

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	鈴木 康太
論文題目	Tectonic setting and heat source of an ultrahigh-temperature metamorphic terrane constrained from prograde pressure-temperature-time-melting evolution: an example from Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica (昇温期変成温度-圧力-時間-熔融履歴の構築による超高温変成岩体の形成テクトニクスおよび熱源の制約: 東南極リュツォ・ホルム岩体ルンドボークスヘッタにおける例)		
(論文内容の要旨) 地殻内部の幅広い温度-圧力条件下で進行する広域変成作用のうち、比較的低压条件下 (5-18 kbar) で変成温度が 900°Cを超えるものは超高温変成作用と呼ばれる。超高温変成作用は世界約70地域から報告されており、活動的大陸地殻下部における普遍的な地質現象として認識されつつある。大陸地殻下部相当の圧力条件下で岩石が超高温条件を獲得するテクトニクスや熱源については未解決の問題が多く、これまで活発な研究がなされてきた。特に熱源に関しては、地殻内部の放射性元素の崩壊熱やマントル由来のマグマの移流を含め議論が続いている。 超高温変成帯の形成テクトニクスおよび熱源を制約するためには、超高温に至るまでの昇温期の履歴を岩石から読み取る必要があるが、高温下で進行する化学的再平衡が、昇温期の履歴の解釈を阻んできた。本研究では、東南極リュツォ・ホルム岩体ルンドボークスヘッタに産する泥質な超高温変成岩を例に、昇温期の情報を保持するザクロ石やジルコンの包有物に着目し、拡散の遅い元素であるリン (P) によるザクロ石中の組成累帯構造を等時面として利用し、ジルコンとの共存関係を希土類元素の分配関係から評価することで、昇温期を含めた変成温度-圧力-時間履歴の構築を試みた。加えて、昇温期に成長したジルコン中に取り込まれたメルト包有物の均質化実験および化学組成分析の結果に基づき、かつて超高温変成岩中に存在したメルトの空間的組成均質性を評価し、急激な温度上昇の有無を検証することで、熱源の制約に取り組んだ。 研究試料中のザクロ石は、PのX線元素マップにより、Pに乏しいコア、Pに富むマントル、Pに乏しいリムの3つの領域に区分できた。各領域に包有されるルチルにZr-in-rutile地質温度計を適用することで、各領域の成長時の温度条件を決定した。また、各領域に含まれるAl ₂ SiO ₅ 鉱物をラマン分光計で相同定し、圧力条件を制約した。この結果、ザクロ石コアは昇温期 (840-920 °C/7.7-12.5 kbar) に、ザクロ石マントルは変成ピーク時 (~1000 °C/14 kbar) に、ザクロ石リムは降温期 (~1000 °C/8 kbarと~800 °C/5 kbarの2段階) に成長しており、ザクロ石コアからマントルに向かって温度の上昇とともに圧力も増加していたことがわかった。ザクロ石コアにはガラス包有物が含まれていることから、ザクロ石コア形成時に岩石が部分融解していたことがわかった。 基質のジルコンは、カソードルミネッセンス像観察により、インヘリテッドコア、内側マントル、外側マントル、内側リム、外側リムの5つの領域に区分できた。ザクロ石コア中には外側マントルまで成長したジルコンが包有されているた			

め、ジルコン内側マントルはザクロ石コアよりも前に成長したことが分かった。ジルコン内側マントルは白雲母、石英、メルト包有物を含み、U-Pbジルコン年代は~564 Ma (加重平均年代、以下同じ) を示す。一方、ザクロ石マントル中には内側リムまで成長したジルコンが包有される。ジルコン内側リムは高いTi濃度 (~15 ppm) とTh/U比 (~0.83) を示す内側リム1と、低いTi濃度 (~11 ppm) とTh/U比 (~0.23) を示す内側リム2に分けられる。内側リム1と2はそれぞれ~533 Maと~528 MaのU-Pbジルコン年代を示す。ザクロ石マントルとジルコン内側リム1は、平衡な重希土類元素分配パターンを示すため、~533 Maが変成ピーク (超高温変成) 時の年代であると制約できた。従って、白雲母+石英が共存し得る~700-800 °Cの温度条件 (ジルコン内側マントル成長ステージ) から、3000万年をかけて~1000 °C/14 kbarの超高温条件 (ザクロ石マントルとジルコン内側リム1成長ステージ) に到達したことが分かった。また、本研究地域ではリュウコゾームの固結年代 (~520 Ma) が既に報告されているため、メルトが存在し得る高温状態が少なくとも4000年間継続していたことも明らかになった。

