

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成20年度～平成24年度

課題番号：20340152

研究課題名（和文）超高温超高压変成相鉱物の相平衡再現実験と変成プロセスの精密解析

研究課題名（英文）Experimental study of the phase relations among ultrahigh-pressure and ultrahigh-temperature metamorphosed minerals and detailed analyses of the metamorphic process

研究代表者

川崎 智佑（KAWASAKI TOSHISUKE）

愛媛大学・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：50136363

研究成果の概要（和文）：本研究では、超高温変成相鉱物や超高压変成相鉱物の相平衡再現実験を大気圧～上部地殻～上部マントル下部までの広い圧力範囲で行い、新しい地質温度計圧力計を提案した。これらの実験岩石学的研究成果と変成岩類の野外調査・岩石記載的研究の成果とをリンクさせて、東南極ナピア岩体、リュツオホルム岩体、セールロンダーネ岩体などの極限領域変成岩の変成プロセスを精密に解析する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In this research project we proposed new geothermobarometers from the experimental fruits performed at a wide pressure range covering from an atmospheric pressure to the ultrahigh-pressure equivalent to the lower part of the upper mantle of the earth. Combining the experimental results with the geological, petrological and geochemical evidences of metamorphic rocks, we proposed the new methods to calibrate the pressure-temperature path of metamorphosed rocks under the extreme conditions occurring at Napier, Lützow-Holm and Sør Rondane Complexes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	3,100,000	930,000	4,030,000
平成21年度	3,100,000	930,000	4,030,000
平成22年度	2,200,000	660,000	2,860,000
平成23年度	2,900,000	870,000	3,770,000
平成24年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：実験岩石学，相平衡，地質温度計圧力計，超高温変成岩，超高压変成岩，大陸地殻，東南極

## 1. 研究開始当初の背景

記載岩石学的研究や鉱物化学的研究および地球化学的研究から、南極大陸地殻を形成する変成岩類の変成温度圧力経路に「等温減圧型」

と「等圧冷却型」の2タイプが知られていた。しかしながら、実験岩石学と記載岩石学をリンクさせて、個々の変成岩の変成経路を検証するという試みはなされていなかった。本研究

では野外調査研究, 記載岩石学的研究, 実験岩石学的研究をリンクさせることで, 南極大陸地殻を形成する変成岩類の詳細な変成温度圧力履歴の解析に成功した.

## 2. 研究の目的

本研究の目的は, 日本南極観測隊が調査研究活動を展開しているナビア岩体, リュツオホルム岩体, セールロンダーネ岩体に産する変成岩類の変成履歴を精密かつ詳細に解析するための新しい研究手法を提案することである.

## 3. 研究の方法

記載岩石学および鉱物化学的研究から変成条件の違いにより化学組成が変化する鉱物(変成温度圧力見積りに有用な鉱物)について, その変成岩が経験した変成条件に近い温度圧力領域で再結晶再現実験を行い, 実験条件の変化に伴う鉱物の化学組成変化を検証した. これにより, 鉱物増減反応や元素分配反応などの鉱物化学反応の温度圧力依存性を決定し, 研究対象である変成岩の変成温度圧力履歴を定量的にかつ詳細に見積もった.

## 4. 研究成果

(1) リュツオホルム岩体スカルビークスハルゼンでザクロ石-珪線石片麻岩からアーマ

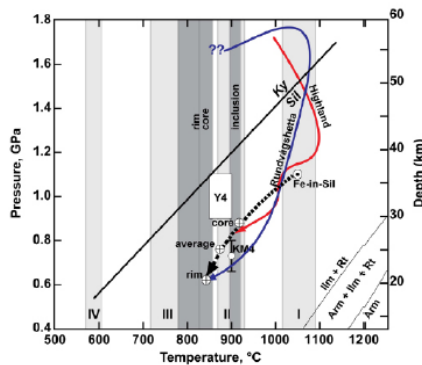


図1 スカルビークスハルゼンの変成温度圧力経路(ダッシュ矢印)

