

蛍光X線分析による足尾山地、沢入花崗閃緑岩体の全岩化学組成

川野良信*

キーワード：沢入岩体、花崗閃緑岩、主成分元素、微量成分元素

1. はじめに

沢入（そおり）花崗閃緑岩体（以下、沢入岩体と呼ぶ）は群馬県みどり市沢入を中心に、周囲の中・古生界に明瞭な接触変成作用を与えて、南北12km、東西6kmにわたって分布している（図1；河田・大沢，1955）。植田（1956）は本岩体の6試料の化学分析を行い、ノルム鉱物組成からそれらには化学成分上大きな差は見られないと結論した。また、野沢ほか（1958）は沢入岩体2試料の全岩化学分析値、35試料の部分化学分析値を報告し、国内の他地域の花崗岩類との比較を行った。さらに、矢内（1972，1973a，1973b）は、沢入岩体を含む足尾山地の火成岩類について詳細な岩石学的検討を行い、花崗岩類の成因について論じた。近年、荒川ほか（1998）は沢入岩体で実施された深度1500mのボーリングコアおよび地表試料について全岩主成分および微量成分組成を報告し、全岩化学組成の垂直分布と水平分布について検

討した。その結果、下部地殻の部分溶融によって生じたマグマが上部地殻内に上昇・固結し、沢入岩体を形成したと推定した（荒川ほか，1996，1998）。一方、加々美（2005）、加々美ほか（2007）は沢入岩体のSr同位体比組成を検討し、中央部で相対的に初生値が低く、周縁部にいくに連れそれが徐々に高くなることを指摘した。その後、同様のSr同位体比初生値（以下、Srl値と呼ぶ）の岩体内での変化傾向は、多数の花崗岩体で見いだされており、それらの形成過程について議論が続けられている（川野ほか，2007；加々美ほか，2010）。

沢入岩体の活動時期は黒雲母 K-Ar 法によって86Ma（Shibata and Miller, 1963）、90-91Ma（河野・植田，1964）、93Ma（Sudo et al., 1998）が、黒雲母 Ar-Ar 法では92Ma（Uto et al., 1997）がそれぞれ得られている。

本論では、加々美（2005）、加々美ほか（2007）が指摘したSrl値の累帯構造に基づき区分された岩相毎に化学組成を検討し、累帯構造の形成過程について考察を行う。

2. 沢入岩体の産状および岩石学的特徴

2.1 岩相区分

先に述べたように、加々美（2005）は沢入岩体にSrl値の累帯構造を見いだした。加々美（2005）によれば、岩体の中央部分にはSrl値が0.7069未満を示す岩石が分布し、その周囲を取り巻くように0.7069のSrl値を示す岩石が分布している。さらに、岩体周縁部にSrl値が0.7069を超える岩石が分布している。川野ほか（2005）は、このSrl値に基づき、値が0.7069未満を示す中心相、0.7069を示す中間相、0.7069を超える周縁相に区分して同位体岩石学的検討を行っている。本論でも、川野ほか（2005）の岩相区分に従って議論を進める。図2に示す沢入岩体中の黒点と数字は、試料採取位置とその試料の

