

氏 名（本 籍）	Iwan Setiawan（インドネシア）
専攻分野の名称	博士（工学）
学 位 記 番 号	工博乙第 43 号
学位授与の日付	平成 29 年 9 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工学資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	インドネシア、北スマトラ西部における花崗岩類とその風化殻の地質と希土類元素地球化学 (Geology and REE Geochemistry of Granitoids and their Weathered Crusts at the Western Part of North Sumatra, Indonesia)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教授 今井 亮 (副査) 教授 大場 司 (副査) 教授 佐藤 時幸 (副査) 教授 石山 大三

## 論文内容の要旨

A geological, geochemical and isotopic study on granitoids and their weathered crusts was conducted at Sibolga, Panyabungan, Muarasipongi, and Kotanopan in the western part of North Sumatra, Indonesia. The objectives of this study are to understand the geological occurrences of granitoids, geochemical characteristics of rare earth elements (REE) in granitoids and their behavior in weathered crusts of granitoids. The study was conducted on the basis of microscopic observations, X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM-EDS), X-ray fluorescence spectrometry (XRF), inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP-MS), thermal ionization mass spectrometry (TIMS), and sequential leaching of REE.

Granitoids in Sibolga are, calc-alkaline, ilmenite-series, mainly peraluminous, I-/A-type and are classified into quartz alkali feldspar syenite, quartz syenite, alkali feldspar syenite, alkali feldspar granite, syenogranite, and monzogranite. Cordierite and corundum occur as xenocrysts and inclusions in K-feldspar in syenogranite, quartz alkali feldspar syenite and quartz syenite from Sarudik, Sihobuk and Adian Koting.  $P_2O_5$  contents of the granitoids tend to decrease as  $\Sigma REE$  contents increase. LREE and HREE are enriched in alkali feldspar syenites from Sibolga Julu and Tarutung.

Granitoids in Panyabungan are calc-alkaline to alkali calcic, ilmenite- and magnetite-series, metaluminous to peraluminous, S- and I-type, and are classified into monzonite, monzodiorite, diorite, syenite, syenogranite, quartz syenite, alkali feldspar granite, quartz alkali feldspar syenite and alkali feldspar syenite. Coexistence of metaluminous, I-type and magnetite-series quartz alkali feldspar syenites and peraluminous, S-type and ilmenite-series granites at Tano Tombangan suggests

that those granitoids were derived from different sources.  $\text{SiO}_2$  and  $\Sigma\text{REE}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\text{Rb/Sr}$  are positively correlated.  $\text{P}_2\text{O}_5$  contents of the granitoids tend to increase as  $\Sigma\text{REE}$  contents increase. LREE are enriched in alkali feldspar syenite from Pintu Padang Julu and quartz alkali feldspar syenite from Tanjung Jae.  $\Sigma\text{REE}$  contents are high in the S-type and ilmenite-series granitoids than the magnetite-series granitoids, which contain allanite and apatite.

Granitoids in Kotanopan are calc-alkaline, magnetite- and ilmenite-series, peraluminous, and I-type, and are classified into quartz monzonite, monzogranite, syenogranites, tonalites, and granodiorite. Monzogranite, and quartz monzonite from Kotanopan are metaluminous to slightly peraluminous, calcic to alkali-calcic, while a granodiorite from Tanjung Alai is metaluminous and calcic.

The initial Sr isotopic ratio ( $\text{Sr}_i$ ) of syenogranite from Sarudik is high (0.724128), suggesting that the syenogranite magma has resulted from partial melting of granitic crusts and was probably contaminated with metasedimentary rocks in the upper crust. The  $\text{Sr}_i$  of Sibolga granitoids ranges from 0.710700 to 0.724100, that from Panyabungan ranges from 0.709382 to 0.712104. The  $\text{Sr}_i$  of granitoids from Sibolga and Panyabungan are lower than those of granitoids from Klabat Suites and Bebulu from Bangka Island. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of quartz alkali feldspar syenite from Pintu Padang Julu (0.710812), and Tukka (0.710700) suggest that most probably they belong to the Main Range granitoids. Metaluminous and I-type granitoids of Sibolga were produced by Paleo-Tethys subduction beneath amalgamated Western Sumatra Block, East Malaya and Indochina in Early Permian, followed possibly by the tectonic translation which resulted in peraluminous, ilmenite-series and A-type granitoids in Sibuluhan Sihaporas, Sibolga Julu, Sarudik and Tarutung. Peraluminous, ilmenite-series and S-type granitoids at Panyabungan, and I-type granitoids from Muara Sipongi and Kotanopan were formed due to the Early Triassic to Early Jurassic subduction of Meso-Tethys beneath the amalgamated Western Sumatra Block and Sibumasu.