ルコライトの仮像を見いだした(発表論文①;学会発表⑥). 最高変成作用(8.8-11 kbar/970-1050°C)で形成されたアーマルコライトが後退変成作用(6 kbar/780°C)で細粒

のルチルとイルメナイトに分解し, さらに変成作用の最末期の交代変質作用(約 630°C)で一部がシュードルチルへと変化した(図1). 得られた変成経路はルンドボーグスヘッタやスリランカのものと同様している. 低酸素分圧条件で決定したアーマルコライトの安定化温度を10 kbarに外挿すると1290°Cとなり, この地域の片麻岩の最高変成温度よりも著しく高温となった. これは, 低酸素分圧条件でアーマルコライトの安定化温度が上昇することによる. アーマルコライトは超高温変成作用の新しい指標鉱物になり得るので, 高酸素分圧条件に制御した高温高压実験からFe<sup>3+</sup>に富むアーマルコライトの安定領域を早急に決定する必要がある.

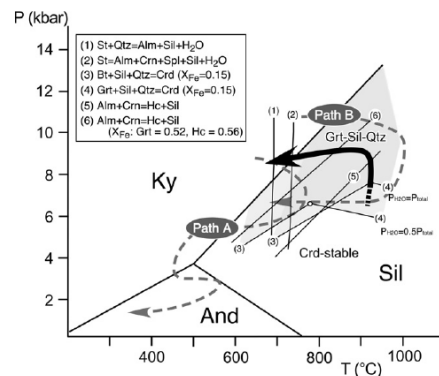


図2 ブラトニーパネにおける反時計回りの変成温度圧力経路

(2) セールロンダーネ山域のグラニュライトの詳細な岩石記載, 鉱物化学地質温度圧力計およびシュードセクション法から, ブラトニーパネ地域のグラニュライトが反時計回りの等圧冷却の変成履歴(図2)を持つことを明らかにした(発表論文②;学会発表①, ⑩). ブラトニーパネ地域では, 活動的な原始 Gondwana 大陸縁辺部における熱流を熱源とした変成作用が起り, 続いて海洋地殻がのし上がることによって圧力が増大したことが明らかになった. これらの事象は原始 Gondwana 大陸縁で6億5千万年から6億年に起こった.

(3) リュツオホルム岩体ルンドボーグスヘッ

タの優白質ザクロ石-珪線石片麻岩のザクロ石斑状変晶中に大隅石を発見した(発表論文③;学会発表⑧). 石英Ti 温度計(発表論文9)などの鉱物化学地質温度計およびルンドボーグスヘッタ優黒質グラニュライトの相平衡実験から各ステージの温度圧力条件を決定した(図3).

