

花崗岩系列の成立と展開 石原舜三博士の偉業を振り返って

高木 哲一¹⁾

1. はじめに

元工業技術院長の石原舜三博士が、令和2年3月2日に逝去されました。86年の生涯に心より敬意を表し、ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。石原博士は、工業技術院地質調査所、北海道大学、産総研地質調査総合センターにおいて、花崗岩研究および鉍床学の第一人者として生涯活躍されました。本稿では、石原博士の最も大きな業績である花崗岩系列の成立とその展開に焦点を絞り、その偉業を振り返ってみたいと思います。また、石原博士の遺志を引き継ぎ、我々が取り組むべき花崗岩系列に残された課題についても、少しく私見を述べたいと思います。

2. 石原舜三博士の経歴

石原博士は、昭和9年に広島県安芸郡府中町にお生まれになりました。昭和31年に広島大学理学部地学科をご卒業され、同年4月に通商産業省工業技術院地質調査所に入所されました。昭和36～38年には、大津秀夫博士の薦めにより米国コロンビア大学、コロラド鉍山大学に留学され、修士の学位を取得されました。その後、昭和45年に東京大学で博士の学位を取得されました。工業技術院では管理職としても活躍され、地質調査所鉍床部長(昭和60年)、東北工業技術試験所長(昭和62年)、地質調査所長(平成2年)、工業技術院長(平成4年)を歴任されました。工業技術院退官後は、北海道大学理学部教授(平成6～9年)を務められ、平成10年以降は地質調査所顧問、産業技術総合研究所特別顧問として研究に専念されました。平成17年には、瑞宝重光章を受章されました。

学会活動では、日本鉍山地質学会会長など数多くの役員を務められたほか、日本鉍山地質学会加藤武夫賞(昭和59年)、日本地質学会賞(平成元年)、日本岩石鉍物鉍床学会渡邊萬次郎賞(平成15年)などを受賞されました。また、海外学会においても、米国鉍床学会 Silver Medal(1989年)、同 Gold Medal(2009年)、オーストラリア科学アカ



写真1 在りし日の石原舜三博士。資源地質学会(2009)より。

デミー Haddon Forrester King Medal(2012年)を受賞し、中国地質科学院名誉フェロー、米国鉍床学会名誉フェロー、ロシア科学アカデミー在外会員の称号を授与されました。

3. 花崗岩系列の定義と特徴

(1) 花崗岩系列とは

花崗岩系列とは、花崗岩類に含まれる磁鉄鉍の量により、花崗岩類を磁鉄鉍系列とチタン鉄鉍(イルメナイト)系列に分類すること、または分類法のこと、1977年に石原博士により提唱されました(Ishihara, 1977)。定義としては、磁鉄鉍が0.1容量%以上含まれる花崗岩を磁鉄鉍系列に、それ未満の花崗岩をチタン鉄鉍系列に分類しますが、微量な鉍物のモード組成を正確に測定することは難しいので、実際には、磁鉄鉍量に比例する岩石の帯磁率(磁化率)で分類されており、 80×10^6 emu/gを境界値として用います。この値は、後に 100×10^6 emu/gに変更されて現在に至っています(Ishihara, 1990)。また、携帯用帯磁率計として普及しているチェコ製Kappameterを用いる際は、約 3.0×10^3 SI unitsが上記の境界値に相当します(上野、

1) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：花崗岩、磁鉄鉍、チタン鉄鉍、マグマ、酸素分圧、金属鉍床

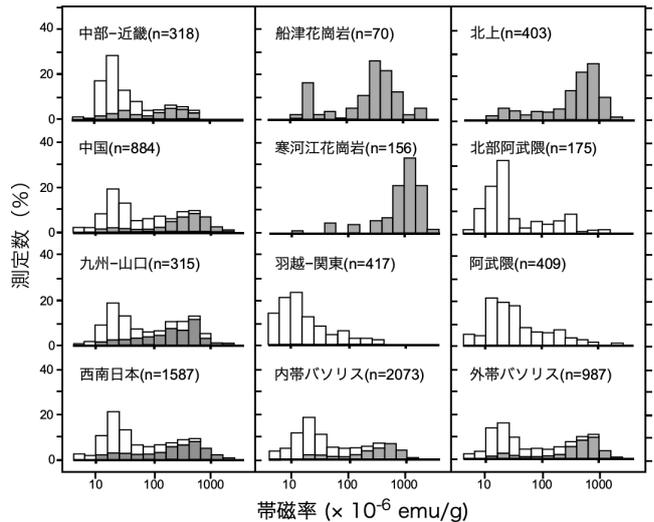
1987). したがって、磁鉄鉱系列／チタン鉄鉱系列花崗岩類は、帯磁率計により瞬時かつ明瞭に区分できる特徴があります。花崗岩系列について、その呼称から、磁鉄鉱またはチタン鉄鉱を特徴的に含有する花崗岩類の区分だと誤解する人が多いので、研究に用いる際には注意が必要です。

