

原著論文

群馬・長野県境域に分布する新第三紀～第四紀火成岩類の
Sr同位体比：時空分布の予察的検討

佐藤興平¹・南 雅代²・若木重行³・中野 俊⁴

¹静岡大学防災総合センター：〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

²名古屋大学宇宙地球環境研究所：〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

³海洋研究開発機構 高知コア研究所：〒783-8502 高知県南国市物部乙200

⁴産業技術総合研究所地質調査総合センター：〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

要旨：群馬県とその周辺部には、中新世以降の堆積物と火山岩類が広く分布し、活動的な火山も多数存在するため、先中新世地質体の露出は限られている。この地域の第四紀火山のSr同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) は0.704前後から0.708以上まで変化に富み、地下でのマグマ形成プロセスの多様性を反映しているとみられるが、詳細は不明である。ここでは、群馬・長野県境域に的を絞り、K-Ar年代を測定済みの中新世以降の代表的な火成岩類のSr同位体比を測定して、その初生値と第四紀火山の既存値を比較した。得られた初生値は、県境域の代表的火山である浅間火山に近い0.704前後の低い値で特徴づけられ、榛名山や赤城山に見られるような0.705を超える高い値は見出されず、大陸地殻成分の寄与は限定的であったことが示唆される。榛名・赤城両火山とその周辺の火山岩に見出されている多様なSr同位体比は、先中新世基盤地殻の多様性を反映している可能性があり、更なる検討が求められる。

キーワード：群馬、長野、中新世、鮮新世、第四紀、安山岩、花崗岩、Sr同位体比、重力異常、地殻構造、浅間山、榛名山、赤城山

Sr isotope ratios of Neogene to Quaternary igneous rocks in the border region
between Gunma and Nagano Prefectures, central Japan : A reconnaissance on their
distribution in time and space

SATO Kohei¹, MINAMI Masayo², WAKAKI Shigeyuki³ and NAKANO Shun⁴

¹Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University: Ohya 836, Suruga, Shizuoka, Shizuoka 422-8529, Japan

²Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University: Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

³Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC: 200 Monbe Otsu, Nankoku, Kochi, 783-8502, Japan

⁴Geological Survey of Japan, AIST: Higashi 1-1-1 Central 7, Tsukuba, 305-8567, Japan

Abstract: Gunma and its neighboring region consist mainly of Tertiary to Quaternary sediments and volcanic rocks, with limited exposures of pre-Miocene basement units. Active volcanoes and their detritus also cover wide areas. Sr isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of Quaternary volcanoes in this region show a large variation from about 0.704 to over 0.708. The large variation appears to represent diverse magma processes beneath this region, but the genesis of the wide variation is still a matter of discussion. Here we present new data of Sr isotope ratios for Miocene to Quaternary igneous rocks, which were collected from the border region between Gunma and Nagano Prefectures and were dated by the K-Ar method. The analyzed nine samples, seven andesites and two granitoids, yielded low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios around 0.704, which is nearly the lowest values represented by Asama volcano in this region, suggesting limited contribution of continental crustal components. Large differences of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between Haruna and Akagi volcanoes and their basement volcanic rocks appear to reflect complicated crustal structure beneath these volcanoes, although detailed studies are required to clarify the genesis of the large differences.

Key Words: Gunma, Nagano, Miocene, Pliocene, Quaternary, volcano, andesite, granitoid, Sr isotope ratio, gravity anomaly, crustal structure, Asama, Haruna, Akagi

1. はじめに

群馬県前橋の市街地には、1938年に国の天然記念物に指定された「岩神の飛石」とよばれる巨石がある（例えば、佐藤，1992, 2016b）。指定時の調査では類似の岩塊を赤城山の地蔵嶽まで追跡できたとして、この巨石は赤城火山からもたらされたこととされた。その後、赤城火山起源の巨石が浅間火山起源の火山泥流（前橋泥流）により二次的に現在地に移動してきたという説が出され（新井，1971）、長い間それに基づいた解説がなされてきた（例えば、前橋市教育委員会，2016）。近年、「岩神の飛石」の起源について再検討が行われ、この巨石は前橋－高崎－伊勢崎地域に散在する他の巨石と共に浅間火山から火山泥流によりもたらされたことが確定的となった（佐藤ほか，2017a, b, 2019, 2020a, c, 2021, 2022）。そのような判定の根拠を与えたのは、巨石のSr同位体比（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）を給源の可能性が考えられる火山のSr同位体比と対比するという手法であった（佐藤，2016b）。実は既に1980年代に、群馬県内だけでなく中部日本の主要な火山についてSr同位体比のデータが蓄積され、対比の基礎は整っていたのである（例えば、Notsu, 1983; Notsu et al., 1987, 1989）。しかも、「岩神の飛石」の給源の有力候補である赤城・榛名・浅間の3火山については、活動期を考慮して慎重に選ばれた多数の試料が測定されており、その $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が3火山で重複することなく明瞭に異なるので、巨石の1試料を測定するだけでも対比が可能になるという単純・明快な結論が期待できたのである（佐藤，2016b）。

巨石の起源を探る上記の研究では、赤城・榛名・浅間の3火山のSr同位体比が異なる原因にまでは立ち入っていないが、これら3火山が東北日本弧の火山フロントの南西端に隣り合って存在するにも関わらず（図1）著しく異なるSr同位体比をもつのは何故かという疑問は、巨石の起源とは別の興味深い問題である。火山の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の広域変化に着目してNotsu（1983）やNotsu et al.（1983, 1985, 1987, 1989）が集積した中部日本全域の第四紀火山のデータを俯瞰すると（註1）、さらに興味深い特徴が浮かび上がってくる。それは、赤城火山の周辺には0.7055を超える高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比をもつ火山が散在するのに対して、これらより北に位置する那須火山以北の東北日本弧には0.7055を上まわる $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比をもつ火山は見られず、ほとんどは0.7045を下まわる低い同位体比をもつことである。また、フォッサマグナ（註2）のほとんど全ての火山が0.7055を下まわる低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比で特徴づけられるのに対して、糸魚川－静

岡構造線西側の中部地方の火山は0.7055を上まわる $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比をもつという地域性が明瞭なのである。さらに注目されるのは、このような火山の広域変化が、白亜紀～古第三紀花崗岩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値の広域変化（Shibata and Ishihara, 1979; 佐藤ほか，1992）とも調和的であるという事実である（佐藤・柴田，2017の図4）。すなわち、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高い火山は、白亜紀～古第三紀花崗岩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値が0.706を超える高い地域に分布する傾向が見てとれ、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の高低の空間分布の特徴が白亜紀から第四紀まで時代を超えて維持されているらしい（佐藤・柴田，2017）。

一方、野津ほか（1987）は、東北日本弧の第四紀火山は（註1）、大部分の地域で低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比（ <0.7045 ）をもつのに赤城など北関東の火山が異常に高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を示す原因を探るため、これらの火山の基盤に相当するいくぶん古い火山岩も測定して、2.0～1.2 Ma（Maは100万年前の意）の間に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が急増したと指摘し、その急増の原因はフィリピン海プレートと共に沈み込んだ海洋性堆積物が初生マグマに混入したためであると考えた。彼らの指摘は、マグマのSr同位体比を規定する要因は、同一地域でも時代により変化することを示唆しており、Sr同位体比を規定する要因が時代を超えた継続性をもつというという上記の推察（佐藤・柴田，2017）とは相容れないように思われるが、比較している時間空間の範囲は著しく異なるので両者を同列に扱うのは適当ではないのかも知れない。火山の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が、テクトニックな背景に依存して同じ地域でも時代によって著しく変化するという野津ほか（1987）の指摘は大変興味深いが、この研究結果は学会発表に留まり、試料の採取地点など詳細は未公表のままになっている。我々は野津氏から提供された基盤岩5試料の全岩化学組成を検討する機会に恵まれたが（佐藤・南，2020）、更なる研究の展開という願いは氏の急逝により断たれた。

おそらく海洋プレートの沈み込み帯で形成されるマグマの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を規定する要因は多様であって（例えば、Notsu et al., 1989）、赤城・榛名・浅間の3火山の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比に関する明瞭な差異を解明するためには更なる研究が必要となる。この課題に向けた手掛かりを得るため、本稿では年代データを取得済みの群馬・長野県境域の火成岩類に焦点を当て $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の時空分布を調べてみる。この県境域南部の妙義－荒船－佐久地域は、中新世～鮮新世には関東山地にあった火山フロントが3-2 Ma頃に八ヶ岳などを含む現在の位置まで後退したため（佐藤，2004）、2 Maより若い火山は存在しないが（図1）、「茂来山期」（中新世）と

「本宿期」(鮮新世)の火成岩類が混在する点で(佐藤・由井, 2008; 佐藤, 2009b, 2010), 予察としては好適な検討対象と考えられる(図2)。以下に, Sr同位体比に関しては未検討に近い状況であったこの地域の火成岩類を測定した結果を提示すると共に, マグマの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の時間変化に関する野津ほか(1987)の指摘を考えてみたい。