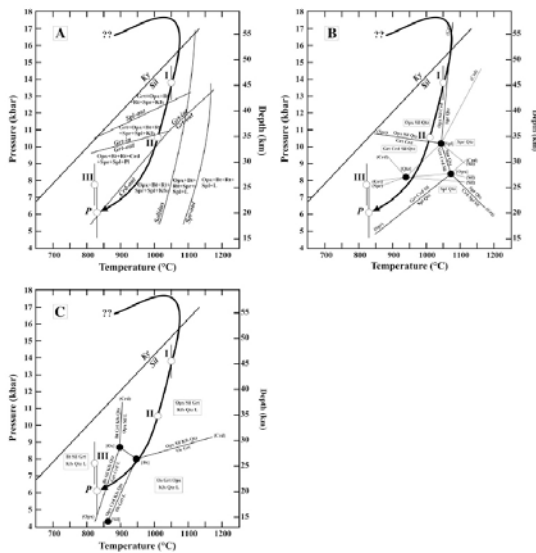


図3 ルンドボーグスヘッタの変成温度圧力経路

(4) 西オングル島の石英長石質ザクロ石黒雲母片麻岩を切るペグマタイトの磁鉄鉱巨晶中にヘグボマイトを見いだした(発表論文④;学

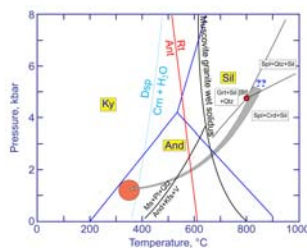


図4 西オングル島における温度圧力経路

会発表②). 磁鉄鉱巨晶に含まれる様々な鉱物や鉱物組み合わせから、西オングル島の変成履歴を決定した(図4). ヘグボマイトは、角閃岩相~超高温変成岩相やエクロジャイト相まで、広い温度圧力条件で産出報告がある. ヘグボマイトの安定領域を決定することで、変成岩のより詳細な変成履歴解析に役立つと考

えられる.

(5) 超高压力条件下で単斜輝石へのSiO<sub>2</sub>の固溶量が系の総化学組成(特に系のSiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量)に依存することを80 kbarの相平衡再現実験から明らかにした(学会発表③). 高压

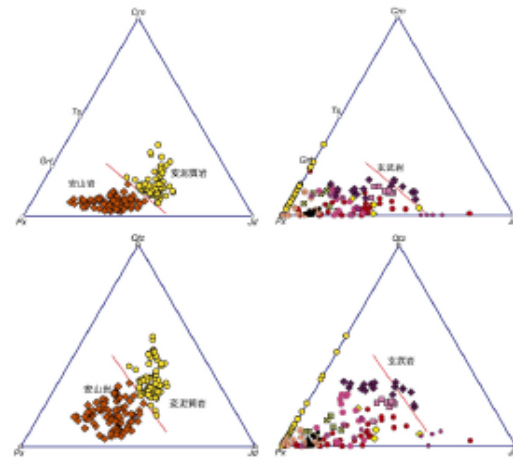


図5 変泥質岩と安山岩から80 kbar/1000-1500°Cで得た単斜輝石の組成(左)と先行実験の玄武岩やエクロジャイトから得られた単斜輝石の組成(右).

条件で、Caエスコラ成分(Ca, Mg, Fe)<sub>0.5</sub>□<sub>0.5</sub>Al-Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>や(Ca, Mg, Fe)Al<sub>2/3</sub>□<sub>1/3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>成分が固溶するために、シリカ成分に過剰な単斜輝石が形成される. SiO<sub>2</sub>およびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に飽和した変泥質岩とSiO<sub>2</sub>に飽和しAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に不飽和な高Mg安山岩を使って、総化学組成の違いによる単斜輝石のSiO<sub>2</sub>固溶量の違いを検証した(図5). 変泥質岩ガラスから単斜輝石+ザクロ石+コース石+藍晶石を得た. 安山岩粉末からは藍晶石を欠いて少量のコース石を含む単斜輝石+ザクロ石を得た.

(6) 珪線石のFe<sup>3+</sup>固溶量の温度圧力依存性を決定した(学会発表④). 出発物質は、珪線石(ルンドボーグスヘッタ産Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量0.6wt%)とヘマタイトの混合粉末および変鉄鉱石(リーセルラルセン山産)粉末である. 変鉄鉱石はイルメナイト、ザクロ石、珪線石(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量0.7 wt%)および石英からなる. これらを約1,000時間、白金試料容器(珪線石+ヘマタイ

ト)と金パラジウム試料容器(変鉄鉱石)中で反応させた. 珪線石-ヘマタイト系では, 珪線石の $Fe_2O_3$ 含有量は5 kbarで1.0 wt%から15 kbarでは2.4 wt%に増加した(図6). 変鉄鉱石

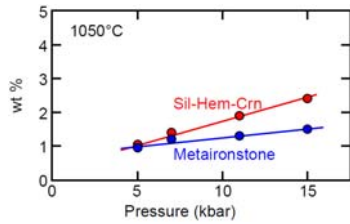


図6 1050 °Cにおける珪線石の $Fe_2O_3$ 含有量では,  $Fe_2O_3$ 含有量は5 kbarで1.0 wt%であったものが15 kbarではわずかに1.5 wt%に増加した(図6). 両者の $Fe^{3+}$ 固溶量の違いは $Fe^{3+}$ を緩衝する共存鉱物の違いによるためである.