Highly differentiated ilmenite-series I/A-type granitoids are the parent rocks of the weathered crusts in Sibolga. Allanite and titanite were present in the parent granitoids at Sibuluhan Sihaporas, but they were decomposed in the weathered crusts. Ce was predominantly accumulated in the upper part of weathered crust due to oxidation of  $\text{Ce}^{3+}$  to  $\text{Ce}^{4+}$ , while most of the  $\text{REE}^{3+}$  moved to the lower part by acidic soil water and they were adsorbed mainly onto halloysite group minerals and gibbsite. The  $\text{P}_2\text{O}_5$  contents of the weathered crusts of granitoids at the outcrop Sibuluhan Sihaporas A and the outcrop Sibuluhan Sihaporas B tend to be higher than those of the parent rocks, suggesting the occurrence of secondary phosphate minerals in the weathered crusts.  $\Sigma\text{REE}$  contents of the weathered crusts in Sibolga are lower than those of their parent rocks indicating that REE were leached out during weathering.

The volume of the weathered granitoids at Sibuluhan Sihaporas A decreased by the weathering process, while that at Sibuluhan Sihaporas B increased. The negative values of elemental change ( $\tau_j$ ) (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Dy and Er) of the weathered crusts of Sibuluhan Sihaporas A, Sibuluhan Sihaporas B, Sarudik and Sibolga Julu suggest losses of those elements. On the other hand the positive values of  $\tau_j$  (Eu, Gd, Tb, Ho, Tm, Yb and Y) suggest addition of these elements. The values of elemental mobility depend on decomposition of allanite and titanite during weathering and the existence of residual xenotime. The positive values of Eu, Gd, Tb, Ho, Tm, Yb and Y suggest probably by decomposition of titanite and they were immobilized by mainly of kaolinite.

## 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。申請者は、インドネシア スマトラ島北部の花崗岩類について、花崗岩類の主成分元素、微量成分元素組成、Sr および Nd 同位体比を検討し、起源物質と形成場の変遷を論じた。また、花崗岩の風化殻における希土類元素の存在状態を段階抽出法によって検討するとともに、鉱物学的に検討し、希土類元素の移動、濃集機構を論じた。

まず著者は、スマトラ島北部の花崗岩類について、Sibolga 岩体、Panyabungan 岩体、Kotanopan 岩体それぞれの、花崗岩類の岩石記載、帯磁率測定、主成分元素および微量成分元素組成の定量分析に基づき、岩石系列を明らかにするとともに、形成場の検討を行った。Sibolga 岩体の花崗岩類はチタン鉄鉱系列で I タイプおよび A タイプ、過アルミナ質であり、Sarudik, Sihobuk および Adian Koting において堇青石およびコランダムが捕獲結晶として含まれることを明らかにした。Sibolga Julu および Tarutung では希土類元素含有量が高いことを示した。Panyabungan 岩体の花崗岩類はチタン鉄鉱系および磁鉄鉱系、S タイプおよび I タイプ、メタアルミナ質および過アルミナ質と様々であることを示した。Kotanopan 岩体の花崗岩類はチタン鉄鉱系および磁鉄鉱系であるが、I タイプである。Sibolga 岩体の過アルミナ質 A タイプ花崗岩類のマグマはプレート内マグマ活動により、Sibolga 岩体のメタアルミナ質 I タイプ花崗岩類のマグマは古テチス海の沈み込みによる火成弧において活動したマグマにより生成したことが示された。それに対して、Panyabungan 岩体、Kotanopan 岩体の花崗岩類のマグマは、メソテチス海の沈み込みによる火成弧で生じたことを示した。次に著者は、他の岩体に比べ、Sibolga Julu および Tarutung の A タイプの高シリカ含有量の花崗岩類の希土類元素含有量が高いこと、この希土類元素含有量の高い花崗岩類において希土類元素は磷酸塩鉱物としてではなく、褐簾石およびチタン石として産することを示した。また、原岩中の希土類元素含有量の高いこれらの花崗岩類の風化殻の希土類元素含有量は原岩の花崗岩類よりも低く、風化により希土類元素が溶脱したことを示した。

他の東南アジアの花崗岩の分布地域に比べて、これまで詳しい岩石学特徴が報告されていなかったスマトラ島北部の花崗岩類の特徴について、各岩体の岩石系列を明らかにし、その形成場を明らかにしたこととスマトラ島の発達史におけるマグマ活動場を明らかにしたこと、各花崗岩体の希土類元素の含有量と風化過程における希土類元素の挙動に関して新たな知見を得たことは、地球科学的に大きな業績であり、学位論文にふさわしい研究業績であると認められる。予備審査において更なる検討が求められた、スマトラ島の発達史におけるマグマ活動場の時間的変遷、および風化過程における主成分元素および希土類元素の物質収支の議論についても、検討されたことが認められたが、いくつかさらに改良が

必要な箇所も指摘された。また、論文の中で、Sr 同位体比の初生値の算出についての記述の不足が指摘された。これらを加筆修正することを条件に本審査は合格と判定した。