2. 群馬・長野県境域の地質の概略とSr同位体比の測定試料

群馬県と長野県の県境は, ほとんどの場合, 利根川水系と信濃川(千曲川)水系の分水嶺を通る。図1と図2には, 今回Sr同位体比を検討した試料の採取地点を示した。採取地点の番号は表1の通し番号に対応し, 以下の本文ではこの番号の後に試料番号を付けてある。県境南部の妙義-荒

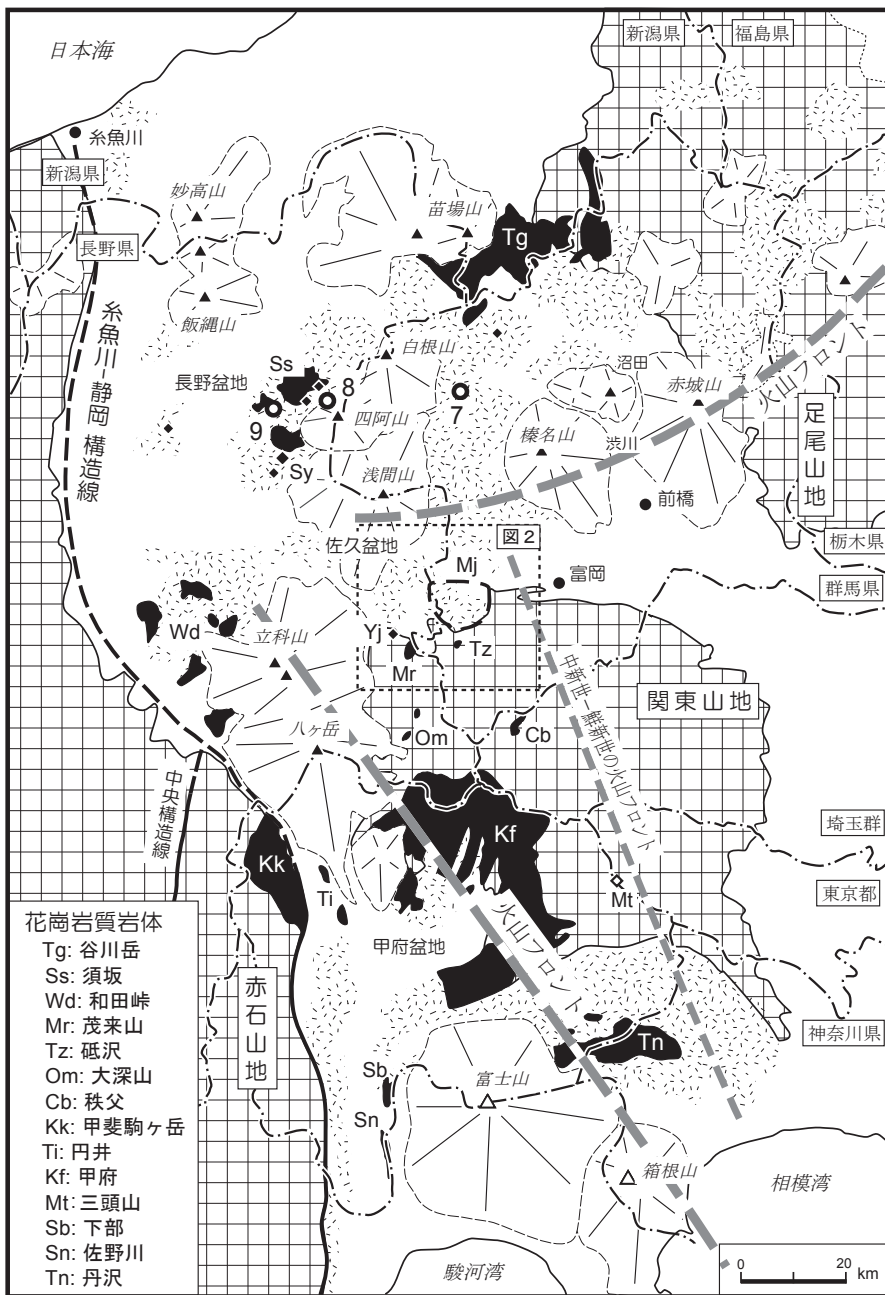


図1. フォッサマグナ地域の地質の概略。

地質調査所(1992)を簡略化した佐藤(2016a)の図1)を改編。火山フロントの位置は佐藤・柴田(2016, 2017)を踏襲。先中新世基盤岩類には古生代～中生代の変成岩や蛇紋岩や堆積岩およびジュラ紀付加体や白亜紀花崗岩体など多様な地質体が含まれる。中新世～鮮新世貫入岩体の名称と年代測定に筆者らが関与した主な文献は, 北から南へと以下の通り。Tg: 谷川岳(川野ほか, 1992; 佐藤, 2016a), Ss: 須坂, Wd: 和田峠(佐藤, 2012), Mr: 茂来山(佐藤・由井, 2008, 佐藤, 2010), Tz: 砥沢(佐藤, 2002), Om: 大深山(佐藤, 2009a), Cb: 秩父(Ueno and Shibata, 1986), Kk: 甲斐駒ヶ岳(佐藤ほか, 1989), Ti: 円井(佐藤ほか, 2015b), Kf: 甲府(佐藤ほか, 2015b), Mt: 三頭山(佐藤, 2011), Tn: 丹沢(佐藤ほか, 1986, 2015b; 佐藤, 2014), Sb: 下部(佐藤ほか, 2015b), Sn: 佐野川。三頭山岩体は小規模なので菱形で位置を示す(佐藤, 2011)。主な岩体はいずれも県境付近の山岳地帯に分布する。Mjは本宿カルデラ(佐藤, 2005b)。パイロフィライト鉱床は, Sy(信陽, 8.5Ma)およびYj(余地, 10.9Ma)(佐藤, 2009b)。本稿で年代とSr同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)を報告する試料の採集地点は, 南から北へ, 1: 茂来山岩体南西部, 2: 余地峠北西の鉄平石採掘場, 3: 荒船山西の兜岩山南面の荒船溶岩基部, 4: 荒船山頂, 5: 大桁山北西の採石場, 6: 妙義山塊の金洞山中腹(1-6は図2参照), 7: 中之条町暮坂峠の南約500m, 8: 四阿山北麓の米子不動滝, 9: 須坂岩体。

- | | | | |
|--|--------------|--|--------------------------------|
| | 中新世-鮮新世 貫入岩類 | | 中新世以降の砕屑性堆積物 |
| | 中新世-鮮新世 火山岩類 | | 主な第四紀火山と山麓の岩屑類 |
| | 先中新世 基盤岩類 | | パイロフィライト鉱床
(Sy: 信陽; Yj: 余地) |

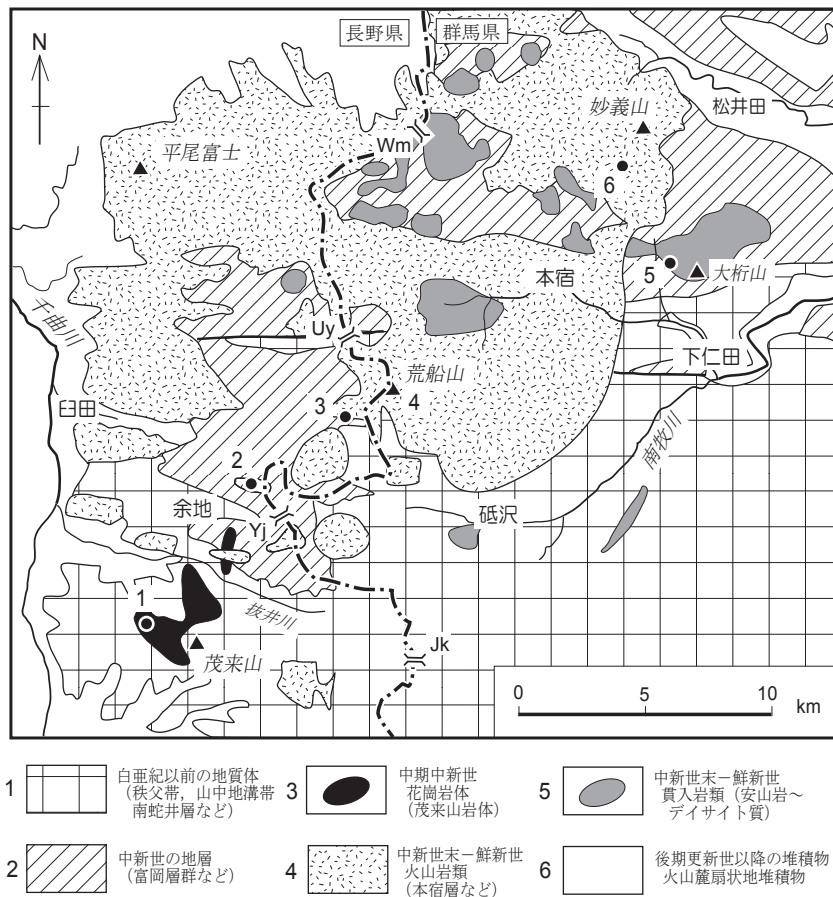


図2. 妙義－荒船－佐久地域の地質概略と試料採取地点.