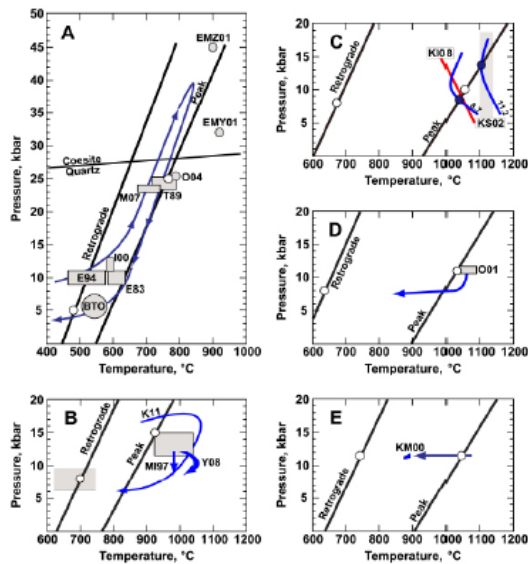


図7 石英のTi含有量から得た変成岩の温度と圧力の関係と変成条件

(7) 超高温変成岩類に有用な新しいTi石英温度計を高温高压実験から構築した(学会発表⑤). 大気中で1気圧から20 kbarまでの圧力範囲で, 800°Cから1500°Cまでの温度範囲で電気炉とピストンシリンダー装置を用いて, 4時間から3,764時間の保持時間で逆反応実験を行い, ルチルと共存するシリカ鉱物の $TiO_2$ 固溶量を決定した. 石英の $TiO_2$ 量は温度とともに増加し, 圧力上昇でわずかながら減少する. この温度計は超高温変成岩類の変成温度圧力

を見積もるのに有力なツールである(図7). 今回提案した温度計を用いて得られた変成温度は経験的溫度計(発表論文⑥)とよく一致する.

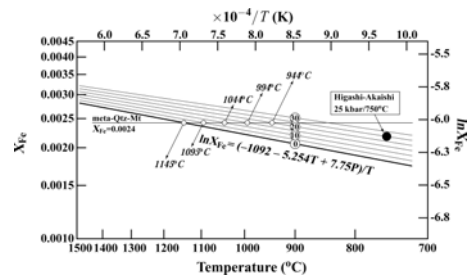


図8 石英の $Fe^{3+}$ 含有量の温度圧力変化. 5 kbar毎の圧力に対する変鉄鉱石の変成温度と東赤石山エクロジヤイトの変成温度圧力(●印: 25 kbar/750°C). 図中の水平線はリーセルラセン山石英の $Fe^{3+}$ 含有量.

(8) ザクロ石Ti地質温度計を確立した(学会発表⑦). 斜方輝石, 石英およびルチルと共存するザクロ石のTi含有量を7-23 kbar/800-1300°Cで, ザクロ石の $TiO_2$ 含有量が異なった2つのグラニュライトを用いた逆反応実験から決定した. 超高温変成条件でCaに乏しいザクロ石のTiは4配位のSiを置換し, ザクロ石のTi含有量は温度上昇とともに増加した. 今回の実験結果からリュツオホルム岩体ルンドボーグスヘッタの優白質ザクロ石-珪線石片麻岩とナピア岩体マッキンタイヤ島の斜方輝石グラニュライトの後退変成作用をそれぞれ6.6 kbar/833°Cおよび10.3 kbar/928°Cと決定した.