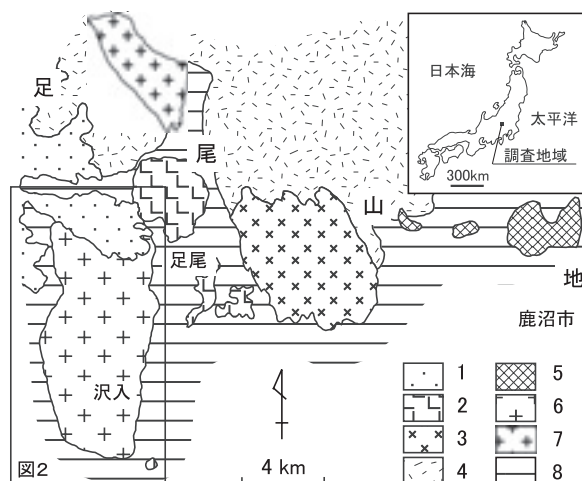


図1 足尾山地の地質概略図（矢内，1972を簡略化）

1；第四系，2；流紋岩溶岩，3；古峯ヶ原岩体，4；中禅寺酸性岩類，5；鹿ノ入岩体，6；沢入岩体，7；松木深成岩体，8；足尾層群

* 立正大学地球環境科学部

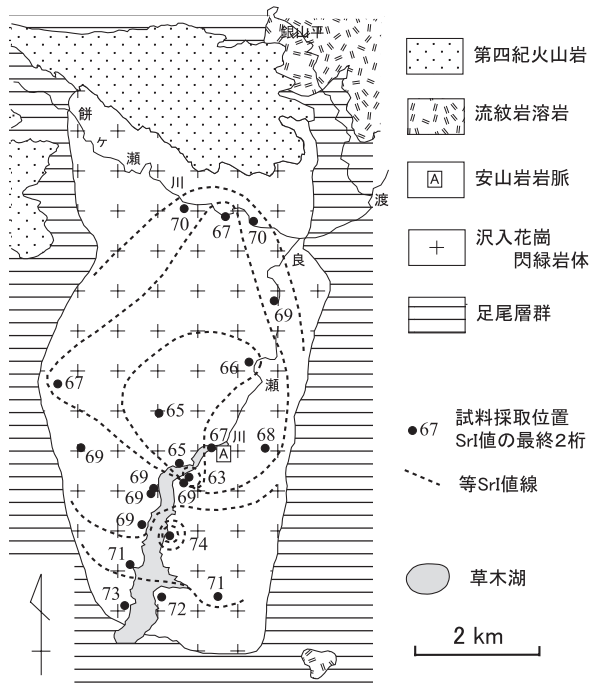


図2 沢入花崗閃緑岩体の地質図 (矢内, 1972を一部簡略)

図中の黒点は試料採取位置を示し、数値はその試料のSr同位体比初生値の最後の2桁を表している(例えば、0.7074 74)

SrI 値の最後の2桁を示している。つまり、岩石のSrI値が0.7072であれば「72」と記入している。なお、0.7069を示す中間相から得られたアイソクロン年代は 98 ± 11 Maであり、前述の最も古い黒雲母 K-Ar 年代 (93 Ma) や Ar-Ar 年代 (92Ma) より5~6 Ma 古い年代を示している (川野ほか, 2005)。

2.2 産状

本地域には中・古生界の足尾層群、それに貫入する沢入岩体、それらを覆う足尾流紋岩、さらにその上位に第四紀火山岩が分布している。沢入岩体は足尾山地の草木湖北方に南北12km、東西6 km にわたって露出している (図1, 2)。岩体の中央部分には渡良瀬川が南北に走っており、岩体の一部は最南部で草木湖に没している。岩体は被貫入岩体である足尾帯堆積岩類に明瞭な接触変成作用を与えて貫入し、餅ヶ瀬川流域では重晶石ホルンフェルスを生じさせている。また、沢入地区の渡良瀬川河岸 (図2のA) では安山岩岩脈によって貫かれ、銀山平に向かう支流沿いでは流紋岩中に角礫状の捕獲岩として取り込まれている。岩相毎の産状の違いは明瞭ではなく、それぞれの貫入関係は明らかにできていない。

