

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月25日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400520

研究課題名(和文)単鉱物地質温度圧力計体系の確立

研究課題名(英文)Systematization of the Single Mineral Geothermobarometry

研究代表者

大森 聡一(Omori, Soichi)

放送大学・教養学部・准教授

研究者番号：90267469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：砂粒1つから、その砂粒の起源となった岩石(母岩)の生成温度圧力を見積る単鉱物地質温度圧力計の理論体系をまとめた。過去の研究例に見られる同種の地質温度圧力計を、その特性により分類し熱力学的な解釈を与えた。本来、砂粒の起源の岩石(母岩)の化学組成がわからなければ、地質温度圧力計を適用することは出来ないが、化学組成の中から互いに相関する成分を見いだして、地質温度圧力計に組み込む「暗黙の関係」型単鉱物地質温度圧力計を新たに提案した。これにより、砂粒の化学組成のみから母岩の生成条件を議論可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Thermodynamic basis of the single mineral geothermobarometry (SMG) is established in this study. Conventional SMGs are classified and interpreted on the basis of phase equilibrium thermodynamics. A new type of the SMG "implicit correlation type", which uses correlated components in the system, was proposed.

研究分野：岩石学

キーワード：地質温度計 地質圧力計 相平衡熱力学

1. 研究開始当初の背景

近年の微小領域分析技術の高精度化により、ジルコン中の Ti 含有量やルチル中の Zr 含有量を用いた地質温度計が提案された。地質体の存在しない冥王代や、削剥等により失われた過去の地質体を研究する上で、碎屑粒子としてのジルコンやルチルから母岩体の生成温度を見積ることができれば、これは大変重要な地球科学のツールとなる。しかし、これらは基本的に元素分配温度計であり、温度と共に、岩石中の Zr や Ti の化学ポテンシャル(活動度 含有量)の影響を受けることは、熱力学的に自明である。やはり、碎屑粒子 1 粒から母岩の生成温度を見積るというのは、都合が良すぎるのだろうか？

申請者は、Collerson et al. (2010)において熱力学と統計的手法を併用して、メジャーライト質ガーネット 1 粒子の化学組成から、高温高压における生成温度圧力を見積る経験式を導き、いん石生成条件推定への応用を示した際に、メジャーライト質ガーネットについて導かれた経験式が、特別な例外ではなく、岩石の地球化学的性質を含めて一般化した理論によって説明できる可能性に気づき、鉱物 1 粒子から実用上問題ない精度で、温度(と圧力)を経験的に見積る方法の体系化、および、そのジルコン、ルチル、およびその他の主に碎屑物に含まれる鉱物への適用が、地球科学的に重要であると考えに至った。

2. 研究の目的

本申請では、1) 単鉱物地質温度圧力計の理論体系の整理と、2) ジルコンおよびザクロ石に関するこれまでの記載および実験をコンパイルして、単鉱物地質温度圧力計の理論に基づく解析を行い、温度圧力計の経験式を導く。

3. 研究の方法

本研究は、紙と鉛筆による単鉱物地質温度圧力計の定式化、モデル計算により演繹的に実用可能な単鉱物地質温度圧力計を探る研究、および既存の鉱物・岩石の化学組成の記載から帰納的に単鉱物地質温度計を発見する研究の 2 パートで構成する。

(1) 定式化と演繹的検証

単鉱物地質温度圧力計が成り立つのは、鉱物への複数の元素の分配と、それらの元素の岩石中における含有量の傾向に特別な関係がある場合である。この関係を定式化して表現する。

地殻やマントルを構成する代表的な岩石の実際の化学組成(公開されている岩石化学組成データベースや文献を用いる)を元に、鉱物の熱力学データ、微量元素の分配係数など

を用いて、熱力学計算により、ザクロ石、角閃石、フェンジャイトなどの鉱物の化学組成の、温度 圧力依存性を求める。その結果を多変量解析し、定式化の経験的検証を行う。

(2) 帰納的探索

温度 圧力とともに記載されている鉱物(ザクロ石、ジルコン、磁鉄鉱、ルチルなど)の化学組成データを文献から収集し、その原岩の種類・組成を加味して、多変量解析から、温度 圧力に強く支配された含有量を示す鉱物と、全岩組成の指標となる元素の組み合わせを探索する。ジルコンとザクロ石を優先的課題とする。前述の Collerson et al. (2010)では、すでにデータセットが得られているので、この論文で取り扱ったメジャーライト質ザクロ石についても、1の結果にしたがって再検討を行う。

