技術職員の藤原貴生氏に作成して頂いた。本研究にあたり, 中村大輔准教授には多くのご指導を頂いた。セミナー等では野坂俊夫准教授に貴重なご助言を頂いた。浦川啓教授にはご助言や励ましの言葉を頂いた。以上の方々および現地の共同研究調査でご協力いただいた方々に深く御礼を申し上げる。

引用文献

- Aftalion, M., Bowes, D. R., and Vrána, S. (1989) Early Carboniferous U-Pb zircon age of granetiferous, perpotassic granulites, Blanský les Massif, Czechoslovakia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, **4**, 145–152.
- Arenas, R., Díez Fernández, R., Rubio Pascual, F.J., Sánchez Martínez, S., et al. (2016) The Galicia-Ossa-Morena Zone: Proposal for a new zone of the Iberian Massif. Variscan implications. *Tectonophysics*, **681**, 135–143.
- Bertrand, P. and J-C.C. Mercier. (1985) The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward and absolute geothermometer for the natural system?. *Earth and Planetary Science Letters*, **76**, 109–122.
- Bohlen, S.R., Boettcher, A.L., Wall, V.J. and Clemens, J.D. (1983) Stability of phlogopite-quartz and sanidine-quartz: a model for melting in the lower crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **83**, 270–277.
- Cháb, J., Stráník, Z. and Eliáš, M. (2007) Geological map of Czech Republic 1:500000. Czech Geological Survey. Praha.
- Carswell, D.A. (1991) Variscan high P-T metamorphism and uplift history in the Moldanubian zone of the Bohemian Massif in the Lower Austria. *European Journal of Mineralogy*, **3**, 323–342.
- Carswell, D.A. and Cuthbert, S.J. (2003) Review of representative UHPM terranes: Ultrahigh pressure metamorphism in the Western Gneiss Region of Norway. In *Ultrahigh pressure metamorphism; EMU Notes in Mineralogy 5* (Carswell, D.A. and Compagnoni, R. Eds.). pp. 508, Eötvös University Press, Budapest, 51–73.
- Carswell, D.A. and O'Brien, P.J. (1993) Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Journal of Petrology*, **34**, 427–459.

- Dasgupta, S., Sengupta, P., Guha, D. and Fukuoka, M. (1991) A refined garnet-biotite Fe-Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **109**, 130–137.
- Faryad, S.W., Nahodilová, R., and Dolejš, D. (2010) Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet. *Lithos*, **114**, 54–69.
- Fuchs, G. and Matura, M. (1976) Zur Geologie des Kristallins der südlichen Böhmisches Masse. *Jahrbuch / Geologische Bundesanstalt*, **119**, 1–43.
- Hensen, B.J. and Osanai, Y. (1994) Experimental study of dehydration melting of F-bearing biotite in model pelitic compositions. *Mineralogical Magazine*, **58A**, 410–411.
- Hirajima, T. (1998) Preservation and retrogression of Ultra High Pressure (UHP) rocks: Case Studies of UHP metagranitoids in Western Alps and Su-Lu region. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue*, **53**, 29–48.
- Hirajima, T. and Nakamura, D. (2003) Review of representative UHPM terranes: The Dabie Shan - Sulu orogen. In *Ultrahigh pressure metamorphism; EMU Notes in Mineralogy 5* (Carswell, D.A. and Compagnoni, R. Eds.). pp. 508, Eötvös University Press, Budapest, 105–144.
- Hodges, K.V. and Spear, F.S. (1982) Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist*, **67**, 1118–1134.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of metamorphic Geology*, **16**, 309–343.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (2006) Mineral activity–composition relations and petrological calculations involving cation equipartition in multisite minerals: a logical inconsistency. *Journal of Metamorphic Geology*, **24**, 851–861.
- Kotková, J., O’Brien, P.J. and Ziemann, M.A. (2011) Diamond and coesite discovered in Saxony-type granulite: Solution to the Variscan garnet peridotite enigma. *Geology*, **39**, 667–670.
- Koziol, A.M. and Newton, R.C. (1988) Redetermination of the anorthite breakdown reaction and