2.3 岩石

肉眼では灰白色~青灰色を示す岩石で、渡良瀬川に沿った地域では極めて新鮮である。また、石切場が複数点存在しており、そこからも新鮮な試料を採取することができた。岩石は、カリ長石の巨晶を除く部分で等粒状を呈する花崗閃緑岩~花崗岩からなる。主要構成鉱物は、斜長石、石英、カリ長石、黒雲母、不透明鉱物であり、ジルコンや燐灰石などの副成分鉱物も含まれている。斜長石は0.2~0.5mmほどの自形で卓状を呈し、累帯構造が顕著に発達している。ごく一部にセリサイト化が進んでいるものもある。石英は0.2~0.6mm程度で、半自形~他形を呈し、波動消光が認められる。カリ長石は自形の巨晶を除けば、他形を呈し、他の鉱物間を充填するように産する。巨晶はアルバイト・カールスバッド双晶が顕著であり、巨晶以外ではパーサイト構造が発達している。黒雲母は0.1mm以下のものが多く、わずかに緑泥石化しているものも認められるが、比較的新鮮である。不透明鉱物は黒雲母に伴って産する場合が多い。なお、SrI値に基づき区分した岩相毎に、含まれる鉱物種の違いは認められなかった。

図3に石英-斜長石-カリ長石モード三角図を示した。岩石は花崗閃緑岩を主体とし、花崗岩を伴っている。中心相は相対的にカリ長石に富む傾向が認められる。中間相の領域は周縁相と重複するもののやや斜長石に富む傾向がある。周縁相は他の2岩相と領域が重複するが、カリ長石に乏しく、石英に富む特徴が見られる。なお、荒川ほか (1998) では、沢入岩体周縁部で斜長石や黒雲母が多く、岩体中央部でカリ長石や石英が多く含まれると報告されている。

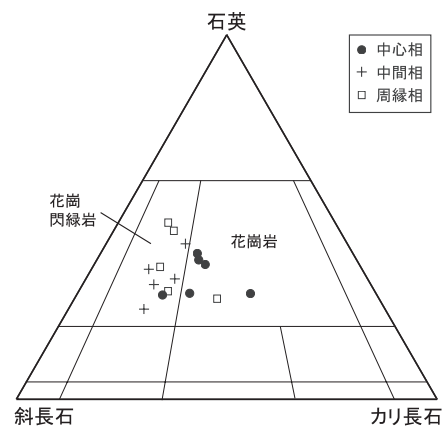


図2 石英-斜長石-カリ長石モード三角図

3. 全岩化学組成

中心相 7 試料、中間相 6 試料、周縁相 7 試料の計 20 試料について全岩主成分・微量成分分析を行った。試料は新鮮な部分を岩石カッターで切り出し、鉄乳鉢で粉碎後、めのう製のボールミルで細粉化した。分析は、立正大学地球環境科学部環境システム学科設置のリガク社製 ZSX Primus II を用いて行った。分析方法は、基本的に川野 (2010) に基づいた。ただし、分析条件を改善し、理論マトリックス補正計算は de Jongh モデルを用い、LOI (loss on ignition) を含む補正計算 (山田, 2010) を加えている。12~25個の地質標準試料を使って求めた各元素における検量線の相関係数はすべて 0.99 以上である。測定した元素は、主成分元素である Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P と微量元素である Ba, Cr, Co, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Th, V, Y, Zn, Zr の合計 25 元素である。このうち、Co, Ga, Th, Zn は川野 (2010) では取り扱っていなかったが、11~13個の地質標準試料の Co-K, Ga-K, Th-L, Zn-K 線の計数値を用いた検量線を作成し分析を行った。

図 4 に SiO_2 と主成分元素の組成変化図を示した。中心相と周縁相を比較すると、中心相の方がやや SiO_2 に富む傾向がある。中心相では SiO_2 が増加するにつれ、 TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , K_2O , P_2O_5 は減少し、 Na_2O は明瞭な変化傾向は示さない。一方、周縁相では SiO_2 が増加するにつれ、 TiO_2 , Al_2O_3 ,

Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 のすべてで減少する傾向がある。また、中心相は周縁相に比べ SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , P_2O_5 にやや富む特徴がある。中間相は周縁相と組成領域が重複する場合が多く、変化傾向も周縁相と類似している。このように岩相毎にやや異なる主成分変化傾向が認められる。

