

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820393

研究課題名(和文) マグマ-熱水系における鉱床形成プロセスと流体包有物の基礎研究

研究課題名(英文) Ore-forming process and fluid inclusion study in magma-hydrothermal system

研究代表者

高橋 亮平 (Takahashi, Ryohei)

秋田大学・国際資源学研究所・助教

研究者番号：10396286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本、タイ、ラオス等の地域における浅熱水金鉱床、斑岩銅-金鉱床を研究対象とした。現地において地質調査を行い、室内実験として、鉱石の肉眼および顕微鏡観察による鉱化段階区分と鉱物組合せの記載、粉末X線回折分析、年代分析、全岩化学組成分析、流体包有物マイクロサーモメトリーおよびガス組成分析、EPMA分析、同位体分析を行った。鹿児島県・菱刈鉱床の研究では、石英脈の金含有量、形成深度、熱水の捕獲温度・塩濃度、流体包有物のガス組成に一定の関係があることが明らかになり、このことから鉱床形成に関わった熱水の性質と挙動を考察した。その他の研究対象についても鉱床形成プロセスを明らかにする研究を行った。

研究成果の概要(英文)：This research focused on epithermal gold deposits and porphyry copper-gold deposits in Japan, Thailand, Laos and so on. Laboratory experiment conducted are naked eye and microscopic observation of ores and description of ore mineral assemblage, XRD analysis, age dating, bulk chemical composition analysis, fluid inclusion microthermometry and gas composition analysis, EPMA analysis and isotopic composition analysis. In the study of the Hishikari deposits, Kagoshima, Japan, a relationship among the gold content of quartz veins, ore-forming depth, trapping temperature and salinity of hydrothermal fluids and fluid inclusion gas composition was observed. On the basis of this relationship, the characteristics and behavior of hydrothermal fluids were examined. Similar studies to reveal ore-forming process were conducted for other deposits.

研究分野：金属鉱床学

キーワード：浅熱水金鉱床 斑岩銅鉱床 スカルン金鉱床 鉱床形成プロセス 流体包有物 酸素-水素-硫黄同位体  
菱刈鉱床 Chatree鉱床

## 1. 研究開始当初の背景

マグマ-熱水系における物質循環は、貴金属-ベースメタル-レアメタル元素といった人類にとって有用な金属資源の濃集をもたらす重要なプロセスである。

日本の資源開発企業は、これまでに、金-銀、銅-鉛-亜鉛などを対象とした多くの鉱山開発を行い、国内の殆どの鉱山が閉山した現在も、高度な技術をもって海外資源探査・開発を行っている。資源地質学は、金属鉱床の形成メカニズムに関わる基礎研究であるのと同時に、資源探査に貢献をもたらす。近年、貴金属やレアメタルのハイテク産業における需要の高まりと地下資源開発に関わる人材育成の必要性から、文科省は、金属資源探査と開発の基礎研究・教育の拠点として、2014年に秋田大学に国際資源学部を新設した。今後、海外地域を含めた金属鉱床研究を精力的に実施することが要請されている。

申請者は、これまでの研究で、日本(北海道、鹿児島県)、ロシア(カムチャツカ半島)、インドネシア(ジャワ島)などの環太平洋造山帯に属する熱水鉱床を研究してきた。

## 2. 研究の目的

タイ王国の最大の金鉱山である Chatree 鉱山は、主要な鉱体である浅熱水性金鉱床、及び、周辺地域に異なるタイプの鉱化作用が認められるが、これまでに相互関係と鉱床形成の全体像が明らかにされていないため、研究対象の1つとして選定した。この他、タイの Loi 褶曲帯の熱水鉱床の形成に関係する花崗岩類、Phu Thap Fah スカルン金鉱床、ラオスの Phon Tiu - Ban Boneng 錫鉱床地域、国内・鹿児島県の菱刈浅熱水金鉱床、北海道北部の歌登浅熱水金鉱床、インドネシア・スマトラ島の Martabe 浅熱水金鉱床、フィリピン・ルソン島北部の Clifton 斑岩銅-金鉱徴地も成因が未解明な点が多く研究対象とした。本研究では、これらの金属鉱床および関係火成岩類について、岩石および鉱石の記載とタイプ区分を行い、鉱石中に含まれる流体包有物の均質化温度-塩濃度-ガス組成分析、酸素-水素-硫黄同位体分析の手法を用いて、鉱床形成条件、マグマ進化と鉱床形成メカニズムを解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