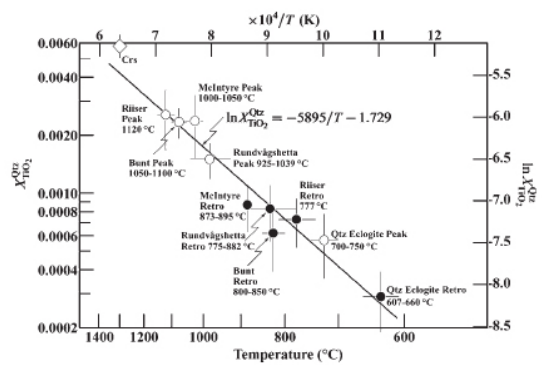


図9 石英のTi含有量の対数と温度の逆数との関係. ○:ピーク, ●:後退変成作用.

(9) ナピア岩体リーセルラルセン山縞状鉄鉱層の変成温度を石英の $\text{Fe}^{3+}$ 含有量から見積もった(発表論文⑤). ヘマタイトと共存する $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系クリストバライトの $\text{Fe}^{3+}$ 含有量を大気中990-1460°Cで求めた. 石英の $\text{Fe}^{3+}$ 含有量が温度圧力とともに増加することを明らかにした. この新しい石英Fe温度計を東南極ナピア岩体リーセルラルセン山の超高温変成石英-磁鉄鉱岩に適用し, 変成圧力を5-15 kbarに仮定すると, この地域の変成温度が994-1095°Cとなった(図8).

(10) ルチルと共存する石英中のTi固溶量から経験的地質温度計を提案した(発表論文⑥). 地質学的岩石学的に詳細に研究されている変成岩中の石英を精密化学分析することから, 石英中のTi飽和度が変成温度に伴って増加することを見いだした(図9).

(11) ナピア岩体の超高温変成岩類の原岩構成を調べた(発表論文⑦;学会発表⑨). コマチアイト-TTG系列が始生代グリーンストーン帯と類似しており, TTGを原岩とした超高温変成岩類中のジルコンのSHRIMPおよびSIMS U-Th年代は38, 36, 30, 26億年に集中している. これは原岩形成に4段階あったことを示唆し, 原岩形成の構造的環境として, 海洋内島弧とそれに関連した沈み込み帯が考えられる.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文(査読有)] (計45件)

- ① Kawasaki T, Adachi T, Nakano N, Osanai Y, 2013 Possible armalcolite pseudo-morph-bearing garnet-sillimanite gneiss from Skallevikshalsen, Lützow-Holm Complex, East Antarctica: Implications for ultrahigh-temperature metamorphism. Geol Soc London Spec Pub 383 (in press)
- ② Baba S, Osanai Y, Nakano N, Owada M, et al (4) 2013 Counter-clockwise  $P$ - $T$  path

and isobaric cooling of metapelites from Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica: implications for a tectonothermal event at the proto-Gondwana margin. Precambrian Res (in press)

- ③ Kawasaki T, Nakano N, Osanai Y, 2011 Osumilite and a spinel+quartz association in garnet-sillimanite gneiss from Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Gondwana Res 19 430-445
  - ④ Kawasaki T, Hamada S, 2011 Högbomite from West Ongul Island, East Antarctica. Mineral Mag 75 1161-1161
  - ⑤ Kawasaki T, Ishizuka H, 2008 Experimental study of  $\text{Fe}^{3+}$  solubility in cristobalite and its application to a metamorphosed quartz-magnetite rock from Mt. Riiser-Larsen area, Napier Complex, East Antarctica. Jour Mineral Petrol Sci 103 255-265
  - ⑥ Kawasaki T, Osanai Y, 2008 Empirical thermometer of  $\text{TiO}_2$  in quartz for ultrahigh-temperature granulites of East Antarctica. Geol Soc London Spec Pub 308 419-430
  - ⑦ Ishizuka H, 2008 An overview of geological studies of JARE in the Napier Complex, Enderby Land, East Antarctica. Geol Soc London Spec Pub 308 121-138
- [雑誌論文(査読無)] (計4件)
- [学会発表] (計87件)
- ① 馬場壮太郎, 小山内康人, 中野伸彦, 大和田正明 ほか (4) 2012 東南極セールロンダーネ山地ブラトニーパネ地域における反時計回りの温度圧力経路. 日本地質学会第119年学術大会 09.16 大阪