(2) 花崗岩系列の特徴

花崗岩類中の磁鉄鉱は、造岩鉱物としては微量にしか含まれませんが、花崗岩系列が岩石・鉱床学上で重要である理由は、主に以下の3点です。

両系列の広域的な帯状配列：磁鉄鉱系列／チタン鉄鉱系列花崗岩類は 100 km 単位で帯状配列を示します(第1図)。中国地方がその模式地となっており、領家帯と山陽帯はチタン鉄鉱系列、山陰帯は磁鉄鉱系列を主体とします。石原博士は、世界的視野で両系列花崗岩類を検討し、多くの国々にて両系列花崗岩類の帯状配列を見出しました。また、海外の花崗岩研究者も石原博士に倣って帯磁率データを広域的に測定し、両系列の帯状配列を明らかにしました(例えば、Bateman *et al.*, 1991 ; Gastil *et al.*, 1990)。

帯磁率が高低2群に分かれ中間値が少ない：第2図(Ishihara, 1990)に示すように、花崗岩類の帯磁率は地域毎に偏りがあり、全体として高低2群に分かれます。花崗岩系列は、帯磁率のランダムな分布の中に恣意的に線を引いたもので



第2図 日本列島における中期中生代-前期新生代花崗岩類の帯磁率ヒストグラム。白色:花崗岩, 灰色:花崗岩より苦鉄質岩。Ishihara (1990)に基づき、一部簡略化。

はなく、バイモーダルな分布の谷をもって区分しているところに、その本質的な意味があります。

随伴する金属鉱床の種類が異なる：第3図(Ishihara, 1984)に環太平洋地域の花崗岩系列と随伴金属鉱床の種類を示します。この図から明らかなように、磁鉄鉱系列には銅、亜鉛、モリブデンなどの硫化物鉱床が、チタン鉄鉱系列にはスズ、タングステンなど酸化物鉱床が伴われる明瞭な傾向があります。この傾向から、花崗岩系列に対応した特定の金属鉱床群は金属鉱床区(Metallogenic provinces)と呼ばれます。今日、花崗岩系列は、広域的な鉱床探査の重要な指標になっています。