前述の研究対象地域において、地質調査と試料採取を行う。鉱石の顕微鏡観察により岩石記載、鉱化段階区分と鉱物組合せの記載を行い、流体包有物マイクロサーモメトリー実験から均質化温度と塩濃度を測定する。石英、方解石、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱を鉱物分離し、Crash Fast Scan (CFS)法で流体包有物のガス成分の組成分析を行う。また、粉末 X 線回折分析 (XRD)、電子線微小領域分析 (EPMA)、走査

型電子顕微鏡分析 (EDS-SEM)、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS)、レーザーラマン、年代測定等の各種分析を行い、熱水変質と鉱化作用の特性、形成温度-深度-硫化度、熱水の起源と挙動を明らかにする。硫酸塩、珪酸塩-炭酸塩鉱物の硫黄-酸素同位体組成を測定し、鉱物-熱水間の平衡計算を行い、マグマ水-天水の混合割合と形成メカニズムを明らかにする。これらの解析結果を元に、鉱床成因を解明する。

## 4. 研究成果

タイ中北部の Chatree 鉱山において、浅熱水金鉱床鉱体のほぼ全体を網羅する試料採取を行い、各種実験を行った。これにより鉱床は、南北方向に鉱床形成温度、流体包有物のガス組成、熱水の同位体組成が順次変化し、これは鉱石の品位から求められる Ag/Au 比の変化に一致することが明らかになった。珪酸塩鉱物および炭酸塩鉱物の酸素水素安定同位体組成から、熱水は地下で水-岩石反応を生じたことが推定される。現在、研究成果を論文投稿する準備を進めている。

タイの中央に南北に分布する Loi 褶曲帯を(1) Mung Loi, (2) Phu Thap Fah - Phu Thap, (3) Phetchabun, (4) Nakon Sawan - Lobburi and (5) Rayong - Chantaburi の5地域に区分し、花崗岩類を対象に現地調査、室内実験として岩石記載、顕微鏡観察、岩石帯磁率測定、全岩および鉱物化学組成分析、年代分析を行った。これにより、各地域の花崗岩類のマグマ発生場のテクトニックセッティング、火成活動の時期と期間、黒雲母の化学組成から推定される花崗岩類の定置深度と熱水鉱床のタイプの関係が明らかになった。本研究の成果は、将来的に金属鉱床を対象とした広域探査に応用することが可能である。研究成果を論文投稿し、受理された。

Phu Thap Fah スカルン金鉱床において、オープンピット鉱体の1つを対象に露頭の観察を行い、連続的な試料採取を行った。室内実験として、顕微鏡観察、岩石帯磁率の測定、全岩および鉱物化学組成分析、流体包有物分析、酸素-硫黄同位体分析を行った。これにより、鉱体において金品位が高い地点を特定し、地質学的な関係を明らかにし、鉱床形成プロセスを考察した。鉱物化学組成に基づく地質温度計および同位体平衡温度から鉱床形成温度を推定し、流体包有物のアイソコアから鉱床形成深度を推定した。現在、研究成果を論文投稿する準備を進めている。

ラオスの Phon Tiu - Ban Boneng 錫鉱床地域において、沖積層に濃集した錫石漂砂、ベースメタル鉱床、周辺の地質露頭、花崗岩類の露頭観察と試料採取を行った。本地域は、ラオス国内で最大規模の漂砂型錫鉱床地域であるが、錫石の原岩および成因に関する研究は行われていない。室内実験として、全岩化

学組成分析、顕微鏡観察、SEM-EDS 分析、硫黄同位体分析を行った。全岩化学組成分析により、露頭から採取した岩石の一部に錫が高濃度に含まれるものがあることが明らかになり、顕微鏡観察および SEM-EDS 分析により錫石の存在を確認した。研究を実施していた時点では、露頭観察の情報が不十分であったため、錫石を含む岩石に岩石名を与えることが出来なかったが、本研究対象地域は 2017 年度以降に再調査の対象となり、詳細な研究が継続されている。