佐藤 (2004) の図 1 を改編 (原図は中野ほか (1998) を改訂・簡略化). 1. 「白亜紀以前の地質体」は、秩父帯のジュラ紀付加体と山中地溝帯の白亜系の他に、下仁田地域の南蛇井層と白亜紀花崗岩体や跡倉ナップの構成岩類も含む (佐藤ほか, 2015a, 2018, 2020b; 河合ほか, 2022). 2. 「中新世の地層」には、群馬県側の富岡層群と長野県側の内山層や駒込層が含まれる. 3. 「中期中新世の花崗岩体」は、図の範囲では茂来山岩体のみで、露出が2つに分かれて描かれているが地下では一続きの岩体とみられる (佐藤, 2010). 4. 「中新世末－鮮新世の火山岩類」は本宿カルデラを埋積するだけでなく、妙義山塊や平尾富士など佐久地域東部の山稜を構成する. 5. 「中新世末－鮮新世の貫入岩類」は、安山岩－デイサイト質の岩株や岩脈として産し、砥沢岩体は良質な砥石を産した歴史で知られる (佐藤, 2005a, 2006). 6. 「後期更新世以降の堆積物」には図の西方の八ヶ岳火山群や北西方の浅間火山由来の碎屑物や湖成層が分布する. 県境の峠は南から北へ、Jk: 十石峠; Yj: 余地峠; Uy: 内山峠; Wm: 和美峠. この図の範囲の試料採取地点は、南から北へ、1: 茂来山岩体南西部, 2: 余地峠北西の鉄平石採掘場 (佐藤, 2004), 3: 荒船山西方に位置する兜岩山南面の断崖に露出する荒船溶岩基部 (佐藤, 2007), 4: 荒船山頂 (佐藤, 2005b), 5: 大桁山北西の採石場 (佐藤, 2004), 6: 妙義山中之岳神社北方の金洞山南面海拔940m付近 (内海ほか, 1998).

船－佐久地域は今回の主要検討地域であり、試料密度がいくぶん高いため採取地点を図2に示した. この地域は関東山地の北西部に位置し、八ヶ岳から箱根山を経て伊豆小笠原弧に至る現在の火山フロントの前弧側に位置するのに対して、県境北部の四阿山^{あづまやさん}周辺部やその東方の中之条町の試料採取地は東北日本弧の火山フロントの背弧側に位置することになる (図1). 以下では採取地を便宜的に南部と北部に分けて記述する.

2.1. 南部地域：妙義－荒船－佐久地域

この地域には関東山地の基本的な構成要素である秩父帯のジュラ紀付加体や山中地溝帯の白亜系などが分布し、それらを中新世の地層 (富岡層群や内山層) が不整合に被ったり断層関係で接していたりする. 先中新世の地質体の北限は、内山峠 (図2のUy) 西方の滑津川上流域に狭長な露出をなす白亜系と下仁田市街の北に露出するジュラ紀～白亜紀の南蛇井層や白亜紀の花崗岩体 (佐藤ほか, 2018, 2020b; 河合ほか, 2022) であって (註4), これらより北側には中新世以降の地層や火山噴出物が広く分布しており、基盤の露出は知られていない (図1).

中新世～鮮新世には、火山フロントが関東山地を縦断す

る位置にあったとみられ (図1, 註3), 荒船山付近から南側の県境周辺には、中新世の茂来山花崗岩体およびこれと一連の火成活動に起因するとみられる流紋岩脈や熱水変質帯が分布し、岩体北側の余地地区に広がる変質帯の一部はパイロフィライト^{よじ}鉱床として採掘されてきた (佐藤・由井, 2008; 佐藤, 2009b, 2010). 付近の地形的高所には、変質帯を不整合に被う鮮新世の安山岩が散在し、板状節理が発達することから鉄平石石材として採掘されてきた (佐藤・由井, 1994). 変質帯を形成した熱水変質は流紋岩脈だけでなく周囲の中生代や中新世の地層にまで及ぶが、上位の安山岩にまでは及んでいない. 茂来山岩体や流紋岩脈および熱水変質岩については14～11 MaのK-Ar年代が、変質帯上位の安山岩については約4 MaのK-Ar年代が得られ、両者の間には隆起削剝が進行しながらも火成活動は比較的静穏な時期が存在したことが示唆された (佐藤, 2004, 2009b, 2010). これは前述の「茂来山期」と「本宿期」という中新世～鮮新世の火成活動が活発な2つの時期を提唱する契機となった (佐藤・由井, 2008). この地域では茂来山岩体南西部の黒雲母花崗岩 (試料1: 83111610) と余地峠北西1.3km付近にある鉄平石の採掘場で採取した複輝石安山岩 (試料2: 93031701a) の2試料を測定対象に選んだ. 何

れも熱水変質の認められない新鮮な試料である。

図2の北部には中新世末～鮮新世の安山岩質火山岩類が広く分布し、周辺には一連の火成活動に起因するとみられる安山岩～デイサイト質の貫入岩体を多数伴う。南牧川上流の砥沢岩体では金 (Au) の鉱化を伴う絹雲母変質岩について5~4 Maの全岩K-Ar年代が得られている (佐藤, 2002)。本宿^{もとじゆく}周辺の厚い火山岩層は、カルデラを埋積した安山岩質の火砕岩や溶岩からなり、湖成層を挟み、本宿層と名付けられた (本宿団体研究グループ, 1970)。本宿層の多くは変質を受けて緑色を呈するが、荒船山頂から西に延びる尾根など地形的高所に残るカルデラ外の火山岩層には未変質の部分がある。今回はそのような未変質岩について全岩K-Ar年代を測定した2試料をSr同位体比測定用に選んだ。荒船山頂のデイサイト質溶岩 (試料4: 02050501) については2.2 Ma、山頂西方の兜岩山南面の断崖に露出する荒船溶岩基底部の安山岩 (試料3: 05050507) については3.4 MaのK-Ar年代が得られている (佐藤, 2005b, 2007)。

下仁田市街の北に位置する大桁山は、中新世の富岡層群に進入した安山岩体で、弱い変質をうけている。最も新鮮とみられた虻田集落に近い岩体西端部の採石場で採取した試料は、斑晶の多い複輝石安山岩で、微量の粘土鉱物や炭酸塩鉱物を含むが、斜長石や輝石は新鮮であった。この試料5 (86012202) の全岩K-Ar年代の測定により4.1 Maの年代値が得られており (佐藤, 2004)、今回のSr同位体比の測定対象とした。妙義山塊は安山岩質の火砕岩や溶岩からなるが、本宿層に挟まれるような湖成層は見られず、おそらく成層火山体が浸食を受けて奇岩が林立する現在の山容を呈するようになったものと思われる (註5)。低所の岩石は変質していることが多いので、妙義神社北方の金洞山山頂に近い海拔940m付近から溶岩試料を採取し (試料6: SN95101902)、6.0 Maの全岩K-Ar年代を得た (内海ほか, 1998)。変質はごく微弱であり、この複輝石安山岩試料をSr同位体比の測定に供した。

図2の平尾富士周辺について筆者らは未検討であるが、Kaneoka et al. (1979) はデイサイト質な平尾富士溶岩や志賀溶結凝灰岩に加え小諸層群に挟まれるデイサイトも含めて4-3 MaのK-Ar年代を報告している。近年Nakamura et al. (2014) も志賀溶結凝灰岩などについて4 Ma前後のK-Ar年代を報告しており、図2の範囲の「中新世末～鮮新世火山岩類」は6~3 Maに主要な活動期をもつ火山活動の産物とみてよさそうである。ただし、変質を受けた下部層については信頼できる年代値が得られていないと思われるので、活動期間の特に下限については今後とも慎重な検討が望まれる (註6)。

2.2. 北部地域：四阿山^{あずまやさん}周辺と中之条町の火成岩類

この地域では火山物質に富む中期中新世の地層の上位に後期中新世～鮮新世の火山岩類が分布し、県境に並ぶ草津白根山や四阿山や浅間山などの第四紀火山の噴出物や崩壊物が山体の周囲を広く被う (図1)。県境と長野盆地の間に分布する中期中新統には石英閃緑岩質の岩体が進入し、全体的に熱水変質を受けており、パイロフィライト鉱床を伴う (太田・片田, 1955; 赤羽ほか, 1992)。この貫入岩体は主なもので3体に分けられるが (図1)、ここでは一括して須坂岩体と称する。

この北部地域で今回の検討対象に加えた試料7 (SN95102302) は、榛名火山と草津白根火山の間に広く分布する鮮新世とみられる安山岩層中の溶岩である (中野ほか, 1998, 内海ほか, 1998)。試料の採取地点は、旧六合村と中之条町の境界に位置する暮坂峠の南約500m地点の道路脇の露頭であり、5万分の1地質図幅「草津」 (太田, 1957) による「暮坂溶岩」に相当する。太田 (1957) は「暮坂溶岩」を“プロピライトなどの新第三系の上位にある新期の火山岩層で火山体の形態を留めていないものなかで最下部の地層”と位置づけており、局部的に著しく変質して下位のプロピライトと誤認する場合が少なくないと指摘している。我々が検討した試料は、鏡下観察で微弱な粘土化が見られるものの概ね新鮮な複輝石安山岩の溶岩であり、3.9 Maの全岩K-Ar年代が得られている (内海ほか, 1998)。なお、中村 (1986) は太田 (1957) の「暮坂溶岩」を新称の「吾妻累層」の上部に含めており、我々の試料採取地点は「高間山溶岩・凝灰角礫岩部層」に相当する。彼は累層全体を中新世末～鮮新世初期と推定し、群馬県地質図作成委員会 (1999, p.6) もこれを踏襲している。

