

「放射光 CT によるガーネット粒径分布から探る南極大陸の熱史」

兵庫県立大学大学院理学研究科

森 祐紀

1 研究の背景と目的

日本の南極観測拠点である昭和基地周辺の海岸沿い約 400 km には、約 6~5 億年前の変成作用によって形成された変成岩が広く分布しており、「リュツォ・ホルム岩体」と呼ばれている (図 1)。これらは、6~5 億年前に東西 Gondwana 大陸が衝突した際の変成作用によって形成されたと考えられてきた。しかし近年、一部の岩石から 10~9 億年前の変成作用の痕跡が報告され、岩体全体の形成史や連続性について再検討が進められている。さらに、同じ 6~5 億年前の変成岩であっても変成年代にはばらつきが認められ、約 1 億年の間に複数回の変成作用が生じた可能性や、長期間継続する変成作用であった可能性も指摘されている。報告者を含む第 65 次南極地域観測隊ではこれらの様々な年代や温度を持つ露岩の調査に成功し、多数の試料を得ることが出来た (図 1)。

本研究で着目する鉱物粒子の粒径は、一般にその形成反応に必要な高温の継続時間と相関すると考えられている。すなわち、高温状態が十分に長く継続した場合には組織が平衡状態に近づき、粒径は比較的均一になる。一方、継続時間が不十分であれば組織平衡に達せず、同一岩石内でも多様な粒径分布が生じる。したがって、特定の鉱物の粒径分布を調べることで、高温状態の継続時間の推定につながる可能性がある。

そこで本研究では、変成岩中に普遍的に含まれるガーネットの粒径分布に着目し、放射光 3DCT を用いて岩石を撮影し、「リュツォ・ホルム岩体」とされてきた地域の岩石に適用することで、高温状態の継続時間について検討することを目的とした。また、岩石薄片を作成し、波長分散型電子線プローブマイクロアナライザー (EPMA) による鉱物化学分析を実施した。これにより得られた鉱物の化学組成をもとに、対象岩石が経験した変成作用の温度・圧力条件の推定を行った。

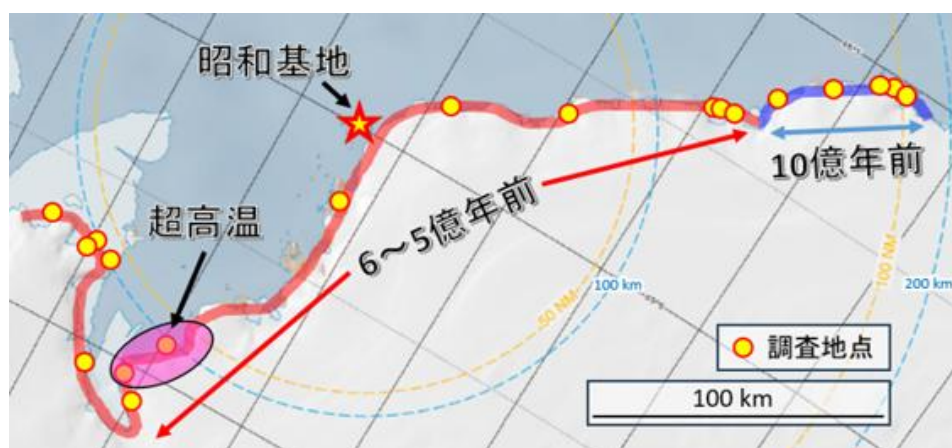


図 1 昭和基地周辺の変成年代と第 65 次南極地域観測隊で調査できた露岩の位置 (調査地点)。この範囲がリュツォ・ホルム岩体と呼ばれてきたが、6~5 億年前と 10~9 億年前の地域があり、さらに超高温変成作用を受けた場所もこれまでに確認されている。

2 研究方法・研究内容

本研究では以下の二つの手法を用いた。

- (1) 放射光 CT によるガーネットの 3 次元分布および粒径の解析
- (2) EPMA による鉱物化学組成分析に基づく変成作用の温度・圧力条件の推定

(1) 放射光 CT による泥質片麻岩の撮影

本研究では、10~9 億年前の大陸衝突の痕跡が報告されている地域から採取された泥質片麻岩を研究対象とした。この試料には直径 1~3 mm 程度のガーネットが多量に含まれており、本研究に適していると判断した。粒径分布を求めるには多数のガーネットが含まれるように十分な体積の岩石試料を撮影し、高い解像度を持つ粒径分布を解析可能なデータを取得する必要がある。また、岩石のような高密度で比較的大きな試料を透過させるためには高エネルギー X 線が必要である。