図 5 に SiO_2 と微量成分元素の組成変化図を示した。中心相では SiO_2 の増加に伴い、Ba, Co, Cr, Ga, Nb, Ni, Sr, V, Y, Zn, Zr は減少し、Cu, Pb, Rb, Th は明瞭な変化傾向を示さない。周縁相では SiO_2 の増加に伴い、Ba, Co, Cr, Ga, Nb, Ni, Sr, V, Zr が減少し、Cu, Pb, Rb, Th, Y, Zn では明瞭な変化傾向が認められない。中間相は周縁相と領域が重なる場合が多く、変化傾向も周縁相と類似している。また、中心相は、周縁相に比べ Ga, Nb, Pb, Rb に富み、Ba, Sr に乏しい傾向が見られる。主成分元素と同様に、微量成分元素でも個々の岩相は異なった変化傾向を示している。

4. 考察

加々美 (2005)、加々美ほか (2007) は沢入岩体を含む複数の深成岩体について Sr1 値の累帯構造があることを見いだした。通常、深成岩体は同一のマグマから形成された場合、その Sr1 値は極めて狭い範囲に集中する事が知られている (例えば、Faure and Mensing, 2005)。しかしながら、近年の同位体岩石学的研究では比較的狭い範囲で Sr 同位体比が平衡に達すると考えら