国内・鹿児島県の菱刈浅熱水金鉱床において、坑内調査を行い鉱石である石英脈試料を採取した。この他、過去に菱刈鉱山から採取された鉱石について、九州大学、他から試料の提供を得た。室内実験として、鉱石の観察記載、全岩および鉱物化学組成分析、顕微鏡観察、流体包有物マイクロサーモメトリーおよびガス組成分析、酸素水素同位体分析を行った。室内実験の結果、菱刈鉱山の本鉱床、山神鉱床を中心に広く試料採取した鉱脈を対象に、石英脈の深度を含む位置情報、鉱脈の構造、脈石鉱物の成長組織、金-銀含有量、流体包有物の均質化温度-塩濃度-ガス組成の関係を解析した。その結果、石英脈の金含有量、形成深度、熱水流体の捕獲温度・塩濃度・ガス組成に一定の関係があることが明らかになり、このことから鉱床形成に関わる熱水の性質と挙動を考察した。研究成果は、投稿論文として発表済みである。この他、同鉱山の山神鉱床における高品位脈を対象に、前述の分析手法に酸素水素同位体組成分析を加えた研究を行い、高品位の金鉱化作用を生じた熱水の性質と鉱床形成プロセスについて考察を行った。現在、研究成果を論文投稿する準備を進めている。

国内・北海道北部の歌登浅熱水金鉱床において、地質調査を行い、熱水変質岩と石英脈、シリカシンターの試料を採取した。また、金属鉱業事業団が過去に採取した高金銀品位の石英脈を研究試料に加えた。本研究は、関連する別のプロジェクトからも研究に対する資金提供を得た。熱水変質岩について、XRD 分析を行い、鉱床周辺の変質帯区分を行った。石英脈を先行研究に基づき、ステージ/サブステージ区分し、全岩化学組成分析、Ar-Ar 年代分析、顕微鏡観察による脈石鉱物の組織および鉱石鉱物組み合わせの記載を行った。各ステージに産するエレクトラムの EPMA による化学組成分析を行った。SEM-EDS 分析により石英脈中に Fe-Sb を含有する未知鉱物の存在が確認された。本鉱物は、EPMA による化学組成分析の結果から新鉱物である可能性が高いが、引き続き、検討が必要である。本鉱床の石英脈中には顕微鏡で観察可能なサイズの流体包有物を確認することが出来なかった。現在、研究成果を論文投稿する準備を進めている。

この他の関連するプロジェクトとして、インドネシア・スマトラ島の Martabe 浅熱水金鉱

床について、鉱石の記載と顕微鏡観察、全岩および鉱物化学組成分析、流体包有物分析、硫黄同位体分析に基づく研究を行った。研究成果は、投稿論文として発表済みである。また、フィリピン・ルソン島北部の Clifton 斑岩銅-金鉱徴地を研究対象に係火成岩の岩石記載と変質鉱物組み合わせの記載、鉱石の記載と顕微鏡観察、全岩および鉱物化学組成分析、流体包有物分析、硫黄同位体分析の研究を行った。特に流体包有物分析について、高温型の加熱ステージを用いて 500~800 の温度領域での均質化温度、ハライト溶解温度の測定を行い、これまでに報告のない新規のデータを得た。研究成果は、鉱山会社側の事情により、成果公開が可能になるタイミングを待っている状況である。

## 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)

[雑誌論文](計3件)

Stephanie Saing, Ryohei Takahashi and Akira Imai, Fluid inclusion and stable isotope study at the southeastern Martabe deposit: Purnama, Barani and Horas ore bodies, North Sumatra, Indonesia, *Resource Geology*, 査読有、66 (2)、2016、127 - 148  
DOI: 10.1111/rge.12093

Ryohei Takahashi, Ryo Tagiri, Nigel J. F. Blamey, Akira Imai, Yasushi Watanabe and Akito Takeuchi, Characteristics and behavior of hydrothermal fluids for gold mineralization at the Hishikari deposits, Kyushu, Japan, *Resource Geology*, 査読有、67 (3)、2017、279 - 299  
DOI: 10.1111/rge.12136

P. Nualkhao, R. Takahashi, A. Imai and P. Charusiri, Petrochemistry of granitoids along Loei fold belt, northeastern Thailand, *Resource Geology*, 査読有、\*\* (\*), 受理済み、\*\*\* - \*\*\*  
DOI: 10.1111/rge.\*\*\*\*\*

[学会発表](計27件)