- improvement of the plagioclase-garnet Al_2SiO_5 -quartz geobarometer. *American Mineralogist*, **73**, 216–223.
- Massonne, H.-J. and O'Brien, P.J. (2003) Review of representative UHPM terranes: The Bohemian Massif and NW Himalaya. In *Ultrahigh pressure metamorphism; EMU Notes in Mineralogy 5* (Carswell, D.A. and Compagnoni, R. Eds.). pp. 508, Eötvös University Press, Budapest, 145–187.
- Medaris, L. G., Jr, Wang, H. H., Jelinek, E., Misar, Z. and Jelinek, E. (1990). Thermobarometry, diffusion modeling and cooling rates of crustal garnet peridotites: two examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif. *Lithos*, **25**, 189–202.
- Medaris, L. G., Jr, Wang, H. H., Jelinek, E., Mihaljevic, M. and Jakes, P. (2005). Characteristics and origins of diverse Variscan peridotites in the Gföhl Nappe, Bohemian massif, Czech Republic. *Lithos*, **82**, 1–23.
- Naemura, K., Hirajima, T. and Svojtka, M. (2009) The pressure-temperature path and the origin of phlogopite in spinel-garnet peridotites from the Blansky les Massif of the Moldanubian Zone, Czech Republic. *Journal of Petrology*, **50**, 1795–1827.
- 内藤 美桜, 山根 健輔, 中村 大輔 (2024) チェコ共和国・ボヘミア地塊の Zrcadlová Hut' 採石場に産する珪長質グラニュライトが経験した最高温度圧力条件. *岩石鉱物科学*, **53**.
<https://doi.org/10.2465/gkk.231216>
- Nakamura, D., Svojtka, M., Naemura, K. and Hirajima, T. (2004) Very high-pressure (> 4 GPa) eclogite associated with the Moldanubian Zone garnet peridotite (Nové Dvory, Czech Republic). *Journal of Metamorphic Geology*, **22**, 593–603.
- Perraki, M. and Faryad, S.W. (2014) First finding of microdiamond, coesite and other UHP phases in felsic granulites in the Moldanubian Zone: Implications for deep subduction and a revised geodynamic model for Variscan Orogeny in the Bohemian Massif. *Lithos*, **202–203**, 157–166.
- Schulmann, K., Konopásek, J., Janoušek, V., et al. (2009) An Andean type Palaeozoic convergence

- in the Bohemian Massif. *Comptes Rendus Geoscience*, **341**, 266–286.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., et al. (2008) Plešovice zircon – A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, **249**, 1–35.
- Štípská, P., Powell, R. and Racek, M. (2014) Rare eclogite-mafic granulite in felsic granulite in Blanský les: precursor of intermediate granulite in the Bohemian Massif? *Journal of Metamorphic Geology*, **32**, 325–345.
- Tabata, H., Yamauchi, K. and Maruyama, S. (1998) Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane: Mineral-inclusion study of zircons in gneisses from the Dabie Shan. In *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks* (Hacker, B.R. and Liou, J.G. Eds.), pp. 323, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 261–273.
- Usuki, T., Iizuka, Y., Hirajima, T., Svojtka, M., et al. (2017) Significance of Zr-in-rutile thermometry for deducing the decompression P–T path of a garnet-clinopyroxene granulite in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Journal of Petrology*, **58**, 1173–1198.
- van Breemen, O., Aftalion, M., Bowes, D.R., Dudek, A., et al. (1982) Geochronological studies of the Bohemian massif, Czechoslovakia, and their significance in the evolution of central Europe. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, **73**, 89–108.
- Wain, A., Waters, D., Jephcoat, A. and Olijnyk, H. (2000) The high-pressure to ultrahigh-pressure eclogite transition in the Western Gneiss Region, Norway. *European Journal of Mineralogy*, **12**, 667–687.
- Wendt, J.I., Kröner, A., Fiala, J., and Todt, W. (1994) U-Pb zircon and Sm-Nd dating of Moldanubian HP/HT granulites from South Bohemia, Czech Republic. *Journal of the Geological Society of London*, **151**, 83–90.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**, 185–187.
- Ye, K., Yao, Y., Katayama, I., Cong, B., et al. (2000) Large areal extent of ultrahigh-pressure

metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, **52**, 157–164.