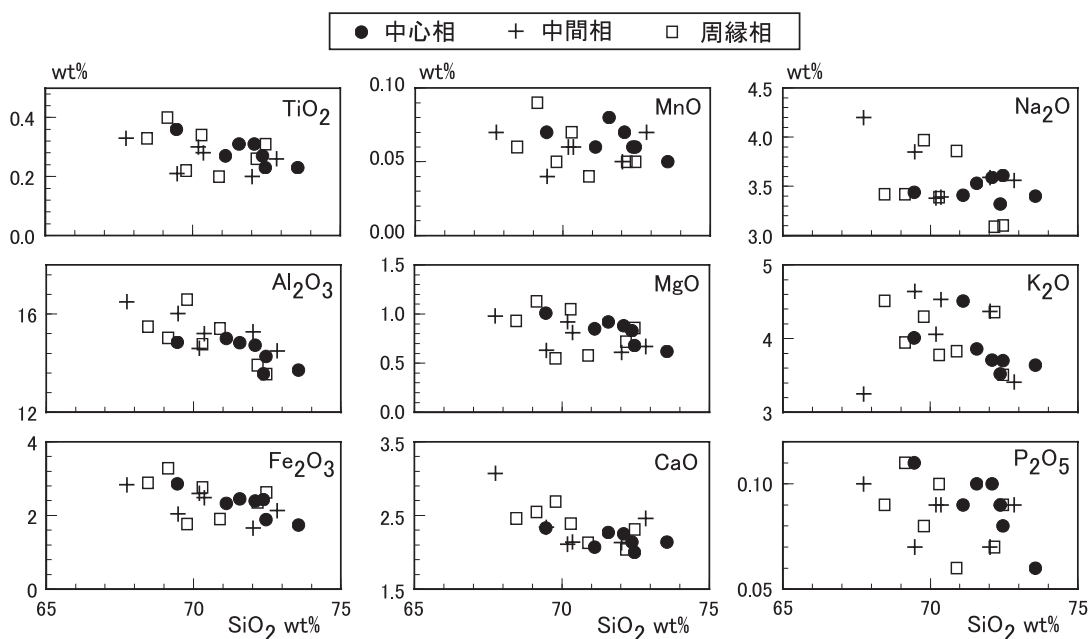


図 4 SiO_2 に対する主成分元素の相関図

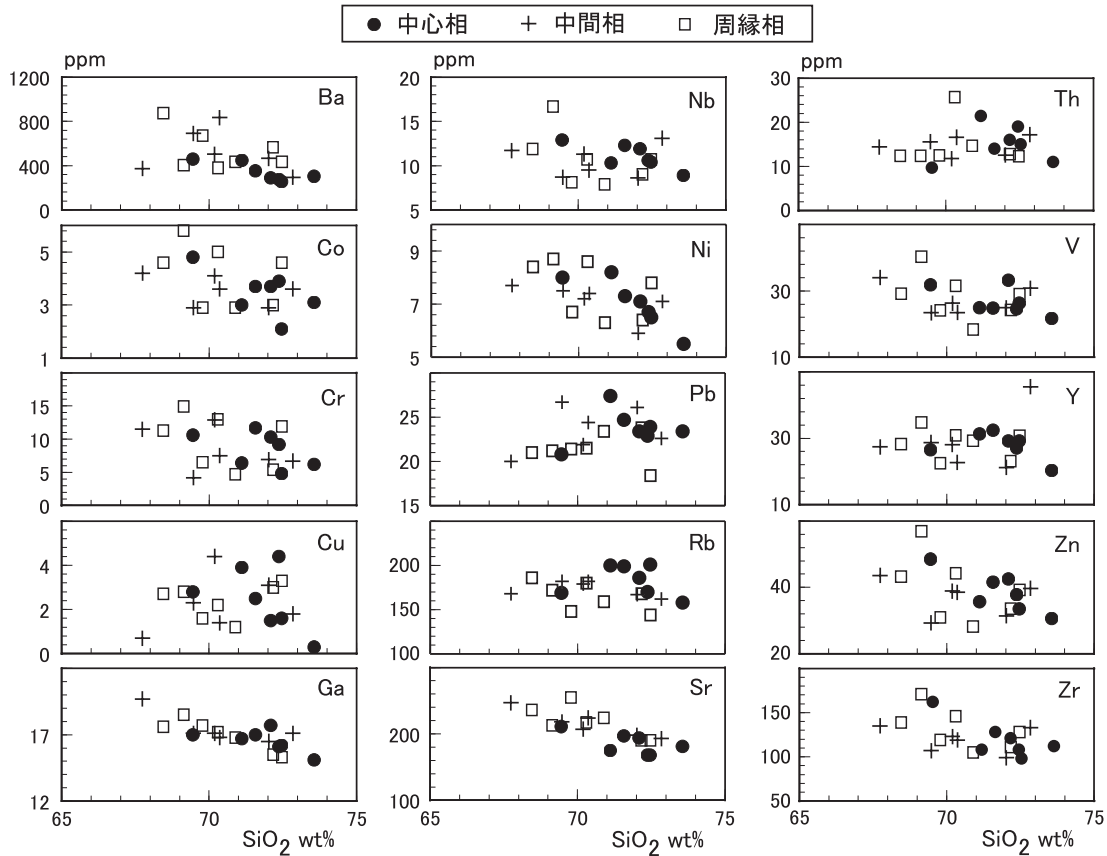


図5 SiO₂に対する微量成分元素の相関図

れている (例えば、川野・柚原, 2008)。つまり、SrI 値の累帯構造は何らかの原因によって引き起こされる現象であると考えられ、その成因について検討が進められている (川野ほか, 2007; 加々美ほか, 2010)。以後、沢入岩体で見られる累帯構造の成因について得られた化学分析値から考察を進める。

まず、第1の可能性は、岩体を形成したマグマが貫入した際に周囲の足尾層群の堆積岩と反応し、周縁部で SrI 値が上昇したとするものである。一般に、泥質堆積物は Rb に富んでおり⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比も高い、マグマがそれらを同化した場合、マグマ中の Rb も増加し、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比も高くなることが考えられる。今回の研究では野外において明瞭な泥質捕獲岩との反応は見いだせなかったものの、野沢ほか (1958) は沢入岩体中に含まれる泥質捕獲岩を報告している。もし、沢入岩体で泥質捕獲岩との反応が生じたとすると、周縁相は中心相に比べて多くの Rb を含んでいると考えられる。しかしながら、図5に明らかなように周縁相は中心相よりも Rb が少ない傾向がある。さらに、泥質堆積岩は Al₂O₃にも富むと考えられ、同化した場合マグマの A.S.I. (aluminum saturation index) は高くなると考えられる。周縁相が泥質堆積岩と反応すれば、中心相に比して Rb が多く、A.S.I.