これらの条件を満たすビームラインとして、大型放射光施設 SPring-8 の BL28B2 を使用した。BL28B2 では高エネルギーを含む白色 X 線が利用可能であり、これまでも大型試料や高密度試料の撮影実績があることからイメージングのビームライン担当者に相談した上で選定した。

放射光 CT に用いる試料の作成では、岩石カッターおよびグラインダーを用いて試料を BL28B2 の試料ホルダーに適合する直径 43 mm、高さ 100 mm の円柱状に加工した。放射光 CT の撮影条件は、粒径測定誤差を抑えるためガーネット粒径に対して十分に細かい空間分解能が必要であることから、1 ピクセル約 15 μm の分解能で試料を回転させながら撮影を行った。

(2) EPMA による鉱物化学分析

上で述べた放射光 CT による 3 次元の組織観察に加え、EPMA による鉱物の化学分析を実施した。分析には九州大学に設置されている JEOL 製 JXA-8530F を使用した。岩石薄片の表面は 1 μm のダイヤモンド粒子を含む研磨剤を用いて鏡面研磨し、洗浄および真空乾燥の後、試料表面に炭素蒸着を施して導電性を付与した。

標準試料には元素濃度が既知の鉱物試料または人工合成試料を使用した。分析条件は、これまでの分析経験を踏まえ、加速電圧 15 kV・照射電流 10 nA とし、ビーム径は 3~5 μm で測定を行った。

3 研究成果

(1) 放射光 CT

撮影試料に含まれる主要鉱物は、密度の小さい順に、石英 (2.6 g/cm^3)、斜長石 (2.7 g/cm^3)、黒雲母 (3.4 g/cm^3)、ガーネット (4.0 g/cm^3)、イルメナイト (4.7 g/cm^3) である。CT の白黒画像では密度が大きい鉱物ほど高輝度(白色)として観察される。本研究ではガーネットを対象としているため、この白黒画像において他鉱物と明瞭に識別できる輝度差が必要である。3 次元構築後のスライスに対して画像処理を行った結果、ガーネット粒子を他鉱物から明確に抽出することができ (図 2)、本研究で用いたビームラインおよび測定条件が泥質片麻岩の 3 次元組織観察に適していることが確認された。また、図 3 に示す岩石薄片と CT 断面を比較してもアーティファクトなどは見られず、適切な条件設定が出来ていると判断できる。粒径分布については繋がった粒子の取り扱いや処理方法を検討する必要がある、今後も継続して実施していく予定である。

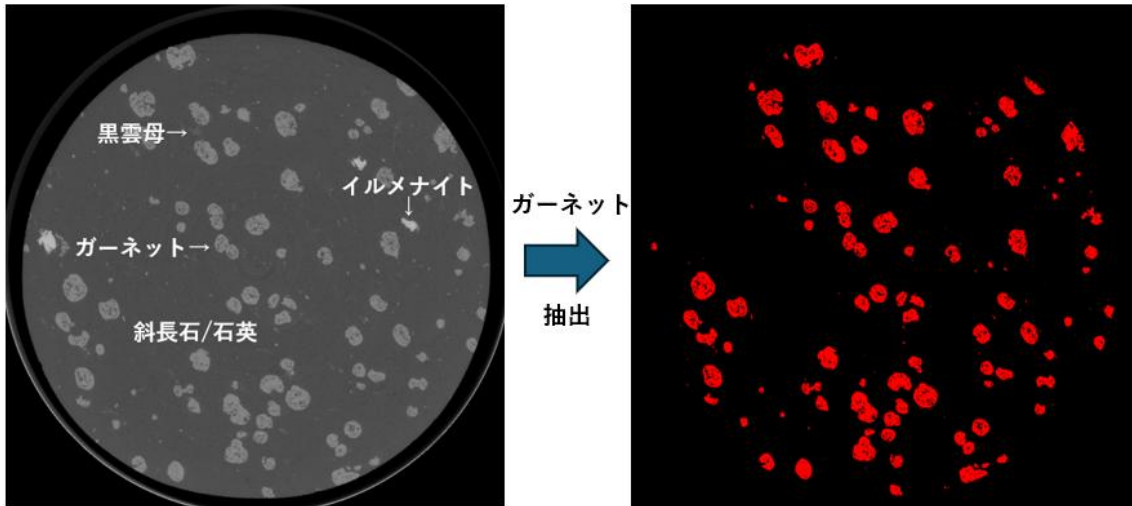


図2 ガーネットを含む泥質片麻岩の放射光CTによる3次元構築後の断面。試料外側の円は試料ホルダーであり直径45 mmである。複数種の鉱物が混在しているが、十分なコントラストの違いが出ているため、ガーネットのみを抽出できている。