次に、ピストンシリンダーを用いてジルコン中のメルト包有物をガラス化する実験を行い、その化学組成を決定した。また、ザクロ石中のガラス包有物の化学組成も決定した。ザクロ石中のガラス包有物はジルコン中のメルト包有物よりもNa₂Oに乏しくK₂Oに富む。そのため、ザクロ石中のガラス包有物はジルコン中のメルト包有物よりもQz-Ab-Orのノルム図上でQz-Or軸に近い位置にプロットされる。このことは、ジルコンの内側マントル成長ステージ (700-800 °C) からザクロ石コアの成長ステージ (840-920 °C) にかけて、温度上昇とともにメルト組成もコテクティック線に沿って高温側 (Qz-Or軸方向) に向かって徐々に変化したことを示す。ザクロ石コア中では、コアの外側に向かって包有されるルチルのZr濃度が上昇することから、外側ほど高温下で成長したことが示唆される。さらに、ガラス包有物も包有位置によって組成が変化し、ザクロ石コアの外側に包有されるものほど高温下で生じたメルトと解釈可能な組成変化を示した。以上のことから、本研究地域では急激な加熱に起因するメルトの不均質性は記録されていないことがわかった。このことはマントル由来のマグマによる熱移流が熱源であることと相いれない。むしろ、昇温期に圧力が増加していることや、高温継続時間が長いことは、大陸衝突帯下部地殻岩石が放射性元素の崩壊熱によって超高温条件を達成可能とするモデルと整合的である。よって、ルンドボークスヘッタに産する泥質な超高温変成岩は、大陸衝突帯下部地殻岩石が放射性元素の崩壊熱によって超高温条件を達成したと結論した。

本研究は超高温変成岩の温度-圧力-時間履歴とメルト包有物の組成変化に着目することで、超高温変成岩の昇温過程を解明でき、超高温変成岩体の形成テクトニクスや熱源を制約できることを明らかにした。本研究で用いた岩石試料は超高温変成岩としては極めて普遍的な造岩鉱物から成る。したがって、本研究の手法は他地域にも適用可能であり、超高温変成岩体の形成テクトニクスや熱源の解明に大きく貢献すると期待される。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

超高温変成作用は地球史の初期から現在に至るまでその存在が確認されており、その形成テクトニクスや熱源は時代に伴って変化しうる。鈴木康太氏は約5.5億年前の大陸衝突帯下部地殻岩石が露出している東南極・リュツォ・ホルム岩体ルンドボークスヘッタに産する泥質岩起源の超高温変成岩の詳細な研究を行った。本論文では、ザクロ石成長に伴う組成と包有物の変化を用いて超高温変成岩の温度-圧力 (P - T) 履歴を構築し、これと年代ゾーニングするジルコンのU-Pb年代 (t) を、緻密な岩石微細組織観察と微小領域化学組成分析に基づき対応付けた。この結果、超高温変成岩の詳細な P - T - t 履歴を復元し、その履歴に沿った部分熔融メルトの組成変化を検出することに成功した。一般に変成岩の昇温過程の P - T - t 履歴は、変成岩の形成テクトニクス推定に有力な制約条件を与える。しかし超高温変成岩では、 900°C 以上の高温条件下に長時間おかれることから、固溶体鉱物中で元素拡散が起り、昇温変成時の鉱物成長期に固溶体鉱物が記録した組成変化の記録が失われやすい。これが原因で超高温変成岩の昇温過程の詳細は従来わからないままであった。

鈴木氏はこの問題に対し、ザクロ石内で元素拡散が遅い元素であるリンに注目し、リンの濃度の不連続的な変化を等時面として利用しつつ、包有されているルチルにZr-in-rutile地質温度計を適用して温度を求め、同時期に包有された Al_2SiO_5 鉱物から圧力を推定し、包有されるジルコンからU-Pb年代を決定して、ザクロ石成長過程の P - T 履歴を構築した。とりわけ大きな貢献は、ジルコン中の変成鉱物の解析から、ザクロ石形成以前の変成段階の P - T - t 履歴の復元に成功し、超高温変成岩の昇温昇圧変成履歴を世界で初めて明らかにしたことである。これにより、ルンドボークスヘッタの超高温変成岩類は時計回りの P - T - t 履歴を持ち、約4000万年の高温変成継続時間を持つことが明らかとなった。さらに同氏は、ザクロ石が成長する過程で取り込んだメルト (現在ガラス) 包有物の組成が、ザクロ石成長に伴い、ノルム石英が減りノルムカリ長石が増える方向に変化することを見出し昇温に伴うメルト組成の変化であることを示した。また、変成ジルコン中のメルト (現在「ナノ花崗岩」と呼ばれる鉱物集合体) 包有物を、ピストンシリンダーを用いた高温高圧実験で再熔融・均質ガラス化し、その組成を決定した。この結果、ザクロ石形成以前の昇温変成期のメルト組成を決定することに成功した。このメルトの組成は、ザクロ石に包有されるメルト包有物よりもノルム石英に富む組成をしていた。包有されるメルトの組成は、ジルコン中、ザクロ石の内部、ザクロ石の外部に向かって、ハプロ花崗岩系の等圧リキダス面上のコテクティック線ないしはリキダス面上を、化学平衡を保ちつつ、高温高圧側に組成変化したと解釈でき、復元された P - T - t 履歴とも整合的である。よって、昇温変成期の温度上昇は、化学平衡を保てる程度にゆっくりしたものであった可能性が高いことがわかった。本研究でわかった(1)昇温昇圧を伴う時計回りの P - T - t 履歴、(2)約4000万年の比較的長い高温継続時間、(3)ゆっくりした昇温過程、という3つの特徴は、本研究地域の超高温変成作用が、大陸衝突による地殻の厚化と放射性元素の崩壊熱を熱源とするプロセスで説明できることを示す。本研究の手法は、他の超高温変成岩体にも応用でき、今後、同手法を他岩体にも適用することで、地球史における超高温変成岩形成場の変化も議論可能になるだろう。以上の重要な貢献から、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、2023年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。本論文は国際誌に投稿準備中である。

要旨公表可能日：2023年 4月 1日以降