も大きくなることが期待される。そこで、横軸に Rb、縦軸に A.S.I.をとった図を作成した (図6)。この図を見ると、先に述べたように、一部重複するものの中心相は相対的に Rb に富んでいることがわかる。また、周縁相の A.S.I.は1試料を除き、中心相とほぼ同じかもしくは低い値を示している。これらのことから、周縁相が泥質堆積岩と反応した可能性はかなり低いと考えられる。

次に固結時間に差が生じて SrI 値が変化した可能性を考える。荒川ほか (1998) は、マグマ貫入時に岩体周辺から固結したために、岩体周縁部に斜長石や黒雲母が多

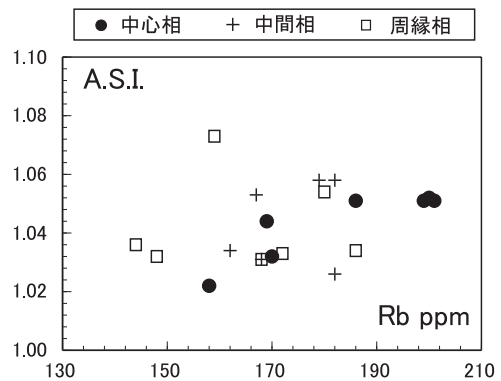


図6 Rbに対するA.S.I.の相関図
A.S.I.: aluminum saturation index

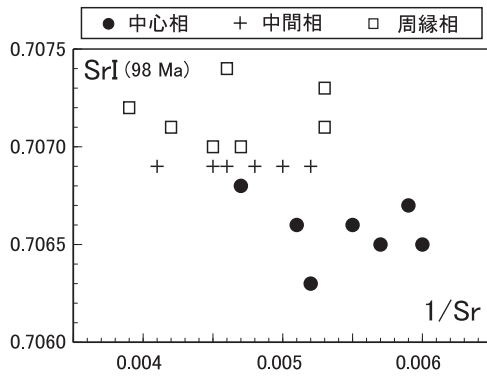


図7 1/Sr に対する SrI (98Ma) の相関図

く、岩体中央部にカリ長石や石英が多い累帯構造をもつに至ったと考えた。この場合、中心相は周縁相に比べて遅れて固結した正累帯深成岩体と考えられる。したがって、液体濃集元素である Rb は中心相で多くなると推定され、図5で示される化学的特徴と一致する。しかしながら、その場合 Rb が多くなる分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は高くなると考えられ、中心相で SrI 値が低いことを説明できない。さらに、固結時期が遅れることからアイソクロンの傾斜は小さくなり SrI 値を高くすると考えられるが、この点からも SrI 値の低い中心相を説明することが困難である(加々美, 2005)。以上のことから、貫入時間の差によって SrI 値の累帯構造が発生した可能性は少ないと考えられる。

第3の可能性として、異なる SrI 値をもつマグマの混合が考えられる。図7に98Maで計算した SrI 値と1/Srの関係を示した。この図を見ると周縁相が左上にプロットされ、中心相が右下にプロットされる右下がりの変化傾向を示している。通常、同一のマグマが分化した場合、分化と共に Sr が減少し、1/Sr は増加すると考えられる。また、分化に伴って Rb も濃集するため、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は高くなり、同じ年代で初生値を計算すると SrI 値も大きくなると考えられる。つまり、図7に見られる変化傾向は単一マグマからの分化では説明できず、異なるマグマの混合を表していると推定される。岩体に SrI 値の累帯構造があることから、相対的に SrI 値の高いマグマが先行して貫入し、続けてやや SrI 値の低いマグマが中央部付近に貫入したと推定される。中間相はこれら2つのマグマの混合物と考えることができる。中心相と周縁相の化学組成の挙動が異なるのは、元々異なったマグマを起源としていたためであろう。