四阿火山については、これまでSr同位体比のデータがないので今回の検討対象に加えた。試料8 (NS95102201) は須坂市米子川上流の不動滝に露出する四阿火山最下部の溶岩層から採取した複輝石安山岩で、0.76 Maの全岩K-Ar年代が得られている (内海ほか, 1998)。この年代は四阿火山について報告されている既存のデータ (0.75~0.46 Ma; 金子ほか, 1989) の最古の年代とほぼ一致し、この火山が約80万年前から活動を始めたことが分かる。後期更新世以降の噴火記録はなく、四阿火山は活火山としても認定されていない。

須坂岩体については、1980年代前半に予察調査で訪れたが、調べた範囲が全て熱水変質を受けていて、好適な年代測定試料を得ることはできなかった。当時は角閃石が残る比較的変質の弱い試料を選んで角閃石を分離しK-Ar年代の測定を試みたが、空気混入率が高くて誤差が大きく、得

られた中新世の年代値は信頼度が低いとみて公表を控えた。後日訪れた岩体群南端部に産する信陽鉍床については(図1のSy)、パイロフィライト鉍体の周辺部に産する絹雲母変質帯の試料について全岩K-Ar年代を測定し、鉍化の時期を8.5 Maと求めることができた(佐藤, 2009b)。しかし、これを須坂岩体の貫入年代と断定することはできないので、須坂岩体の年代の詳細は今のところ不明である。近年はジルコンのU-Pb年代の測定装置が普及してきたので、この手法を適用して年代を確定することが望まれる。ここであえて年代未詳で変質を受けた岩体をSr同位体比の検討対象に加えたのは、フォッサマグナで小さくはない規模の岩体であるにも関わらず既存のデータが見あたらないからである。試料9(83111411)の採取地点は須坂と菅平を結ぶ国道406号線の間にある仁礼地区の南方で見出した宇原川沿いの露頭である(仙仁川との合流部の約2 km上流)。岩質は年代測定を試みた上記の試料(約1.3 km西で採取)によく似ており、斜長石(<2 mm)は累帯構造が明瞭で比較的新鮮であるが、角閃石(<3 mm)はしばしばアクチノ閃石化しており、緑簾石や緑泥石など細粒で不定形な変質鉍物が散在する。須坂岩体予察時の測定では、黄鉄鉍に富む強変質部を除き、どの露頭も高い帯磁率を示したが(20~70×10⁻³ SI)、試料9も自形一半自形の磁鉄鉍(<0.5 mm)に富み、平滑な切断面の測定で39.7×10⁻³ SIという高い帯磁率を示した。

3. Sr同位体比の測定と結果

3.1. Sr同位体比の測定

Sr同位体比の測定には、K-Ar年代を測定した試料の全岩化学組成分析用の粉末を用いた。試料6~8はK-Ar年代測定時のK定量用に調製した粉末を用いた。熱水変質は原岩のSr同位体比に影響を与える可能性があるため、岩石薄片の鏡下観察で新鮮であることを事前に確認したが、上述のように須坂岩体の試料9はかなりの変質を受けている。分析用微粉末試料の調製では、メノウ製の自動乳鉢や振動ミルを用いた。測定の前処理や測定法はこれまでと同様なので、詳しくは佐藤ほか(2017a)などの報告を参照されたい。今回の試料の測定結果は⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比の初生値に基づいて議論することから、ICP-MS法でRbとSrの含有量も測定した。質量分析計による⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比の測定とRbとSrの定量は海洋研究開発機構の高知コア研究所で実施した。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比の測定誤差(2σ)は±0.00001未満と見積もられる。

3.2. Sr同位体比の測定結果

測定結果を表1にまとめて示した。左端の通し番号は、図1や図2の試料番号に対応する。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比の初生値は、RbとSrの定量結果と年代から計算で求めたが、年代値としては火山岩の場合は全岩K-Ar年代、花崗岩類の場合は黒雲母のK-Ar年代を用いた(表1)。須坂岩体の場合、

表1. 群馬・長野県境地域の火成岩類のSr同位体組成

Table 1 Sr isotope composition for igneous rocks from the border areas between Gunma and Nagano Prefectures, central Japan

Serial ¹⁾ No.	Locality ²⁾	Sample No.	Rock ³⁾	SiO ₂ ⁴⁾ (wt.%)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Initial ⁵⁾ ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	K-Ar age ⁶⁾	Source of age data ⁷⁾
1	Mt.Morai	83111610	Gr	76.4	124	73.5	4.89	0.70573	0.70473	14.3 Ma (Bt) *	S-1
2	Yoji-pass	93031701a	An	n.d.	34.6	353	0.284	0.70392	0.70390	4.4 Ma (wr)	S-2
3	Mt.Kabutoiwa	05050507	An	52.4	16.0	314	0.148	0.70393	0.70392	3.4 Ma (wr)	S-3
4	Mt.Arafune	02050501	Dc	65.0	40.9	300	0.395	0.70399	0.70397	2.2 Ma (wr)	S-4
5	Mt.Oogeta	86012202	An	57.2	39.6	279	0.412	0.70448	0.70446	4.1 Ma (wr)	S-5
6	Mt.Myougi	SN95101902	An	n.d.	10.0	272	0.107	0.70385	0.70384	6.0 Ma (wr)	U-1
7	Kuresaka-pass	SN95102302	An	n.d.	10.6	235	0.130	0.70395	0.70394	3.9 Ma (wr)	U-1
8	Mt.Azumaya	SN95102201	An	n.d.	30.3	302	0.291	0.70385	0.70385	0.76 Ma (wr)	U-1
9	Susaka	83111411	Qd	63.3	17.1	250	0.198	0.70439	0.70437	8.5 Ma (wr) **	S-6

Sr isotope ratios and Rb and Sr contents were analyzed by MINAMI Masayo of Nagoya University and WAKAKI Shigeyuki of Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC.

1) Serial numbers correspond to those in Figures 1 and 2.

2) Land marks close to the sample sites.

3) Abbreviations : Gr : biotite granite, An : two pyroxene andesite, Dc : hornblende dacite, Qd : hornblende quartz diorite.

4) SiO₂ contents are from Sato (2005b, 2007) for Nos.3 and 4, and Sato (unpublished) for others. n.d. : not determined

5) Initial ratios were calculated based on K-Ar age data.

6) K-Ar ages of mineral from the same pluton (No.1) or whole-rock specimens from the same rock samples (Nos.2-8). Bt: biotite; Wr : whole rock.

*: Biotite from granodiorite close to No.1 sample.

** : Sericite-quartz rock in the Shinyo pyrophyllite deposit associated with the Susaka pluton.

7) S-1: Sato and Shibata (2017); S-2 & 5 : Sato (2004); S-3 : Sato (2007); S-4 : Sato (2005b); S-6 : Sato (2009); U-1 : Uchiumi et al. (1998).

信陽鉍床の鉍化の年代を岩体の年代と仮定した。取り扱っている岩石が比較的若くRb/Sr比が小さいので、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の測定値と初生値の差は小さい場合が多く、茂来山岩体の例を除き、小数点以下5桁目にわずかに影響が及ぶ程度である(表1)。これを考慮して、表1の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の測定値と初生値は、それぞれ小数点以下5桁まで表記してある。

4. 考察：Sr同位体比の時空分布と今後の課題

4.1. 群馬・長野県境域の火成岩と中部日本の第四紀火山との比較

図3の上半分には今回検討した群馬・長野県境域の火成岩試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値を示した。データ点は下から上へ、試料採取地がなるべく南から北になるよう配列してある。今回検討した試料の多くは中新世末～鮮新世の火山岩であり、元の火山体は削剥されてしまい原形を留めている訳ではないので、個々の試料が火山体の中で占めていた時間的空間的位置は明らかではない。そこで、ひとつの火山ではSr同位体比にどのくらい分散があるのかを見るため、図3の下半分に中部日本の第四紀火山(註1)の中で5個以上の試料が測定された代表的火山を選び、それらの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の変化幅と平均値を示してみた。この図では以下の4点が注目される。(1) 南部フォッサマグナでは、富士山や箱根山に見られるように、伊豆小笠原弧の火山(Notsu et al., 1983)と同様の0.7035程度の低い値が特徴的で、同一火山内のデータの変化幅も火山ごとの差異も極めて小さい。図には含めていないが、甲府盆地の北に位置する黒富士火山もこれに似た特徴をもつ。(2) これと対照的に、中部山岳地域の火山は全体に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高く、平均値が0.7055を超え最大値は0.708に及ぶだけでなく、個々の火山のデータの変化幅が大きい。(3) フォッサマグナ地域の中～北部は両者の中間にあつて、南部フォッサマグナに近い八ヶ岳から、中部山岳地域に相当する高く変化に富む $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比をもつ赤城山まで多様性に富む。(4) 以上の3地域全体を通じて、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が大きい火山では試料によるデータの分散が顕著で、南部フォッサマグナや伊豆小笠原弧のように $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が低い火山では、データの変化幅もごく小さいという傾向が指摘されよう。浅間山や富士山ではデータの変化幅が小さいため、変化幅を示す横線が平均値を示す菱形のマークに隠されてしまう程である(図3)。