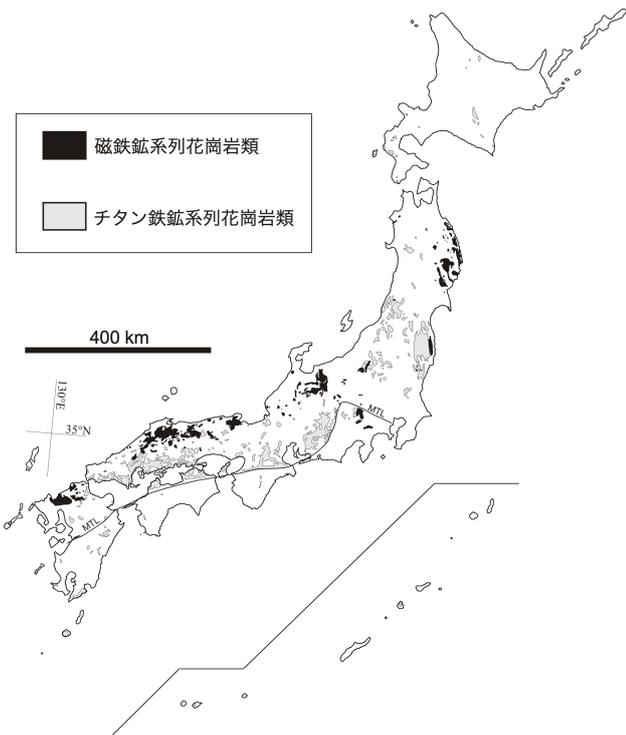
4. 花崗岩系列の成立過程

(1) 花崗岩系列の背景

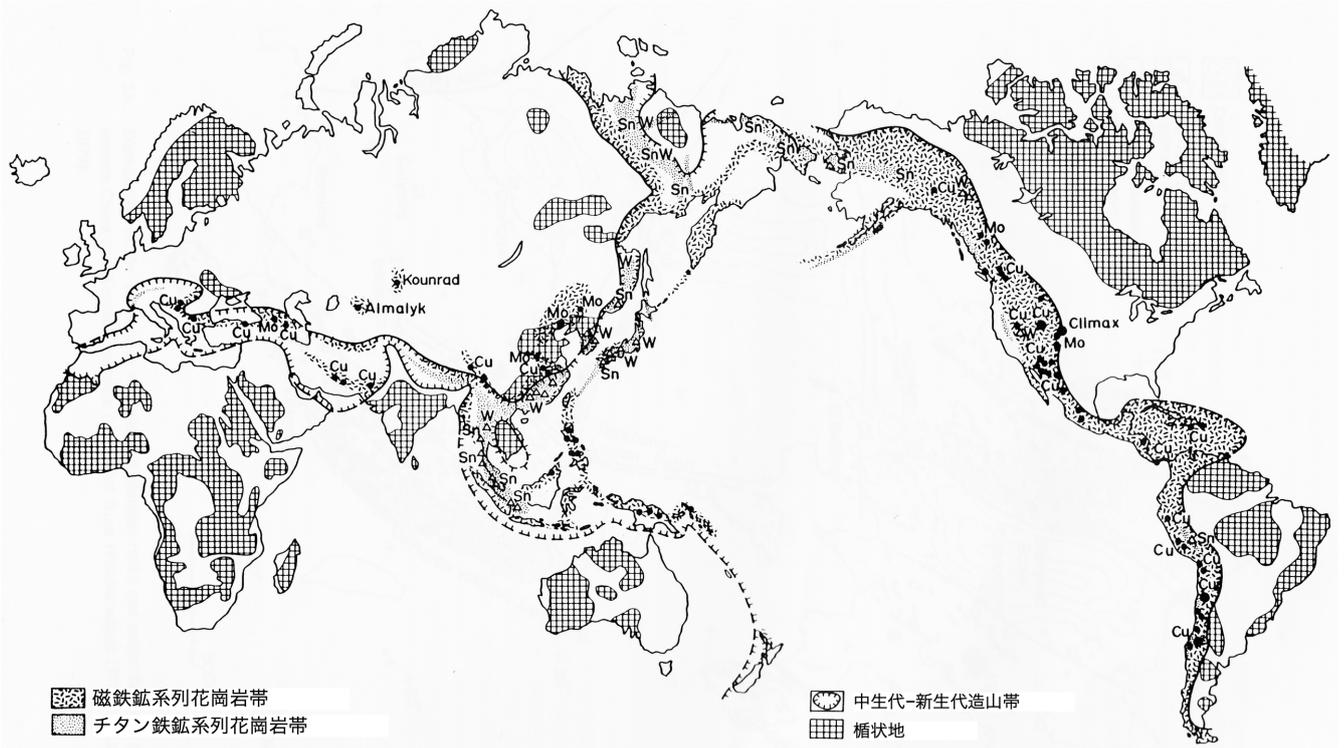
花崗岩系列が提案された背景は、岩石・鉱物学の主流的な理論や実験というよりも、石原博士がウラン調査やその後のモリブデン・タングステン鉱床の調査で得た実データと経験によるものでした。石原(1988)では、次のように書かれています。

“・・・その結果わかった重要な点は次の2点である。

- (i) 堆積岩を同化したような特異な岩石に伴うモリブデン鉱床としては、島根県大東地区のもののみである。鉱床はそれと無関係に糸静線から北九州まで内帯側にモリブデン、その外側にタングステンが並んで配列する。
- (ii) 深成型鉱床についてモリブデン鉱石量の98%は花崗岩ホストであり、タングステンは45%、スズは18%である。



第1図 日本列島における磁鉄鉱系列花崗岩類とチタン鉄鉱系列花崗岩類の分布。石原ほか(1992a, b)を基に作成。



第3図 中生代-新生代造山帯における磁鉄鉱系列・チタン鉄鉱系列花崗岩類の分布. Ishihara (1984) より引用. ●: 主要な斑岩銅・斑岩モリブデン鉱床, △: チタン鉄鉱系列花崗岩類に伴うスズ-タングステン鉱床, ▲: 磁鉄鉱系列花崗岩類に伴うタングステン鉱床. 旧ソビエト連邦の古生代斑岩銅鉱床(2ヶ所)も示した.