R. Takahashi, Y. Chida, A. Imai, P. Charusiri and N. Blamey, Fluid inclusion gas analysis and isotopic characteristics for the Chatree gold deposit in Thailand, 資源地質学会第 64 回年会講演会、東京、2014

Ryohei Takahashi, Yoshitaka Chida, Akira Imai, Punya Charusiri and Nigel Blamey、Geochemical characteristics of epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Mo mineralization in the Chatree mining district, Thailand、The 21st General Meeting of the International Mineralogical Association、Johannesburg、2014

Ryohei Takahashi, Yoshiya Ito, Punya Charusiri, Akira Imai, Apivut Veeravinantanakul, Yasushi Watanabe、Metallic mineralization and petrography of granitoids at the Phon Tiou - Boneng tin mining area, central Laos、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、千葉、2015

R. Takahashi, R. Tagiri, A. Imai, Y. Watanabe, N. Blamey and A. Takeuchi、Mineral description and fluid inclusion study of gold-bearing quartz veins in Hishikari Mine, Kyushu, Japan、資源地質学会第 65 回年会講演会、東京、2015

R. Takahashi, R. Tagiri, A. Imai, Y. Watanabe, N. Blamey and A. Takeuchi、Fluid inclusion study of gold-bearing quartz veins in Hishikari Mine, Kyushu, Japan -implications to ore-fluid characteristics and behaviors -, 5th Asia Africa Mineral Resources Conference、Quezon City、2015

R. Takahashi, R. Kohara, A. Imai, N. Blamey and A. Takeuchi、Characteristics of gold mineralization at the Keisen No. 3-1 vein of the Hishikari deposits, Kagoshima, Japan、資源地質学会第 66 回年会講演会、東京、2016

T. Sato, T. Komatsu, R. Takahashi, A. Imai, N. Blamey, P. Charusiri, B. Bradley and P. Sangsiri、Geochemical characteristics of epithermal gold mineralization at the Chatree deposit, Thailand、資源地質学会第 66 回年会講演会、東京、2016

A.V.L. Cirineo, A. Imai, R. Takahashi, R.P. Baluda, V.B. Maglambayan, R.C. Estacio and J.B. Galapon、Geochemistry of the intrusive rocks and characteristics of fluid inclusions in the quartz veins in the Clifton porphyry copper-gold prospect, northern Luzon, Philippines、資源地

質学会第 66 回年会講演会、東京、2016

Ryohei Takahashi, Kana Suzuki, Akira Imai, Shingo Kikuchi、Hydrothermal alteration, mineralogical description and ore-forming conditions of the Utanobori gold deposit in northern Hokkaido, Japan、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、千葉、2016

R. Takahashi, R. Kohara, N.J.F. Blamey, A. Imai and A. Takeuchi、Characteristics of high grade Au-Ag mineralization at the Hishikari deposits, Kagoshima, Japan、35<sup>th</sup> International Geological Congress、Cape Town、2016

Ryohei Takahashi, Kana Suzuki, Shingo Kikuchi and Akira Imai、Characteristics of mineralization and alteration in the Utanobori epithermal gold deposit, northern Hokkaido, Japan、6th Asia Africa Mineral Resources Conference、秋田、2016

R. Takahashi, K. Ikeda, P. Nualkhao and A. Imai、Characteristics and ore-forming conditions of the Phu Thap Fah skarn gold deposit in northern Thailand、資源地質学会第 67 回年会講演会、東京、2017

P. Nualkhao, R. Takahashi, A. Imai and P. Charusiri、Geochemical characteristics of plutonic rocks along Loei Fold belt, northeastern Thailand、資源地質学会第 67 回年会講演会、東京、2017

(他 14 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

<http://www.gipc.akita-u.ac.jp/~kinsho/TOP.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 亮平 (TAKAHASHI Ryohei)

秋田大学・大学院国際資源学研究科・助教

研究者番号：10396286

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者(アカデミック)

今井 亮 (IMAI Akira)

九州大学・大学院工学研究院・教授

ブレイミー ナイジェル (BLAMEY Nigel)

Western University, Department of  
Earth Sciences・助教

チャルシリ パンヤ (CHARUSIRI Punya)

Chulalongkorn University, Department  
of Geology・教授

渡辺 寧 (WATANABE Yasushi)

秋田大学・大学院国際資源学研究科・教授