今回検討した試料は、全てが0.705以下の低い値を示し、大桁山を除く全ての火山岩試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値が0.704を下まわるといった結果となった(図3)。詳細については今後の検証が必要だが、上記のような第四紀火山に関する既存

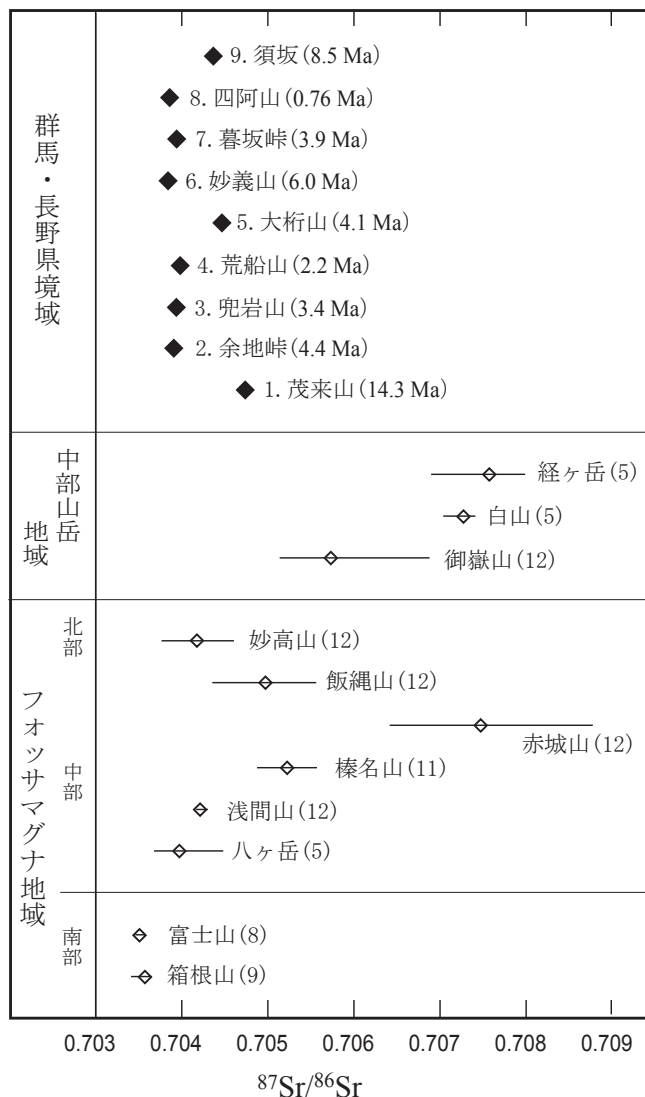


図3. 群馬・長野県境域の中新世～更新世火成岩類と本州中部の主な第四紀火山のSr同位体比。

群馬・長野県境域の火成岩類については、試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値を採取地の南北配列となるべく調和するよう上下に配列して示した(◆マーク)。添付の番号は表1の通し番号に対応し、地名の後の括弧内には初生値の計算に用いた試料のK-Ar年代を示した(9.須坂は岩体に伴うパイロフィライト鉍床の年代)。図の下半分には、中部山岳地域とフォッサマグナ地域の代表的な第四紀火山のSr同位体比を示した(◇マーク)。そのほとんどは中期更新世以降に活動した若い火山で、飯縄山と経ヶ岳以外は活火山とされている(註8)。これらは、Notsu et al. (1987, 1989) が総括した中部日本の火山(<1.81Ma)で5試料以上が測定されている18の火山の中から地域ごとに代表的な火山を選び出したもので、その $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比のデータ範囲と平均値をそれぞれ横線と菱形で表し、火山名の後の括弧内は測定試料数を示している。Notsu et al. (1987, 1989) の一覧表にはデータ範囲だけ示されているので、平均値の算出にあたっては彼ら自身の測定値だけでなく引用されている文献も参照した(Ishizaka et al., 1977; Matsuhisa and Kurasawa, 1983; 倉沢, 1984)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が大きい火山ではデータの変化幅も大きいものに対して、変化幅の小さい浅間山や富士山では横線が平均値を示す菱形のマークに隠されていることに注意。

データを参照すると、これらの試料と同源とみられる火山岩層から赤城山のような高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が見出される可能性は低いと予想される。もっとも、冒頭で記述した野津ほか(1987)の指摘もあるので、この推測は確定的ではない。この問題は次の項で考えてみたい。

ところで、今回の検討試料の中で0.704を上まわるやや高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値が得られたのは、茂来山・大柘山・須坂の3地点で、何れも貫入岩体という共通性が認められる。茂来山花崗岩体については、今回0.70473という初生値を与えた試料1(83111610, 76.4wt.% SiO_2)に近い場所から採取した花崗閃緑岩(83111612, 64.5wt.% SiO_2)について、いくぶん低い0.70465という初生値が得られている(佐藤・柴田, 2017)。前回の試料が磁鉄鉱を含み高い帯磁率で特徴づけられる酸化型に区分されるのに対し、今回の試料1は茂来山岩体南西端部に産する低帯磁率で特徴づけられる還元型に区分される。酸化型の岩体周辺部に還元型が産する例は甲府岩体でも知られており(Sato, 1991; 佐藤・柴田, 2016)、炭質物を含む堆積岩地殻の影響で還元的な固結条件が形成された可能性が考えられる(註7)。

大柘山の安山岩体は富岡層群に進入した餅盤状の岩体で、虻田の小坂川河床には岩体西端部のシート状岩脈が露出しており、富岡層群の下位からもたらされたとみられる捕獲岩が含まれる(例えば、佐藤, 2004, p.112; 佐藤ほか, 2020b, p.63)。近傍に露出する後期白亜紀の滑花崗岩体(佐藤ほか, 2018)に酷似する捕獲岩には、部分熔融後に再結晶したかのような組織も見られた。今回検討した試料5(86012202)のやや高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値は、マグマが浅所で取り込んだ珪長質岩の影響とも考えられるが、この岩体が弱い変質をうけ、最も新鮮とみて採石場から採取したこの試料にも微量ながら粘土鉱物や炭酸塩鉱物が含まれるなど、二次的な影響による可能性も残る。大柘山に近い妙義山の試料6(SN95101902)との間に有意の差が認められるので、その原因も含めて更に検討する必要がある。

須坂岩体については、太田・片田(1955)が5万分の1地質図幅「須坂」とその説明書に記載しているように、全体が熱水変質をうけていて、既述のように我々の予察時にもK-Ar年代測定に好適な試料を採取することができなかった。得られた $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値は中-北部フォッサマグナに一般的な低い値であるが、年代の詳細を含めて今後の検証課題として残された。

ところで、同一地域の火成岩類のSr同位体比の時代変化という視点で今回の結果を見たらどうなるであろうか。「同一地域」の範囲が問題であるが、ここでは近接する(1)茂来山岩体と余地峠、(2)兜岩と荒船山、(3)大柘山と妙

義山、(4)四阿山と須坂の対を比較してみよう(図3, 表1)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値の低下は(1)と(4)、上昇は(3)で、変化なしが(2)となる。今回は検討対象としなかったが、時代による変化が認め難い例として谷川岳花崗岩体と苗場火山の例も挙げられよう(佐藤, 2016a)。事例が少ないこともあるが、特定の変化傾向は見出されないようである。県境の活火山である浅間山と草津白根山のSr同位体比(0.7040~0.7043; Notsu et al., 1987)も合わせると、群馬・長野県境域に産する中新世以降の火成岩のSr同位体比は、0.704前後の値を示す例が多く、時代による急変は認め難いということになる。

4.2. 火山のSr同位体比とブーゲー重力異常との比較

群馬県とその周辺域の地質構造を探る手掛かりを得るため、石原・佐藤(2016)は空中磁気異常図と共にブーゲー重力異常図を作成した(p.157の図2; 註9)。これを見ると、関東山地や足尾山地のような先中新統の分布域は顕著な正の重力異常で特徴づけられるのに対して、先中新統の露出がない群馬県の中中部から北部は負の異常と比較的小さい正の異常が入り組んだ複雑なパターンを示すことが分かる。先中新統基盤の露出がない県の中北部は、中新世以降の新しい堆積物や火山噴出物など比較的密度の小さい物質に被われるという地質状況が重力異常図にも反映されていると解される。