モリブデンのほとんどすべて、タングステンの半分が花崗岩中に胚胎することは、両帯の花崗岩の性質に違いがあることを示唆している。この点は、実は、わが恩師の著作の一つ、木野崎(1953)に中国地方のモリブデンとセリサイト鉱床を例に、山陰と山陽で明瞭な岩石区の違いがなければいけないと書かれていたのであるが、私はそれを実際に体得するまでに10年以上も必要とした。”

このように、花崗岩系列は、石原博士が体得した岩石・鉱床に対する知識と類い希なる感覚が基盤になっていたと言えます。また、石原博士が広島大学で指導を受けた木野崎吉郎教授の先行研究の影響についても、石原博士が度々語っておられたことを記憶しております。

(2) 花崗岩系列の構築

石原博士は、「日本の主要モリブデン鉱床および関連する花崗岩質岩類」(石原, 1971)を地質調査所報告にまとめられた1971年に、西南日本内帯花崗岩類においてモリブデン・タングステン鉱床区を提唱した最初の論文(Ishihara, 1971)を発表しました。この論文で山陰帯・山陽帯花崗岩類の間でFe³⁺/Fe²⁺比が異なり、山陰帯花崗岩類で系統的に高いことが示されました。さらに、岩石磁気の専門家である金谷 弘博士と共同で国内花崗岩類の

帯磁率を測定した結果をまとめた「日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化」(金谷・石原, 1973)が発表され、初めて花崗岩と帯磁率という花崗岩系列の基本事項が確立しました。帯磁率という物理量が岩石中の磁鉄鉱量に依存することは、当時の岩石学界で広く知られていることではなく、その値を正確に測定することも容易ではありませんでした。そのような状況で、一挙に1,200試料もの花崗岩の帯磁率を測定・コンパイルし、帯磁率の広域的变化を明らかにしたこの論文は、花崗岩系列の基礎を確立した研究と言っても過言ではありません。1974年には、熊本大学の津末昭生教授と共同で、山陰-白川帯、山陽-苗木帯、西南日本外帯の3帯の花崗岩類に含まれるFe-Ti酸化物の産状と化学組成を比較検討し、山陰-白川帯が他よりも酸化状態にあったことを鉱物学的に明らかにしました(津末・石原, 1974)。これらの結果を受けて、石原博士は地質調査所の寺島 滋博士と共同で、1977年初頭に、中部地方の白川・土岐・岡崎横断面における花崗岩類48試料の主・微量成分を分析し、両系列花崗岩マグマは起源物質が異なると考えました(Ishihara and Terashima, 1977)。当時の岩石分析法は、主成分は湿式法、微量成分も原子吸光法や吸光度法であり時間と手間がかかったと想像されます。また1976年、

東京大学の島崎英彦教授が、それまでの石原博士らの研究成果に基づき、磁鉄鉱系列はチタン鉄鉱系列に比べてマグマ中の酸素分圧が高く、その境界がNi-NiO 酸素バッファ付近であったことを鉱物学的に詳細に考察されました(島崎, 1976)。

(3) アメリカ学派との対決

石原博士は、花崗岩系列提唱の論文を1977年に発表した後、東京大学の立見辰雄教授の薦めで、アメリカ鉱床学会発行のEconomic Geology 75周年記念号に花崗岩系列を総括した66ページに及ぶ大論文(Ishihara, 1981)を発表しました。この背景は、石原(1988)に詳述されていますが、当時のアメリカでは、マグマの酸素分圧は、マグマ溜まりからの水素の拡散の度合いに支配されるという説が有力だったことにあります。すなわち、マグマに含まれる水のうち、拡散係数のより大きい水素が選択的に脱ガス(diffusive loss)することにより、マグマが酸化するという考えです。水素の拡散による脱ガスは、マグマ中の水が二次沸騰(母岩に裂かなどが生じて減圧し、水の一部が急激にガス化する現象)を起こしやすい浅所や細脈でより効果的に生じるとされ、したがって、マグマの酸素分圧は定置場の局所的な環境や条件に依存すると考えられていました。石原(1988)では、当時のアメリカ学派の雰囲気や、“私の提案も、花崗岩系列をなさずに、遠からず崩壊するものと思われていたのであろう。”と語っています。そこで、石原博士は前述の大論文をアメリカ学派の総本山であるEconomic Geology誌に掲載し、花崗岩系列がマグマの分類法であることを再度押し出した訳です。花崗岩系列の提唱を受けて、アメリカ学派の代表格である米国地質調査所のGerald Czamanske博士は、石原博士の協力を得て、花崗岩系列の模式地である中国地方に自ら乗り込み、詳細なサンプリング、岩石記載、鉱物分析を実施しました。ところが、同博士は花崗岩系列を完全にアメリカ学派流に解釈した39ページの大論文を、石原博士の大論文と同じ1981年にJournal of Geophysical Research誌に発表しました(Czamanske *et al.*, 1981)。この論文には次のような一節があります。“The fact that there are so few significant distinctions in mafic silicate chemistry between the two contrasting suites strongly suggests that there are no significant difference in the process of generation of magnetite and ilmenite series magmas.” 両系列のマグマの生成プロセスには大差がない、と断言するところは、さながら、花崗岩系列の全面否定という印象です。しかも、第二著者に石原博士を入れるという念の入れようでした

