

氏 名（本 籍）	Apivut Veeravinantanakul（タイ）
専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 番 号	国博甲第 12 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	国際資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	タイ、Sukhothai 褶曲帯における花崗岩類の火成活動の変遷： 地球化学、地質年代、ハフニウム同位体からの洞察と関係する金属鉱化作用への示唆 (Transition of Granitoid Magmatism in the Sukhothai Fold Belt, Thailand: Insights from Geochemistry, Geochronology and Hafnium Isotopes and Implications for Associated Metallic Mineralization)
論 文 審 査 委 員	（主査）准教授 高橋 亮平 （副査）教授 Andrea Agangi （副査）教授 渡辺 寧 （副査）教授 大場 司

## 論文内容の要旨

The Sukhothai Fold Belt, located between the Loei Fold Belt and the Inthanon Zone in Thailand, hosts various types of metallic mineral deposits, such as orogenic gold and antimony-tungsten and epithermal gold-antimony and antimony deposits. The granitoids have been considered to be the sources of hydrothermal fluids that produced several kinds of mineral deposits in the Sukhothai Fold Belt. Nevertheless, the granitoids in the neighboring tectonic areas, the Sibumasu Terrane and the Inthanon Zone in the west and the Loei Fold Belt in the east, host different types of metallic mineral deposits from the Sukhothai Fold Belt. The details of the relationship between magmatism, tectonic processes and the mineral deposits distribution in the region have not been fully understood.

The granitoids in the Sukhothai Fold Belt consist of tonalite, granodiorite, monzogranite, syenogranite and quartz syenite, which are characterized by I- and S-type affinities. These granitoids composed of primary minerals of quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite and hornblende; muscovite is rare. Apatite, zircon, titanite, magnetite and ilmenite are present as accessory minerals. The Sukhothai Fold Belt granitoids have the characteristic of transition between I- to S-type granite. The magnetic susceptibilities of the granitoids vary

between  $0.165 \times 10^{-3}$  and  $7.358 \times 10^{-3}$  SI unit in the northern part of the Sukhothai Fold Belt,  $0.105 \times 10^{-3}$  and  $6.04 \times 10^{-3}$  SI unit in the central part of the Sukhothai Fold Belt and  $0.027 \times 10^{-3}$  and  $1.313 \times 10^{-3}$  SI unit in the southern part of the Sukhothai Fold Belt, which indicate the granitoids in the Sukhothai Fold Belt are categorized in both ilmenite- and magnetite-series.

Bulk chemical compositions including trace elements of the granitoids were analyzed. The Harker diagrams of major element concentrations reveal that the granitoids have continuous fractionation trends and were probably formed from similar primitive magma. The alumina saturation index (ASI) indicates that these granitoids have the character of both metaluminous and mildly peraluminous. The AFM diagrams and  $K_2O$  versus  $SiO_2$  suggest that these granitoids are medium- to high-K calc-alkaline affinities. Trace elements of the granitoids were normalized to primitive mantle shows distinct depletions in Ba, Nb, P and Ti and enrichments in Th and K. Plots of rare earth elements (REE) of the granitoids normalized to primitive mantle illustrate moderately decreasing light REE and fairly flat heavy REE patterns, with depletion of Eu. The Rb versus (Nb+Y), Nb versus Y, Rb versus (Yb+Ta), and Ta versus Yb tectonic discrimination diagrams indicate that the granitoids in the Sukhothai Fold Belt have the compositions of granitoids in volcanic arcs and syn-collision setting, which indicates a similar compressional tectonic setting. The Zr/Y versus Y diagram reveals that the granitoids were generated in continental arcs.