以上の検討から、沢入岩体に見られる SrI 値の累帯構造は異なるマグマの混合によって生じた可能性が考えられる。しかしながら、同時期に化学組成が類似する二つ

のマグマが存在し、連続して貫入してきたメカニズムについてはさらなる検討が必要である。また、同時にそれぞれのマグマの成因についても明らかにする必要がある。

5. まとめ

足尾山地に分布する沢入岩体について、蛍光X線分析装置を用いた全岩化学分析を行い、主成分元素および微量元素組成を明らかにした。Sr 同位体比初生値に基づく岩相毎に化学組成を検討した結果、3つの岩相で変化傾向に差が認められた。特に周縁相と中心相では、微量元素含有量や SiO_2 の増加に伴う変化傾向が異なる場合が認められた。今回得られた化学分析値に基づいて、沢入岩体に見られる SrI 値の累帯構造について検討を行った結果、異なるマグマの混合によって形成された可能性が高いことが明らかとなった。しかしながら、同時代に2つのマグマが連続的に貫入してくるメカニズムやそれぞれのマグマの成因については依然として不明瞭な点が多い。川野(2009)は、沢入岩体北方に分布する松木深成岩体(図1)の Sr、Nd 同位体比を報告し、周辺の深成岩体との成因的關係について論じている。活動時期は異なるものの、源岩の部分融解や同化作用の程度を明らかにするためには周辺に分布する深成岩体の岩石学的情報が必要不可欠である。今後は足尾山地に分布する沢入岩体以外の深成岩体についても全岩化学分析を実施し、個々の岩体の成因について明らかにしていく予定である。

謝辞

本研究に用いた蛍光X線分析装置(ZSX Primus II)は立正大学地球環境科学部環境システム学科の実験実習費によって購入された教育機器である。環境システム学科関係者各位には機器の導入および保守管理に関して日頃よりご協力頂いている。また、分析に使用したビードの作成には福岡孝昭教授と同研究室の皆さんにご助言頂いた。以上の方々に心から感謝いたします。

引用文献

- 荒川洋二・久野将義・小林洋二・天川裕史・池田隆司(1996) 沢入花崗岩体の元素・Sr 同位体組成の垂直・水平分布。地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集, 494。
- 荒川洋二・久野将義・佐藤裕子・小林洋二・池田隆司(1998) 沢入花崗岩体の主要元素, 微量元素組成の垂直・水平分布。埼玉大学教育学部地球科学観測実験室研究報告, 9, 23 - 35。