(共著の件は事後承諾であり不本意だったと後に石原博士は述べていました)。筆者は、1994年10月に北海道大学で開催されたThe Sapporo International Conference on “Mineral resources of the NW Pacific rim”(石原, 1994)に参加されたCzamanske博士に、水素の脱ガスによる酸化説について直接尋ねる機会がありましたが、同博士は米国Questa 鉱床を例に出して細脈であれば起こりうると、かなりトーンダウンしながらも自説を維持しておられました。後日、筆者と月村勝宏博士は、統計力学的な計算により、径10 kmのマグマ溜まりの底部と頂部でH₂の拡散によって生じる酸素分圧(logfO₂)の差がわずか0.07と無視できる程度であることを示し(Takagi and Tsukimura, 1997)、石原博士の学説の正しさを裏付けました。

1970年代、日本の科学はまだアメリカにはるかに及ばない時代であり、アメリカに追従する学者は多いけれども正面から対決する学者は非常に少ない時代でした。そのような状況下で、石原博士がアメリカ学派と同じ土俵で真っ向から対決した事実は、実に驚くべきことと思います。

5. 花崗岩系列の展開

1977年の花崗岩系列の提唱以降、花崗岩系列は同位体地球化学を中心とした展開の時代に入ります。まず、Ishihara (1979)では日本列島における帯磁率の横断面10ヶ所の変化から、花崗岩マグマと構造場の議論を展開しました。続いて、地質調査所の柴田賢、佐々木昭、松久幸敬各博士らとの共同研究によるストロンチウム同位体比の研究(Shibata and Ishihara, 1979)、硫黄同位体比の研究(Sasaki and Ishihara, 1979; Ishihara and Sasaki, 1989)、酸素同位体比の研究(石原・松久, 1975; Ishihara and Matsuhisa, 2002)を次々に発表し、磁鉄鉱系列・チタン鉄鉱系列の間でそれら同位体比が系統的に異なることを明らかにされました。また、花崗岩系列の調査対象を環太平洋地域にも広げ、チリ(Ishihara and Ulriksen, 1980)、韓国(Ishihara *et al.*, 1981; Jin *et al.*, 2001)を始め、アメリカ、中国、東南アジアなどの花崗岩類のデータを広くコンパイルし、1984年に2回目の総括を行いました(Ishihara, 1984)。さらに、寺島滋博士と共同で、日本の花崗岩類や堆積岩類の化学組成に関するデータを蓄積することにより(石原・寺島, 1977a, b; 寺島ほか, 1981; 寺島・石原, 1982, 1983, 1984など)、花崗岩系列をより強固なものとししました。