The U-Pb zircon age of 243-237 Ma which mark the timing of subduction to the syn-collisional stage between the Sibumasu-Indochina terranes, was obtained from a granodiorite sample in the northern part and a syenogranite sample from the central part of the Sukhothai Fold Belt, while the monzogranite and syenogranite samples in the northern part and a monzogranite sample in the southern part of the Sukhothai Fold Belt provided a timing of post-collision between the Sibumasu-Indochina terranes during 230-202 Ma. In addition, the Eocene granite (~43 Ma) may have intruded during the sinistral movement of the Klaeng and Mae Ping fault zones which resulted from the Indian-Eurasian plate collision.

Initial  $^{176}Hf/^{177}Hf$  ratios of the zircons from the Sukhothai Fold Belt granitoids in this study ranged from 0.281855 to 0.282913 and they are characterized by both positive and negative initial  $\epsilon Hf$  values of -8.0 to +9.2 (an average of +1.5), which indicate a mixed source of magma, *i.e.*, juvenile mantle-derived and reworked crustal materials. The two-stage depleted mantle Hf model ages ( $T_{DM}^C$ ) of these zircons are 2.2-0.6 Ga with an average of 1.1 Ga, indicating the timing of a formation of the parental magmatic source of zircons separating from the mantle during Middle Paleoproterozoic to Early Neoproterozoic.

A Hf-isotope data from magmatic zircons compilation including the values obtained in this study and previous reports were used to make a contour map that allows a comparison between the source of magma and the distribution of mineral deposits in Thailand. The magmatic source for the igneous rocks in the Loei Fold Belt is dominated by juvenile mantle-derived components, as shown by positive average initial  $\epsilon Hf$  values (+1.0 to +12.7), and contributed

to the formation of porphyry-related skarn copper and gold, skarn iron and epithermal gold deposits. In contrast, the igneous rocks in the Sibumasu Block and Inthanon Zone originated from reworked crustal materials, as indicated by mostly negative average initial  $\epsilon_{\text{Hf}}$  values (-15.5 to +0.8), and produced S-type granite-related tin-tungsten deposits. On the other hand, the various average initial  $\epsilon_{\text{Hf}}$  values (-4.9 to +11.0) from the igneous rocks in the Sukhothai Fold Belt suggest mixed sources including evolved and juvenile magma materials, which generated the orogenic gold and antimony-tungsten and epithermal gold-antimony and antimony deposits.

## 論文審査結果の要旨

提出された博士論文，博士論文要旨及び論文目録について，所属する資源学専攻の教員により構成される審査委員会において審査し，不備がないことを確認した。記載内容は適正であり，また，査読のある学術誌に投稿された論文が受理されていることを確認し，書類審査は合格とした。

まず著者は，タイの Sukhothai 褶曲帯には，造山型金-アンチモン-タングステン鉱床，浅熱水金-アンチモン鉱床などが分布し，花崗岩質のマグマはこれら幾つかの鉱床を形成した熱水の起源になること，また，周辺の Sibumasu テレーン，Inthanon 帯，Loei 褶曲帯，Indochina 帯には，Sukhothai 褶曲帯とは異なるタイプの金属鉱床が分布することを説明した。さらにこれらの地域における火成活動，テクトニクス作用，異なるタイプの鉱床の生成については，関係性が十分に明らかにされていないことを問題点として提起した。

著者は，Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類は，トータル岩，閃緑岩，モンゾ花崗岩，閃長花崗岩，石英閃長岩から構成され，これらは I タイプと S タイプの遷移的な性質を持つことを説明した。これらの花崗岩類は，初生鉱物として石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，普通角閃石からなり，白雲母はほとんど含まれない，また，随伴鉱物として燐灰石，ジルコン，チタン石，磁鉄鉱，チタン鉄鉱を含む。Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類の帯磁率は，北部で  $0.165 \times 10^{-3} \sim 7.358 \times 10^{-3}$  SI unit，中央部で  $0.105 \times 10^{-3} \sim 6.04 \times 10^{-3}$  SI unit，南部で  $0.027 \times 10^{-3} \sim 1.313 \times 10^{-3}$  SI unit の値を持ち，磁鉄鉱系列，チタン鉄鉱系列の両方の特徴を示す。