4. 研究成果

4-1 従来型単鉱物地質温度圧力計の体系化

単鉱物地質温度圧力計をタイプ分けし、その熱力学的体系を整理した。これまでに用いられてきた単鉱物地質温度圧力計は、3つのタイプに分けられる(図1)。

Mineral	Element	Counterpart	Type
Phengite	Si	SiO ₂ phase	1, 3
Opx	Ca	Cpx	2
Cpx	K	Mica (?)	1, 3
Garnet	Ti	Rutile or others?	1, 3
Zircon	Ti	Rutile or melt	1, 3

図1 従来型単鉱物地質温度圧力計の分類

各タイプの単鉱物地質温度圧力計は、見かけは単鉱物であるが、その背景には、別の相(以後、この相をバッファー相と記す)によって化学ポテンシャルがバッファーされた状況が存在していることを明示した(図2~4)。

タイプ1は、そのバッファー相が純粋相である場合で、たとえば塩基性かつ石英過剰条件下におけるフェンジャイト中の Si 量がこのタイプに相当する。

タイプ2は、バッファー相が固溶体相である場合である。これは、通常地質温度圧力計に相当するが、多成分の固溶体の組み合わせに対して、自由度が2となるような固溶体成分数を確保できる場合、図2のSMG(2)の組成範囲においては、単鉱物の組成のバルク依存性がなくなり、単鉱物地質温度圧力計が機能する。

タイプ3は、タイプ1のバリエーションで

あるが、バッファ相の代わりに、別の相(の組み合わせ)によってバッファされた成分の化学ポテンシャルによって、ある鉱物の組成が決まる場合である。

いずれのタイプも、厳密には単鉱物の組成におけるバルク組成の影響はゼロでは無いが、岩石学的実用性の範囲において、意味のある情報を提供することができる。これが、これまでに用いられてきた単鉱物地質温度圧力が、経験的に機能してきた原理である。

単鉱物地質温度圧力計(タイプ1, 2)の模式的x-G関係

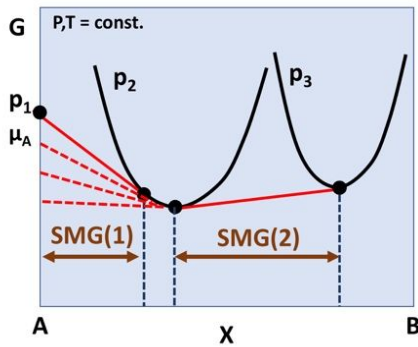


図2

単鉱物地質温度圧力計の模式的x-G関係(タイプ3)

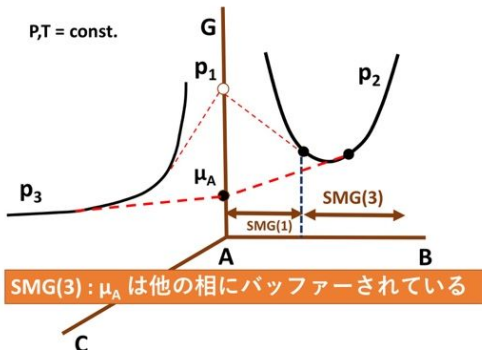


図3

単鉱物地質温度圧力計の模式的x-G関係(タイプ3)

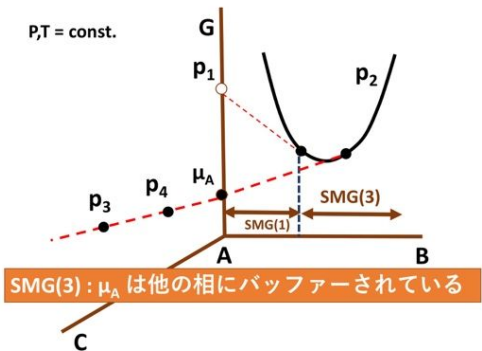


図4

4-2 新たな「暗黙の関係」型単鉱物地質温度圧力計の提案

従来型単鉱物地質温度圧力計の解析の結果、バッファされた化学ポテンシャルが単鉱物地質温度圧力計成立の条件であることが示されたが、これを発展させて、ある成分の化学ポテンシャルが、他の成分の化学ポテンシャルと相関を持つ場合にも、単鉱物地質温度圧力計が成立し得る、という着想を得た(図5)