- Faure, G. and Mensing, T. M. ((2005) *Isotopes: Principles and applications (Third Edition)*. John Wiley and Sons, Inc., Canada, P.897.
- 加々美寛雄 (2005) 本州弧に分布する白亜紀～古第三紀花崗岩の活動と起源物質. 地質学雑誌, 111, 441 - 457.
- 加々美寛雄・今岡照喜・石岡 純・加々島慎一・川野良信・小 山内康人・大和田正明・志村俊昭・白石和行・柚原雅樹 (2007) Rb-Sr, Sm-Nd 全岩アイソクロンに関する様々な問題. MAGMA, 87, 1 - 29.
- 加々美寛雄・川野良信・今岡照喜・大和田正明・田結庄良昭・柚原雅樹 (2010) 花崗岩体の Sr 同位体比初生値の分布. M AGMA, 91, 31 - 50.
- 川野良信・西 奈保子・加々美寛雄 (2005) 沢入岩体に見られる Sr 同位体比初生値の累帯構造. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), K037 - P006.
- 川野良信・安間 了・柚原雅樹 (2007) 鹿児島県, 屋久島花崗岩体に見られる Sr 同位体比初生値の累帯構造. MAGMA, 88, 1 - 16.
- 川野良信・柚原雅樹 (2008) 福岡県那珂川上流, 白亜紀花崗岩類の年代学的, 同位体岩石学的研究. 地質学雑誌, 114, 218 - 230.
- 川野良信 (2009) 足尾山地, 白亜紀松木深成岩体の Sr, Nd 同位体岩石学的研究. MAGMA, 90, 1 - 19.
- 川野良信 (2010) 蛍光X線装置による珪酸塩岩石および堆積物の定量化学分析. 地球環境研究, 12, 85 - 97.
- 河野義礼・植田良夫 (1964) 本邦火成岩の K-A dating (1). 岩石鉱物鉱床学会, 51, 127 - 148.
- 河田清雄・大沢 穠 (1955) 5万分の1足尾図幅および説明書. 地質調査所.
- 野沢 保・高橋 潔・河田清雄 (1958) 足尾南方の沢入花崗閃緑岩の性質の概略. 地調月報, 9, 771 - 776.
- Shibata, K. and Miller, J. A. (1963) Potassium-argon ages of the Sori granodiorite, Ashio Mountain block. Bull. Geol. Surv. Japan, 14, 102.
- Sudo, M., Uto, K., Anno, K., Ishizuka, O. and Uchiumi, S. (1998) SORI93 biotite: A new mineral standard for K-Ar dating. *Geochem. J.*, 32, 49-58.
- 植田良夫 (1956) 足尾山塊沢入花崗閃緑岩体の化学組成. 岩石鉱物鉱床学会誌, 40, 178 - 184.
- Uto, K., Ishizuka, O., Matsumoto, A., Kamioka, H. and Togashi, S. (1997) Laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating system of the Geological Survey of Japan: system outline and preliminary results. Bull. Geol. Surv. Japan, 48, 23 - 46.
- 山田康治郎 (2010) 鉱石・岩石分析等で有効なガラスピード法を用いた蛍光X線分析法. リガクジャーナル, 41, 24 - 32.
- 矢内桂三 (1972) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類その1 - 地質 -, 岩石鉱物鉱床学会誌, 67, 193 - 202.
- 矢内桂三 (1973a) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類その2 - 岩石並びに造岩鉱物の記載とその考察 -, 68, 6 - 29.
- 矢内桂三 (1973b) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類その3 - 形成機構と成因的考察 -, 68, 78 - 86.

Whole Rock Geochemistry of the Sori Granodioritic Body, Ashio Mountains, Central Japan

KAWANO Yoshinobu*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Abstract:

Sori granodioritic body, which consists mainly of granodiorite and granite, is distributed in the Ashio Mountains, central Japan. Initial Sr isotopic ratios calculated using 98Ma for the body range from 0.7063 to 0.7074, and the body has zoned structure of the initial Sr isotopic ratios. The Sori body is divided into three facies (central, transitional and marginal) based on initial Sr ratios. The transitional facies of the body suggests the isochron ages of 98 ± 11 Ma. The marginal facies has slightly lower potassium feldspar contents and higher quartz contents than those of the central facies, whereas the central is rich in potassium feldspar contents.

Whole rock major and trace element compositions of 20 samples were determined by X-ray fluorescence spectrometry. TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, K_2O , P_2O_5 , Ba, Co, Cr, Ga, Nb, Ni, Sr, V, Y, Zn and Zr contents of central facies are negatively correlated against SiO_2 contents, and correlations of Na_2O , Cu, Pb, Rb and Th contents are scattered. On the other hand, it tends to decrease TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Ba, Co, Cr, Ga, Nb, Ni, Sr, V and Zr contents in the marginal facies as SiO_2 increases, and it shows that plain changing trend of Cu, Pb, Rb, Th, Y, Zn contents. Abundances of SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, P_2O_5 , Ga, Nb, Pb and Rb of the central facies are slightly greater than those of the marginal facies. These different contents and trends in some elements between the central and marginal facies suggest that both source magmas were different. It can be considered that zoned structure of the initial Sr isotopic ratios was formed by intrusive of continuous magmas.

Keywords: Sori body, granodiorite, major chemical composition, trace element composition