この重力異常図と火山の分布を比較すると、浅間・榛名・赤城の3火山付近の重力異常には以下のような系統的とも言える差異が存在することに気付かされる。すなわち、浅間では約-20 mGal、榛名では約+15 mGal、赤城では約+32 mGalと、Sr同位体比の増加と調和するかのよう東に向かって高くなっているのである。ちなみに茂来山や四阿山付近では約0 mGalで、浅間と榛名の中間的な重力異常値である。関東山地や足尾山地のように先中新統が広く露出する地域は、+30 mGalを超えるような正の重力異常で特徴づけられ、赤城山では火山体の少なくとも東半分が足尾山地の基盤に乗っていることは既述の通りである(註2)。負の重力異常が卓越する浅間山周辺では、先中新統基盤の露出は知られていない(例えば、荒牧, 1993)。一方、両者の中間に位置する榛名山では、赤城山のような先中新統基盤の伏在が野外調査やボーリングで確認されているわけではないが、山頂近くの高所にも中新世とみられる変質した安山岩質火砕岩層の小規模な露出が知られており(大島, 1986; 野村ほか, 1990; 下司・竹内, 2012, p.16)、重力異常図と合わせ考えると、榛名火山は隆起した基盤ブロック上に位置するという産状が想定されよう。このような野外観

察と重力異常から推定される基盤構造が、火山をつくるマグマのSr同位体比とどのように関係するのかは未解明である。しかし、基盤構造と火山の位置との関係については、東北日本弧の火山フロント沿いに配列する火山が、50km程度の間隔をおいて地形的高所に産する傾向があるという指摘がある（例えば、Tamura et al., 2002; Hasegawa et al., 2005）。その原因として、彼らは地殻内へのマグマの繰り返し注入のため（Tamura et al., 2002）、あるいはモホ面付近に集積したマグマから放出された水（aqueous fluids）の影響で地殻が変形・破壊されやすくなるため（Hasegawa et al., 2005）だと考えた。原因の解釈は両者で異なるものの、地殻深部のマグマプロセスが地殻表層部を変位させ、隆起地形として認識できるほどの結果をもたらしているという点では共通している。

この東北日本弧の火山フロントの南西端に約30 kmの間隔で並ぶのが、浅間・榛名・赤城の3火山である。これらの火山周辺でも、東北地方と同様の隆起現象が認められるのだろうか。上記のブーゲー重力異常図を詳しく見ると、榛名火山も浅間火山も、全体としては-30~-10 mGal程度の低重力異常域の中で、尾根状の相対的高重力異常部に位置することに気付かされる。榛名火山は0~+15 mGalの尾根状部の南東端に、浅間火山は-30~-10 mGalの尾根状部（烏帽子火山群を含む）の東端に位置するのである。群馬の火山フロント上の3火山が基盤の高まりに産するらしいという点では、東北日本弧主要部に似た傾向が垣間見えるとも言えよう。榛名火山と浅間火山が産する高重力異常部の実態は不明であるが、火山フロント上の3火山に共通する基盤構造の類似性は偶然とも思えず、成因の解明が望まれる。

ところで、火山とその基盤構造の対応関係が垣間見える浅間・榛名・赤城の3火山は、火山フロント上の活火山である（註8）。一方で、今回検討した群馬・長野県境域の火成岩試料は、四阿山を除き元の火山体が残っていない火山岩が主体で（3試料は貫入岩）、火成岩として形成されてから既に200万年（2 m.y.）以上の時間が経過している。貫入岩体の上位に存在したかも知れない火山体も含めて、今回の試料採取地に存在したであろう火山体の大半は浸食で失われ、碎屑物は地形的低所に移動・堆積してしまっているだろう。浅間・榛名・赤城の3火山に垣間見えるような基盤構造が過去にあったとしても、その残存を確認するのは容易ではないと思われる。地殻に働く応力場や断層の動きも、時代により変化したかも知れない。島弧会合部に位置するフォッサマグナ地域は、日本列島の中でも特に複雑な変動を経てきた可能性が高い。群馬県とその周辺域の重力

分布を高精度で図化した上記のブーゲー重力異常図には（石原・佐藤，2016の図2）、そのような複雑な変動史を集積した地殻浅所の密度構造が色濃く反映されているとみるのが自然であろう。一方で、火山岩のSr同位体比は、マグマが上昇してくるウエッジマントルや地殻の物理化学的な諸性質を反映していると考えられるので、ブーゲー重力異常図の特に短波長成分から読み取れる情報には限界があるかも知れない。

最後に、上記のような重力異常図の限界を意識しつつも、冒頭で紹介した野津ほか（1987）が研究対象とした榛名山周辺域について検討してみたい。野津ほか（1987）で基盤とされた試料（>2 Ma）のほとんどは、詳しい採取地点は不明であるが何れも榛名山の周辺で採取された安山岩であり、文字通りの「基盤」ではない。採取地点が判明している1試料（KKT01）は子持山東麓の採石場で採取された約6 Maの安山岩であった（佐藤・南，2020）。この付近から沼田にかけての地域には、-10 mGalを下まわる顕著な負の異常が認められ、榛名山東側の渋川市南部も負の重力異常域であることは古くから指摘されていた（小川，1956）。榛名・赤城両火山の間には、群馬県内でも特に複雑な基盤構造が広がっている可能性が考えられよう。ブーゲー重力異常図に現れた複雑な構造が、地殻の不均一な構造の反映であるとするなら、マグマが上昇してきた経路によりSr同位体比が異なる可能性もあるだろう。野津ほか（1987）は、榛名山と赤城山の周辺域では2.0~1.2 Ma頃を境に火山をつくるマグマの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が急増したと指摘したのであるが、この急増は時代による変化ではなく複雑な地殻構造を反映した場所の違いを反映したものである可能性も否定しきれないように思われる。試料の採取密度を高めてSr同位体比の時空分布を追加検討する必要があるだろう。ただし、これには以下の2つの困難な問題がある。（1）元の火山体が残存しない火山岩は噴出地点の特定が難しいので、検討試料としては貫入岩体や岩脈を選ぶことが望ましい（註10）。しかし、（2）火山岩の岩株や岩脈は変質をうけていることが多いので、年代の測定には変質に対する抵抗力の強いジルコンのU-Pb年代測定法などを採用し、Sr同位体比の測定には全岩ではなく変質を免れた造岩鉱物の中心部など微小領域に的を絞るイオンビームなどを利用した特別な分析技術を活用する必要があるからである。

このほか直接的な検証方法として、（1）掘削により基盤岩を採取するか、（2）火山噴出物の中から捕獲岩を探し出して、それらの年代とSr同位体比を含む岩石化学的な性質を調べるという手法も考えられる。何れも容易ではないが、検討の価値があると思われる。

5. あとがき

野津ほか (1987) は、2.0~1.2 Maの間に北関東の下までフィリピン海プレートが沈みこみ、この地域の火山の初生マグマの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高い値を示すようになったと指摘した。この指摘は本稿の予察的検討の動機のひとつとなった貴重な問題提起であったが、今回の我々の研究では、これに応えることはできていない。複雑な地殻構造の反映という別の可能性も含めて、解明には今後のさらなる研究が求められる。ただ、今回我々が検討した試料の特に火山岩類は、年代によらず0.704前後の低いSr同位体比をもち、これは彼らが指摘した「急増前」の基盤に相当する年代 (6~2 Ma) と同位体比 (0.704) に相当する点で、基礎的なデータを提供することができたと思う。今後は、関東山地の小岩体を含め、未検討地域のデータ取得を進めたい。

謝辞

東京大学地震研究所名誉教授の荒牧重雄博士は妙義山の古地磁気についてご教示くださった。本研究でSr同位体比を測定した年代測定済みの3試料 (No.6-8) は、旧地質調査所の地質年代研究グループが長年にわたり系統的に保管・管理してきた貴重な標本であり、その一部使用にあたっては産総研地質情報総合センターのアーカイブ室に便宜を図っていただいた。神奈川県温泉地学研究所前所長の吉田明夫博士による懇切丁寧な査読コメントは、原稿の改善に極めて有益であった。以上の皆様と関係機関に深謝します。

< 註 >

註1) Notsu (1983) やNotsu et al. (1989) の時代には、第四紀は1.81 Ma以降とされていたので (2009年に2.588 Ma以降に改訂)、ここではそのままの表記を用いた。なお、図3の下部に図示した第四紀火山の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、測定値であって初生値ではない。個別試料の年代が測定されているわけではないが、何れも極めて若い火山の試料であり、測定値は初生値にほぼ等しいとみて差し支えない。

註2) 「フォッサマグナ」の範囲については、西縁を糸魚川-静岡構造線とする点に異論はないが、東縁は必ずしも明確ではない。新潟県柏崎から千葉県銚子や千葉付近に至る構造線が想定されたこともあるが (例えば、山下, 1970, 1995)、群馬県とその周辺域の重力異常図を見ると (石原・佐藤, 2016)、赤城山付近より南側の県南東部を除いて、県北部-新潟県にはそのような大構造を示唆するパターンは認め難い。ここでは、佐藤 (2016a) や佐藤・柴田 (2017)