1980年代以降、花崗岩系列のコンセプトが国内の岩石学者にほぼ定着し、石原博士以外の研究者も続々と花崗岩

系列に関連する研究に参加するようになりました。特に模式地である中国地方では、山口、島根、岡山各大学を中心に多くの論文が発表されました(村上, 1985; 飯泉ほか, 1985 参照)。特に岡山大学温泉研究所(現惑星物質研究所)は、当時最新鋭の質量分析計を装備しており、安定同位体比や Rb-Sr 年代を用いて両系列花崗岩の複雑な実態を明らかにしました(例えば, Honma, 1983; Kagami *et al.*, 1988, 1992 など)。また、両系列が単一岩体内で複雑な分布を示す甲府岩体(佐藤・石原, 1983; Shimizu, 1985), 宮古岩体(Ishihara *et al.*, 1985), 鳳凰山岩体(中島ほか, 1984; Ishihara *et al.*, 1984), 沖山岩体(田結庄, 1985), 両系列花崗岩が隣接して分布する岡山県中部(Takagi, 1992), 阿武隈山地東縁部(久保ほか, 1994, 2002)などでも、詳細な研究が行われました。これら数多くの研究を通じて、花崗岩系列の成因は、1981年に Czamanske 博士が主張した学説では到底説明が困難であり、後述するように、花崗岩マグマの成因という地質学上の難問に正面から取り組まなければ解決できないほど、複雑であることが明らかになったと言えます。

6. 花崗岩系列の成因論

石原博士が、花崗岩系列の提唱時から一貫して主張してこられた成因論は、チタン鉄鉱系列花崗岩類は堆積岩類の影響が大きく、磁鉄鉱系列花崗岩類はそれが小さいということでした。一般に堆積岩類には強力な還元剤である有機炭素が多く含まれるため、マグマが堆積岩類を同化した場合、マグマの酸素分圧を大きく低下させ磁鉄鉱の晶出を妨げるからです。また、両系列の帯状配列の原因を広域的な応力場に求め、前弧側は一般に圧縮応力場であることからマグマが堆積岩類と効果的に反応したが、背弧側は引張応力場であり、マグマは断層や裂かに沿って堆積岩類とあまり反応せずに、沈み込み帯の酸化的な雰囲気を持続したまま上昇した、という基本的考えを生涯維持されました。石原博士は、その後、環太平洋地域北西部(マレーシア、中国、日本など)は、大陸縁辺部に厚い付加体が発達するためにチタン鉄鉱系花崗岩が卓越するのに対し、環太平洋地域東部(北米・南米)は大陸縁辺部が主に結晶質岩からなるため、磁鉄鉱系花崗岩が卓越するという説を展開されました(Ishihara, 1998)。この理論は佐藤興平博士に引き継がれ、より精緻化されていきました(Sato *et al.*, 2004; Sato, 2012)。

石原博士が中心となって1999年に米国カリフォルニア大パークレー校で開催された米国地質学会コルディラ部会における石原シンポジウム、そして2003年に豊

橋で開催された第5回ハットンシンポジウム(花崗岩に関する国際研究集会, 中島・石原, 2004)は、1980-90年代を通じて議論され発展した花崗岩系列を、世界の研究者が再評価する輝かしい舞台となりました。その成果は、Transactions of the Royal Society of Edinburghの特集号として2004年に刊行され、その中で石原博士は、“The redox states of granitoids relative to tectonic setting and earth history: the magnetite-ilmenite series 30 years later”という総括論文(Ishihara, 2004)を発表されました。石原博士は、その後も多数の論文を公表しておられますが、これが花崗岩系列の総括論文としては最後になります。日本の花崗岩研究は、石原博士の30年余にわたる花崗岩系列の研究に牽引され、機器分析法の発達とも相まって、この期間に飛躍的な進歩を遂げました(中島, 2018 参照)。日本の花崗岩研究史は、正に石原博士の足跡と重なっていたと言えるのではないかと思います。

7. 花崗岩系列に残された課題

(1) 磁鉄鉱の量は何が決めるのか

石原博士が花崗岩系列を提唱した当時、地質調査所内のゼミにてある研究者から、磁鉄鉱が1粒でもあれば何粒あろうと形成条件は同じではないか、という指摘があったと聞いています。確かに相律岩石学的にその指摘は正しく、時として花崗岩系列が理論的な分類法ではないという批判を受けた所以でもあります。また、Czamanske *et al.* (1981), Kawakatsu and Yamaguchi (1987), 山口 (1987)などが指摘しているように、多くの磁鉄鉱系列花崗岩類でマグマの結晶作用末期に累進的酸化(progressive oxidation)が生じる問題があります。マグマの酸化度がマグマ生成時の条件で決まり、マグマの冷却過程を通じて、鉄を含む造岩鉱物同士の反応によって酸素分圧がバッファーされているとすれば、累進的酸化は生じないはずですが、ところが、多くの磁鉄鉱系列花崗岩類は、磁鉄鉱の大半がマグマの結晶作用末期からサブソリダス期に累進的酸化によって形成されたこと示す組織を持っています。1970年代にアメリカ学派が主張した、水素の脱ガスによるマグマの酸化という学説も、この累進的酸化を説明するための苦肉のアイデアでした。さらに、チタン鉄鉱系列花崗岩類ではなぜ累進的酸化が生じることなく、磁鉄鉱がほとんどまたは全く晶出しないのか、という問題にも突き当たります。すなわち、花崗岩系列は磁鉄鉱の量によって定義されていますが、磁鉄鉱の量を定める要因が十分に解明されていないのです。この問題に対して、筆者と月村勝