- ② Kawasaki T, Hamada S 2011 Högbomite from West Ongul Island, East Antarctica. Goldschmidt Conf 08.15 Praha, Czech Republic
- ③ Kawasaki T, Osanai Y, 2011 Experimental study on the phase relations of granitic and andesitic crustal rocks at 8.0 GPa pressure. 9th Inter Eclogite Conf 08.07 Mariánské Lázně, Czech Republic
- ④ Kawasaki T, Osanai Y, Ishizuka H, 2011 An experimental study on  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  solubility in sillimanite to calibrate Fe-in-sillimanite geothermobarometer for ultrahigh-temperature granulites. 11th Inter Symp Antarct Earth Sci 07.12 Edinburgh, Scotland
- ⑤ 川寄智佑, 小山内康人, 2010 ルチルと共存する石英中のTi固容量の温度圧力依存性. 日本鉱物科学会2010年年会09.23松江
- ⑥ Kawasaki T, Shirakawa C, Nakano N, Osanai Y, 2009 Ilmenite-rutile intergrowth in garnet sillimanite gneiss from Skallevikshalsen, Lützow-Holm Complex, East Antarctica: Implications for ultrahigh-temperature Metamorphism. Ann Meet 2009 Mineral Soc MAPT 09.01 Edinburgh, United Kingdom
- ⑦ Kawasaki T, Motoyoshi Y, 2009 Solubility of  $\text{TiO}_2$  in garnet to calibrate Ti geothermobarometry for ultrahigh-temperature granulites. Granulites & granulites 2009 07.13 Hrubá Skála Chateau, Czech Republic
- ⑧ Kawasaki T, Nakano N, Osanai Y, 2008 Metamorphic  $P$ - $T$  path of Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica inferred from inclusions of osumilite and spinel + quartz within garnet porphyroblasts of garnet-sillimanite-quartz gneiss. 5<sup>th</sup> Inter Symp Gondwana Asia 2008 IAGR Ann Con 11.02 Seoul, Korea
- ⑨ 石塚英男, 2008 東南極ナピア岩体の原岩構成とその起源. 日本地質学会第115年学術大会 09.20 秋田
- ⑩ Osanai Y, Toyoshima T, Baba S, Hokada T, et al (5) 2008 Pan-African collision metamorphism in the Sør Rondane Mountains, Eastern Dronning Maud Land, East Antarctica. Gondwana 13th Conf 09.16 Dali, China
- [図書] 計(1)件  
[その他]  
ホームページ等  
<http://www.sci.ehime-u.ac.jp/~toshkawa/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
川寄 智佑 (KAWASAKI TOSHISUKE)  
愛媛大学・理工学研究所・教授  
研究者番号：50136363
- (2) 研究分担者  
石塚 英男 (ISHIZUKA HIDEO)  
高知大学・自然科学系・教授  
研究者番号：00142349  
小山内 康人 (OSANAI YASUHIITO)  
九州大学・比較社会文化研究科(研究院)・教授  
研究者番号：80183771  
佐藤 桂 (SATO KEI)  
東京工業大学・理工学研究所・21世紀COE  
研究員  
研究者番号：80422533  
(日本学術振興会特別研究員PDに採用されたので、平成21年度以降は研究分担者から外れた)
- (3) 連携研究者  
井上 徹 (INOUE TOORU)  
愛媛大学・地球深部ダイナミクスセンター・教授  
研究者番号：00291500