「暗黙の関係」型単鉱物地質温度圧力計の提案

模式的定式

$$1. (\partial G(T,X)/\partial X)(1-X) + G(T,X) = \mu_A$$

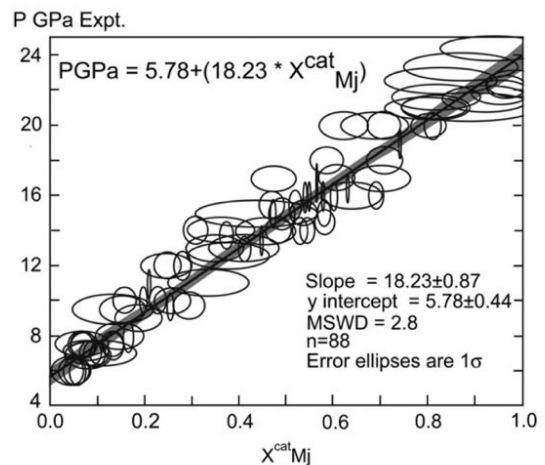
$$2. (\partial G(T,X)/\partial X)(1-X) + G(T,X) = \mu_B$$

$$3. \mu_A = f(\mu_B)$$

図5

天然の岩石を対象とした場合、その様な仮定が成り立つ場合があるかどうかを検討した。その結果、実在の地殻岩石の化学組成は、火成岩の分化や、鉱物碎屑粒子の混合、変成作用による鉱物生成などの過程を経て形成されるため、その化学ポテンシャルの自由度は成分数よりも小さくなる場合があり得ることを示した。これにより、「暗黙の関係」型単鉱物地質温度圧力計が可能であることが明らかになった。

この理論的背景に基づき、以前の研究を再検討した結果、Collerson et al. (2010)で示された、メジャーライト地質温度圧力計(図6)は、この「暗黙の関係」型単鉱物地質温度圧力計で説明出来ることがわかった。



$$X^{\text{cat}}\text{Mj} = 0.5(\text{Si} + \text{Ti} + 2.25\text{Na} - 0.5 * (\text{Al} + \text{Cr}) - 2)$$

図6 Collerson et al. (2010)のメジャー ライト地質温度圧力計

これらの成果を現在，論文投稿準備中である。

4-3 今後の課題

研究計画で提示した，ジルコン単鉱物地質温度圧力計の検討は，ジルコンの微量成分記載と生成温度圧力条件のデータセット作成の半ばで研究期間が終了した。データ解析手法として，MATLAB で多変量解析およびランダムフォレスト法の学習解析の利用を可能とし，解析の効率は研究開始時よりも向上している。これらの蓄積を活かし，当初の目的である，ジルコンへの適用を実現すべく，さらに研究を継続する予定である。

<引用文献>

Collerson KD, Williams Q, Kamber BS, Omori S, Arai H, Ohtani E, 2010 Majoritic garnet: A new approach to pressure estimation of shock events in meteorites and the encapsulation of sub-lithospheric inclusions in diamond, GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA, 74, 5939-5957

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 1 件)

Omori S. (2016) Single mineral geothermobarometry, International Symposium “Metamorphic rocks and metamorphism: Future Perspectives”, Okayama University, 2016.3.14. (国際学会)

[図書](計 2 件)

丸山茂徳，大森聡一，磯崎行雄 (2016) 宇宙生命論 2 章 3 節「地球生命史から宇宙生物学の体系化へ」，海部ほか編，東京大学出版会

大森聡一 (2018) 沈み込み帯の熱史と物質循環，鳥海他編「図説地球科学の事典」，朝倉書店

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大森聡一 (Soichi Omori)
放送大学・教養学部・准教授
研究者番号：90267469

(4)研究協力者

新井宏嘉 (Hiroyoshi Arai)
早稲田大学高等学院・教諭