宏博士は、マグマが冷却する過程で流体相中の SO_2 が酸化剤となって磁鉄鉱を晶出させることを熱力学的に示し、累進的酸化の説明を試みましたが (Takagi and Tsukimura, 1997), その検証はこれからです。

(2) 空間的要因なのか時間的要因なのか

石原博士の学説によれば、花崗岩系列を決めるマグマと堆積岩類との反応の程度は、応力場と地殻の構造に依存しており、大局的には花崗岩マグマが生成・上昇・定置した場所(空間)が要因になっていると言えます。しかし、模式地である中国地方では、磁鉄鉱系列が卓越する山陰帯にもチタン鉄鉱系列岩体が少なからず分布しており、それらの年代は山陽帯花崗岩類とほぼ同じです(柴田, 1979; 先山, 2005 など)。日本列島全体を見ても、後期白亜紀花崗岩類はチタン鉄鉱系列が卓越していますが、古第三紀花崗岩類になると磁鉄鉱系列の割合が明瞭に大きくなります (Takagi, 2004 参照)。これらの事実は、花崗岩系列を決める要因にマグマの活動時期(時間軸)も含まれることを示唆しています。花崗岩マグマが、主に下部地殻の部分溶融によって形成されるとすれば空間的要因が主体となりますが、時間的要因が含まれるとすれば沈み込み堆積物やスラブなど動的な物質の影響を考慮せざるを得ないこととなります。この問題を解決するには、花崗岩マグマの形成プロセス自体を解明しなければなりません。

(3) 堆積岩とどのように反応するのか

前述のように、チタン鉄鉱系列花崗岩類の主な形成要因がマグマと堆積岩類との反応にあることは、各種微量成分や同位体の特徴により明らかにされてきました。しかし、チタン鉄鉱系列花崗岩類の典型の1つである山陽帯花崗岩類(広島花崗岩)に堆積岩起源の包有物はほとんど含まれず、数 10 km から 100 km の単位でほぼ均質な岩相が広がっています(高橋, 1993; 友成, 1976; 濡木ほか, 1979 など)。また組成的には全て I-type (火成岩起源) です (Takahashi *et al.*, 1980)。厚さ 30 km 程度の地殻内で、花崗岩マグマが堆積岩類とどのように反応すれば、上記のような特徴を実現することができるのか、あるいは地殻内の堆積岩よりも沈み込み堆積物がより大きく関与しているのか、など未解決の難問が残されています。

8. おわりに

石原博士の偉業を振り返ってみると、花崗岩系列の成立と展開は、石原博士の馬力と情熱がなければ到底成し得な

かったことと思います。火山岩や変成岩は、岩石・鉱物学の理論が通用する比較的筋の良い研究対象です。ところが花崗岩は、マグマの組成を維持しているとは言えず、化学的に非平衡な鉱物が共存しており、鉱物組み合わせが単純で研究の手掛かりが少なく、理論や実験が適用しにくい難物です。1970年代までに国内の多くの岩石学者が花崗岩研究から離れて行ったのはこのためです。そのような難物に、石原博士は、鉱床学という応用研究から切り込み、花崗岩系列を見出し、花崗岩成因論で世界の研究者と渡り合うという、人並み外れた業績を残しました。

石原(1988)に、石原博士のルーツとも言うべき島根県モリブデン鉱山の稼行時の写真が掲載されています。そのキャプションに、“煙を吹き上げて生産を懸命にのびした激しい時代であった。”と書かれていますが、この言葉がそのまま石原博士の人生にも当てはまるような気がします。今、我々の前には石原博士が解明途上であった花崗岩系列の課題が残っていますが、それらを1つ1つ熱意を持って明らかにしていくことが、遺志を受け継いだ者の使命であると感じています。