と同様に、関東山地の南側の中新統分布域を「南部フォッサマグナ」、関東山地の北西と北側の中新統分布域を「中北部フォッサマグナ」とする。花崗岩体の全部あるいは一部が「フォッサマグナ」に隣接する先中新世基盤に進入した甲斐駒ヶ岳岩体や谷川岳岩体も含めるような場合は、周辺域も含むという意味合いで「地域」を付けて「フォッサマグナ地域」という呼称を用いることにする。赤城火山の位置は微妙であるが (図1)、少なくとも火山体の東半部は足尾山地などの中古生層を基盤としており、噴出物に基盤由来の岩片が含まれることから (守屋, 1968)、ここでは「フォッサマグナ地域」の火山とする。

註3) 佐藤 (2004) による「後期中新世-鮮新世火山フロント」は、年代の判明した貫入岩体の東縁に想定したもので、その後の検討により南部を東に移動して図1のように改訂した (例えば、佐藤・由井, 2008; 佐藤, 2011)。なお、荒船山頂の試料4 (02050501) の年代 (2.2 Ma) は、2009年の国際地質科学連合 (IUGS) による第四紀の定義改変で鮮新世から第四紀に移行されたジェラシアン (2.288~1.806 Ma) に含まれるが (Gradstein et al., 2012)、妙義-荒船-佐久地域の火成活動のほとんどは中期中新世~鮮新世に起こったと考えられるので、図1では佐藤 (2011) など既報の「中新世-鮮新世の火山フロント」を継承した。

註4) 南蛇井層の時代は従来ジュラ紀~白亜紀最初期とされてきたが、砂岩に含まれる碎屑性ジルコンのU-Pb年代を測定することにより、一部に後期白亜紀の地層が含まれることが判明し、その部分を「赤津層」として区分した (佐藤ほか, 2020b; 河合ほか, 2022)。

註5) 妙義山塊の火山岩層について、荒牧 (1993) は『浅間火山地質図』の解説の中で「噴出物の大部分は、輝石安山岩の凝灰角礫岩と溶岩流から成り、逆転帯磁を示す」(原文のまま) としている。中新世最末期の古地磁気は逆転期間が比較的長く (例えば、Gradstein et al., 2012)、図2の範囲を含む地域の空中磁気異常を解析した我々の結果とも調和的なので (佐藤・石原, 2011)、この記述は大変興味深い。この記述は第二次大戦後に日米科学協力事業の一環として来日した米国地質調査所の研究者による測定が基になっているが、より詳しい調査が必要とのことである (荒牧重雄, 2019, 私信)。該当する報告書は、我々も発見できていない。

註6) ここで検討対象とした妙義-荒船-佐久地域の火山岩については、過去に多数のK-Ar年代の報告があるものの (野村・小坂, 1987; 野村・海老原, 1988, 1991)、年代値が大きくばらつき変質の影響も考えられるため、取り扱いに注意が必要と思われる (内海ほか, 1998)。

註7) 花崗岩類の帯磁率と酸化型/還元型の区分については、佐藤 (2003) や佐藤ほか (1992) を参照されたい。

註8) 図3に示した第四紀火山のほとんどは、0.5 Ma以降に活

動した中期更新世～完新世の若い火山であり、活火山に認定されている（気象庁の「日本活火山総覧第4版」<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/kakkazanrisut.pdf> 参照 2023.1.15）。飯縄山と経ヶ岳は活火山とはされておらず、それぞれ0.34~0.15 Maと1.4~0.7 Maの前期～中期更新世の年代値が報告されている（中野ほか, 2013）。

註9) 石原・佐藤 (2016) のブーゲー重力異常図は (p.157の図2)、基盤深度の分布をよく反映していると思われる仮定密度2.30 g/cm³の格子点データ (500 m間隔) を用いて作成したもので、平均すると2.7 km²に1点分布するデータを基にしており、主に波長2~3 km以上の重力異常を見ていることになる。

註10) 火山体の直下にマグマ溜まりが存在しない場合も念頭に置く必要があるかも知れない。例えば浅間火山のマグマは、山頂の8 kmほど西の烏帽子火山群の地下5~10 km付近に見出された地震波低速域に想定されるマグマ溜まりから供給されていると推定された (Nagaoka, et al., 2012; Takeo et al., 2022)。このマグマ上昇域も、ブーゲー重力異常図の尾根状隆起部にある。

文献

- 赤羽貞幸・加藤碩一・富樫茂子・金原啓司 (1992) : 5万分の1地質図幅「中野」および同説明書。地質調査所, 103 pp.
- 新井房夫 (1971) : 地形・地質, 『前橋市史』第1巻, 第1編「自然」, 第2章, 8-66.
- 荒牧重雄 (1993) : 5万分の1浅間火山地質図, 火山地質図6, 地質調査所。地質調査所 (1992) : 日本地質図, 100万分の1, 第3版, 地質調査所。
- 下司信夫・竹内圭史 (2012) : 榛名山地域の地質。地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅)。産総研地質調査総合センター, 79pp.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M. eds. (2012) : The Geologic Time Scale, Elsevier, Amsterdam, 1144 pp.
- 群馬県地質図作成委員会 (1999) : 群馬県10万分の1地質図解説書。内外地図株式会社, 東京, 114 pp.
- Hasegawa, A., Nakajima, J., Umino, N. and Miura, S. (2005) : Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity. *Tectonophysics*, **403** : 59-75.
- 石原丈実・佐藤興平 (2016) : 群馬県とその周辺域の磁気異常と重力異常の分布。群馬県立自然史博物館研究報告, (20) : 155-160.
- Ishizaka, K., Yanagi, T. and Hayatsu, K. (1977) : A strontium isotopic study of the volcanic rocks of the Myoko volcano group, central Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63** : 295-307.
- 金子隆之・清水 智・板谷徹丸 (1989) : K-Ar年代から見た信越高原地域の火山活動。岩鉱, **84** : 211-225.
- Kaneoka, I., Matsubayashi, O., Zashu, S. and Aramaki, S. (1979) : K-Ar ages of late Tertiary volcanic rocks in the Asama area. *Jour. Geol., Soc. Japan*. **85** : 547-549.
- 河合航汰・竹内 誠・志村侑亮・佐藤興平・南 雅代 (2022) : 関東山地下仁田地域北部に分布する中生界のジルコンのU-Pb年代。群馬県立自然史博物館研究報告, (26) : 75-90.
- 川野良信・柴田 賢・内海 茂・大平寛人 (1992) : 谷川岳鮮新世深成岩体のK-Ar年代。岩鉱, **87** : 221-225.
- 倉沢 一 (1984) : ストロンチウム同位体比からみた富士・箱根・伊豆地域火山岩類。地調月報, **35** : 637-659.
- 前橋市教育委員会 (2016) : 国指定天然記念物 岩神の飛石環境整備事業報告書。前橋市教育委員会, 78pp.
- Matsuhisa, Y. and Kurasawa, H. (1983) : Oxygen and strontium isotopic characteristics of calc-alkalic volcanic rocks from the central and western Japan arcs : Evaluation of contribution of crustal components to the magmas. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18** : 483-510.
- 守屋以智雄 (1968) : 赤城火山の地形及び地質。前橋泥流営林局, 65pp.
- 本宿団体研究グループ (1970) : グリーンタフ変動の研究—本宿グリーンタフ層についての団体研究。地研専報No.16, 95 pp.
- Nagaoka, Y., Nishida, K., Aoki, Y., Takeo, M. and Ohminato, T. (2012) : Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **333-334** : 1-8
- 中村庄八 (1986) : 群馬県北西部の吾妻川中流域に分布する新第三系—特に中新世後期の陥没盆地について—。地球科学, **40** : 238-254.
- Nakamura, H., Oikawa, T., Geshi, N. and Matsumoto, A. (2014) : Migration of a volcanic front inferred from K-Ar ages of late Miocene to Pliocene volcanic rocks in central Japan. *Island Arc*, **23** : 236-250.
- 中野 俊・竹内圭史・加藤碩一・酒井 彰・濱崎聡志・広島俊男・駒沢正夫 (1998) : 20万分の1地質図幅「長野」, 地質調査所。
- 中野 俊・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川辺禎久・及川輝樹・古川竜太・下司信夫・石塚 治・山元孝広・岸本清行 (2013) : 日本の火山 (第3版), 1 : 2,000,000地質編集図11, 解説書 (概要および付表), 29pp.
- 野村 哲・海老原充 (1988) : 群馬県西部新生代火山岩類のK-Ar年代と古地磁気。群馬大学教養部紀要, **22** : 65-78.
- 野村 哲・海老原充 (1991) : 群馬・長野県境付近に分布する新生代火山岩類のK-Ar年と地史学的考察。群馬大学教養部紀要, **25** : 109-117.
- 野村 哲・小坂共栄 (1987) : 群馬県南西部の新第三系の地質構造発達史。群馬大学教養部紀要, **21** : 51-68.
- 野村 哲・小林 豊・渡辺将哲・海老原充 (1990) : 群馬県榛名火山の基盤。群馬大学教養部紀要, **24** : 79-92.
- Notsu, K. (1983) : Strontium isotope composition in volcanic rocks from the Northeast Japan arc. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18** : 531-548.
- Notsu, K., Kita, I. and Yamaguchi, T. (1985) : Mantle contamination under Akagi volcano, Japan, as inferred from combined Sr-O isotope relationships. *Geophys. Res. Lett.*, **12** : 365-368.
- 野津憲治・長尾敬介・大島 治 (1987) : 北関東の火山岩の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比は、いつから異常に高くなったか? 日本火山学会1987年春季大会要旨集, p.25
- Notsu, K., Aramaki, S., Oshima, O. and Kobayashi, Y. (1987) : Two overlapping plates subducting beneath central Japan as revealed by strontium isotope data. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **32** : 195-207.
- Notsu, K., Arakawa, Y., Nakano, S. and Yamasaki, M. (1989) : Lateral variation in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios of volcanic rocks from central Japan. *Geochem. Jour.*, **23** : 45-55.
- 小川健三 (1956) : 群馬県地区重力測定調査報告。地調月報, **7** : 145-149.
- 大島 治 (1986) : 榛名火山。日本の地質「関東地方」編集委員会編, 日本の地質3「関東地方」, 共立出版, 東京, 222-224.
- 太田良平 (1957) : 5万分の1地質図幅「草津」および同説明書。地質調査所, 75 pp.
- 太田良平・片田正人 (1955) : 5万分の1地質図幅「須坂」および同説明書。地質調査所, 54 pp.
- Sato, K. (1991) : Miocene granitoid magmatism at the island-arc junction, central Japan. *Modern Geology*, **15** : 367-399
- 佐藤興平 (1992) : 関東地方の天然記念物, 地質ニュース, (453) : 25-37.
- 佐藤興平 (2002) : 群馬県南牧村砥沢の金鉱山跡調査報告 (続) —砥沢岩体のK-Ar年代と南牧周辺地域の新生代火成活動史—。群馬県立自然史博物館研究報告, (6) : 59-74.
- 佐藤興平 (2003) : 環日本海のメタロジェニー; 地殻構造と花崗岩系列。資源環境地質学—地球史と環境汚染を読む—。資源地質学会, 東京, 61-70.
- 佐藤興平 (2004) : 妙義-荒船-佐久地域の火山岩類のK-Ar年代と火山フロントの後退。群馬県立自然史博物館研究報告, (8) : 109-118.
- 佐藤興平 (2005a) : 砥沢の砥石: 地質と歴史。群馬県立自然史博物館研究報告, (9) : 1-9.
- 佐藤興平 (2005b) : 荒船山の火山岩のK-Ar年代と本宿カルデラの火山活動史における意義。群馬県立自然史博物館研究報告, (9) : 11-27.
- 佐藤興平 (2006) : 砥沢岩体の帯磁率と化学組成: 砥石鉱床の成因に関