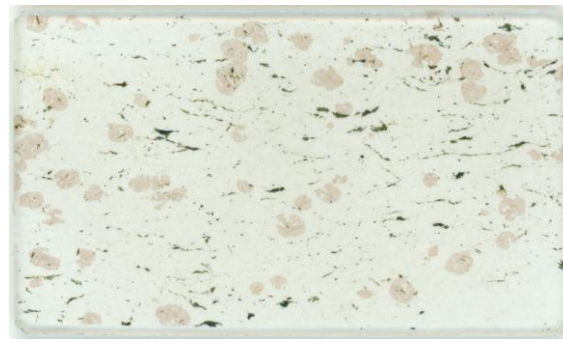


図3 組織観察およびEPMAによる化学分析に用いた岩石薄片(長辺が48 mm)。上のCT断面が特段強いアーティファクトなく、岩石組織を撮像できていることがわかる。

(2) 鉱物化学分析

EPMAによる鉱物化学分析の結果、研究対象試料に含まれるガーネットは、原子数比で $Fe + Mg + Ca + Mn = 1$ としたとき、1粒子内ではほぼ一定の値をとり、 $Fe = 0.71$ 、 $Mg = 0.17$ 、 $Ca = 0.10$ 、 $Mn = 0.02$ であった(図4)。通常、粒子中心部と縁辺部でこの組成比に変化が見られる場合、ガーネットの成長過程における温度・圧力条件を推定することが可能である。しかし、本試料では組成がほぼ均質化しており、組成累帯構造が認められなかったため、成長時の温度圧力条件の詳細な推定は困難であることが判明した。

この組成均質化は、高温条件が長時間継続したことにより固体内拡散が進行した結果と解釈できる。したがって、本地域における10~9億年前の変成作用では、700℃を超える高温条件が十分長期間継続していた可能性が示唆される。この結果が粒径分布から得られる高温の継続時間に対する情報と一致するかを今後検討していく予定である。

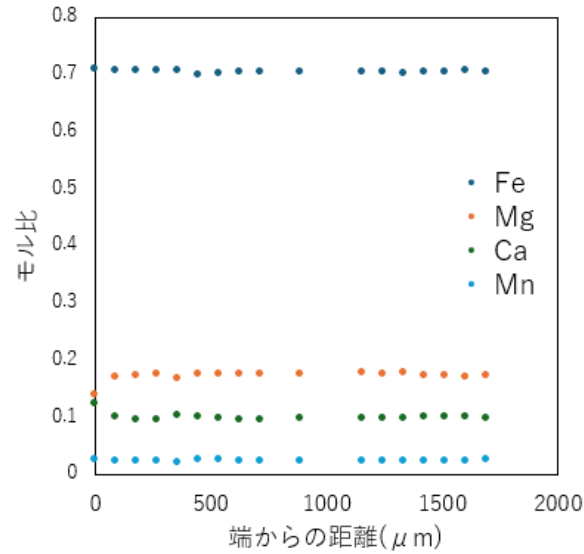


図4 ガーネットの直径を通るように分析したFe、Mg、Ca、Mnの比の変化。特に比の変化がないことから固体内拡散が十分に進行する高温が長時間続いたことがわかる。

4 生活や産業への貢献および波及効果

リュツォ・ホルム岩体は、日本の南極観測隊が活動する主要地域である。昭和基地も立地するこの地域の歴史や地質区分を明らかにすることは、生物学や地理学など他分野の研究にも貢献するとともに、基地建設などの観測拠点整備にも重要な基礎情報を提供する。また、粒径分布解析は製薬や食品製造などの分野において品質管理手法として広く利用されている。本研究により、岩石のような高密度かつ多相からなる試料に対しても放射光CTを適用できることが示された。したがって、本手法は今後、岩石学における迅速かつ高精度な粒径分布測定法として発展する可能性がある。