次に著者は，Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類は，全岩化学組成の主要成分が連続的な組成変化を示すことから同様の性質を持つ初生マグマから形成された可能性があること，また，メタアルミナスからパーアルミナス，中間～高カリウム系列のカルク-アルカリ岩系の特徴を持つことを説明した。始原的マントル値で規格化した花崗岩類の微量成分組成は，Ba, Nb, P, Ti の枯渇，Th, K の富化，軽希土類から中希土類にかけての減少パターン，重希土類の平坦なパターン，Eu 負異常を示す。花崗岩類は，Rb-(Nb+Y), Nb-Y, Rb-(Yb+Ta), Ta-Yb, Zr/Y-Y の判定図において，大陸地殻内の火山弧および衝突時期のテクトニックセッティングを示す。

続いて著者は，Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類に含まれるジルコンの U-Pb 年代の分析結果に基づき，北部の花崗閃緑岩と中央部の閃長花崗岩から得られた 243-237 Ma の年代値は，

Sibumasu テレーン, Indochina テレーン間の沈み込みと衝突のタイミングに一致すること, 南部のモンゾ花崗岩から得られた年代値はこれらのテレーンの衝突後の時期 (230-202 Ma) に相当することを説明した。始新世の年代 (約 43 Ma) を持つ花崗岩は, インド-ユーラシア プレーットの衝突に関係する Klaeng - Mae Ping 断層帯の左横ずれ運動の時期に貫入した可能性がある。Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類に含まれるジルコンの  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比は 0.281855-0.282913 であり, これらは正負両方の  $\epsilon\text{Hf}$  値 (-8.0~+9.2) を持つことで特徴付けられ, マントル起源の初生マグマと再堆積した地殻物質の両方を起源とする混合マグマの性質を示す。これらのジルコンの二段階枯渇マントル Hf モデル年代 ( $T_{\text{DM}^C}$ ) は 2.2-0.6 Ga (av. 1.1 Ga) を示し, ジルコンの起源となった母体のマグマは, 古原生代中期から新原生代初期にマントルから分離したことを示唆する。

最後に著者は, 本研究と過去の報告によるタイのマグマ性ジルコンの Hf 同位体データを合わせてカラーコンターマップを作成し, マグマの起源と鉱床分布の関係を説明した。Loei 褶曲帯の火成岩のマグマは, 正の初生  $\epsilon\text{Hf}$  値 (av. +1.0~+12.7) を示すことから, 初生マントル起源の成分が支配的であり, 斑岩に関係するスカルン銅-金鉱床, スカルン鉄鉱床, 浅熱水金鉱床が生成した。Sibumasu ブロックと Inthanon 帯の火成岩は, 負の初生  $\epsilon\text{Hf}$  値 (av. -15.5~+0.8) を示すことから, 再堆積した古い地殻物質が主な起源であり, S タイプ花崗岩に関連する錫-タングステン鉱床が生成した。一方, Sukhothai 褶曲帯の火成岩は, 変化に富む初生  $\epsilon\text{Hf}$  値 (av. -5.0~+11.0) を示すことから, これらは進化したマグマ物質と初生のマグマ物質が混合したものが起源であり, 結果として造山型金-アンチモン-タングステン鉱床, 浅熱水金-アンチモン鉱床が生成した。

本学位論文は, Sukhothai 褶曲帯の花崗岩類の岩石学・年代学・同位体・地球化学的特徴を明らかにし, また, 本研究と過去の研究をコンパイルすることによりタイ全域のテクトニックセッティング, 花崗岩類を主とする火成岩のマグマの起源, Hf 同位体組成, 鉱床タイプと分布の関係を明らかにした研究内容である。本研究は, 将来のタイ及び周辺国の広域的な資源探査の指針として大きな貢献となる。博士の学位に値する業績であると認め, 本審査は合格と判定した。