- する予察的検討. 群馬県立自然史博物館研究報告, (10): 63-80.
- 佐藤興平 (2007): 荒船溶岩のK-Ar年代と隗岩動植物化石群の時代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (11): 53-61.
- 佐藤興平 (2009a): 関東山地北西縁に産する大深山花崗岩質岩体のK-Ar年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (13): 69-76.
- 佐藤興平 (2009b): 長野県東部のパイロフィライト鉱床: 余地および信陽鉱床の鉱化年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (13): 77-85.
- 佐藤興平 (2010): 関東山地北西縁部の余地地域に分布する熱水変質帯の形成時期. 群馬県立自然史博物館研究報告, (14): 71-78.
- 佐藤興平 (2011): 関東山地中央部の三頭山岩体: 化学組成と年代の予察的検討. 群馬県立自然史博物館研究報告, (15): 93-100.
- 佐藤興平 (2012): フォッサマグナ中央部の和田峠周辺に分布する花崗岩質岩体群のK-Ar年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (16): 77-84.
- 佐藤興平 (2014): 丹沢山地の石割山トータル岩体の年代と南部フォッサマグナ-関東山地の火成活動における意義. 群馬県立自然史博物館研究報告, (18): 129-144.
- 佐藤興平 (2016a): 谷川岳花崗岩体の年代とフォッサマグナ地域における新第三紀の珪長質岩火成活動. 群馬県立自然史博物館研究報告, (20): 85-104.
- 佐藤興平 (2016b): 巨石の天然記念物「岩神の飛石」の起源について. 群馬県立自然史博物館研究報告, (20): 133-140.
- 佐藤興平・石原丈実 (2011): 関東山地北西部の地質と磁気異常. 群馬県立自然史博物館研究報告, (15): 101-113.
- 佐藤興平・南 雅代 (2020): 榛名・小野子・子持火山の基盤を構成する火山岩類の岩石化学的特徴: 天然記念物「岩神の飛石」との比較. 群馬県立自然史博物館研究報告, (24): 43-52.
- 佐藤興平・柴田 賢 (2016): 甲府花崗岩体のSr同位体組成. 群馬県立自然史博物館研究報告, (20): 111-120.
- 佐藤興平・柴田 賢 (2017): フォッサマグナとその周辺域に分布する新第三紀-第四紀火成岩類のSr同位体組成の特徴と広域変化. 群馬県立自然史博物館研究報告, (21): 19-28.
- 佐藤興平・由井俊三 (1994): 長野県佐久の鉄平石. 地質ニュース, (484): 2-3.
- 佐藤興平・由井俊三 (2008): 関東山地北西縁に産する八千穂岩脈群のK-Ar年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (12): 45-54.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (1986): 丹沢トータル岩質岩体の角閃石と黒雲母の不一致年代. 地質雑, **92**: 439-446.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (1989): 甲斐駒ヶ岳花崗岩質岩体のK-Ar年代と岩体冷却史-赤石山地の地質構造形成史における意義一. 地質雑, **95**: 33-44.
- 佐藤興平・石原舜三・柴田 賢 (1992): 日本花崗岩図, 日本地質アトラス (第2版), 地質調査所.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (2015a): 関東山地北縁部の異地性岩塊や礫岩に含まれる珪長質岩火成岩類の年代: 跡倉ナツブ実像解明の歴史と今後の課題. 群馬県立自然史博物館研究報告, (19): 69-94.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (2015b): 甲府盆地周辺の花崗岩体の年代と南部フォッサマグナ地域の構造発達史における意義. 群馬県立自然史博物館研究報告, (19): 95-109.
- 佐藤興平・南 雅代・大島 治・鈴木和博・柴田 賢 (2017a): Sr同位体比からみた「岩神の飛石」の起源 (予報). 群馬県立自然史博物館研究報告, (21): 29-38.
- 佐藤興平・南 雅代・鈴木和博・柴田 賢 (2017b): 火山体崩壊に起因する火山災害軽減のためのパイロット研究: Sr同位体比から見えてきた巨石の天然記念物の起源. 名古屋大学年代測定研究, **1**: 44-50.
- 佐藤興平・竹内 誠・鈴木和博・南 雅代・柴田 賢 (2018): 関東山地北西縁下仁田地域に産する珪長質火成岩体のU-Pbジルコン年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, (22): 79-94.
- 佐藤興平・南 雅代・武者 巖・柴田 賢 (2019): 高崎の烏川に産する巨石「聖石」の起源. 群馬県立自然史博物館研究報告, (23): 49-56.
- 佐藤興平・南 雅代・柴田 賢・武者 巖 (2020a): 巨石のSr同位体比と埋没木片の¹⁴C年代からみた前橋泥流. 群馬県立自然史博物館研究報告, (24): 31-42.
- 佐藤興平・竹内 誠・李 雨嘯・南 雅代・柴田 賢 (2020b): 関東山地北西縁下仁田地域に産する南蛇井層: ジルコンのU-Pb年代による予察. 群馬県立自然史博物館研究報告, (24): 53-70.
- 佐藤興平・南 雅代・柴田 賢・武者 巖・池田信二 (2020c): Sr同位体比と¹⁴C年代から群馬県~長野県東部地域の火山体崩壊堆積物の起源と時代を探索. 地学雑誌, **129**, (6): N70.
- 佐藤興平・南 雅代・池田信二・安部 久・武者 巖・中村俊夫 (2021): 前橋の敷島公園に産する巨石「お艶ヶ岩」の起源. 群馬県立自然史博物館研究報告, (25): 65-74.
- 佐藤興平・南 雅代・武者 巖 (2022): 前橋泥流の流下域に残存する安山岩塊の比重とSr同位体比. 群馬県立自然史博物館研究報告, (26): 91-104.
- Shibata, K. and Ishihara, S. (1979): Initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios of plutonic rocks from Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**: 381-390.
- Takeo, M., Aoki, Y. and Koyama, T. (2022): Recent volcanic activity at the Asama volcano and long-period seismic signals. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, **98**: 416-438.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H. (2002): Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth Planet. Science Lett.*, **197**: 105-116.
- 内海 茂・中野 俊・宇都浩三 (1998): 20万分の1地質図幅「長野」地域の年代未詳岩石のK-Ar年代. 地調月報, **49**: 189-193.
- Ueno, H. and Shibata, K. (1986): Radiometric ages of quartz diorite bodies related to the Chichibu pyrometamorphic deposits and their relevance to the metallogenic epoch. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **81**: 73-78.
- 山下 昇 (1970): 柏崎一銚子線の提唱. 島弧と海洋, 東海大学出版会, 179-191.
- 山下 昇編著 (1995): フォッサマグナ, 東海大学出版会, 310pp.