謝辞: 本稿の執筆を快くご了承くださった石原 淳様を始めとするご遺族の皆様に深く御礼申し上げます。また、本稿の執筆を薦めて下さった矢野雄策地質調査総合センター長、光畑裕司地圏資源環境研究部門長、図・写真の引用を許可して下さった東京大学総合研究博物館および資源地質学会にも感謝申し上げます。

文 献

- Bateman, P.C., Dodge, F.C.W. and Kistler, R.W. (1991) Magnetic susceptibility and relation to initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for granitoids of the central Sierra Nevada, California. *Journal of Geophysical Research*, **96**, B12, 19555–19568.
- Czamanske, G.K., Ishihara, S. and Atkin, S.A. (1981) Chemistry of rock-forming minerals of the Cretaceous-Paleocene batholith in southwestern Japan and implications for magma genesis. *Journal of Geophysical Research*, **86**, B11, 10431–10469.
- Gastil, G., Diamond, J., Knaack, C., Walawender, M., Marshall, M., Boyles, C. and Chadwick, B. (1990) The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California, California. *Geological Society of America Memoir*, **174**, 19–32.

- Honma, H. (1983) Oxygen isotope and some other geochemical evidence for the origin of two contrasting types of granitic rocks of Japan. *Geological Society of America Memoir*, **159**, 141-147.
- 飯泉 滋・沢田順弘・先山 徹・今岡照喜 (1985) 中国・四国地方の白亜紀～古第三紀火成活動—火成岩類の対比を中心として—。地球科学, **39**, 372-384.
- 石原舜三 (1971) 日本の主要モリブデン鉱床および関連する花崗岩質岩類。地質調査所報告, no. 239, 178p.
- Ishihara, S. (1971) Modal and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner zone of Southwest Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **77**, 441-452.
- Ishihara, S. (1977) The magnetite- and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, **28**, 293-305.
- Ishihara, S. (1979) Lateral variation of magnetic susceptibility of the Japanese granitoids. *Journal of the Geological Society of Japan*, **85**, 509-523.
- Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, 418-484.
- Ishihara, S. (1984) Granitoid series and Mo/W-Sn mineralization in East Asia. *Geological Survey of Japan Report*, no. 263, 173-208.
- 石原舜三 (1988) 花崗岩系列が成立するまで。地質学雑誌, **94**, 1005-1011.
- Ishihara, S. (1990) The inner zone batholith vs. the outer zone batholith of Japan: Evaluation from their magnetic susceptibilities. University Museum, the University of Tokyo, *Nature and Culture*, **2**, 21-34.
- 石原舜三 (1994) 『北西太平洋周辺域の鉱物資源』札幌国際集会の報告。資源地質, **44**, 447-449.
- Ishihara, S. (1998) Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts. *Resource Geology*, **48**, 219-224.
- Ishihara, S. (2004) The redox state of granitoids relative to tectonic setting and earth history: The magnetite-ilmenite series 30 years later. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **95**, 23-33.
- 石原舜三・松久幸敬 (1975) 中国底盤の形成過程における地表水混入の問題について。地質学雑誌, **81**, 365-371.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y. (2002) Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Cretaceous-Paleogene granitoids in the Inner Zone of Southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **53**, 421-438.
- Ishihara, S. and Sasaki, A. (1989) Sulfur isotopic ratios of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids of the Sierra Nevada batholith -A reconnaissance study. *Geology*, **17**, 788-791.
- 石原舜三・寺島 滋 (1977a) ベースメタル・スズ鉱床探査指標としての花崗岩類中の塩素・弗素含有量。鉱山地質, **27**, 191-199.
- 石原舜三・寺島 滋 (1977b) 日本の花崗岩類の Sn 含有量と白亜紀花崗岩活動におけるその意義。地質学雑誌, **83**, 657-664.
- Ishihara, S. and Terashima, S. (1977) Chemical variation of the Cretaceous granitoids across southwestern Japan -Shirakawa-Toki-Okazaki Transection-. *Journal of the Geological Society of Japan*, **83**, 1-18.
- Ishihara, S. and Ulriksen, C.E. (1980) The magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Chile. *Mining Geology*, **30**, 183-190.
- Ishihara, S., Lee, D.S. and Kim, S.Y. (1981) Comparative study of Mesozoic granitoids and related W-Mo mineralization in southern Korea and southwestern Japan. *Mining Geology*, **31**, 311-320.
- Ishihara, S., Sato, K., and Terashima, S. (1984) Chemical characteristics and genesis of mineralized, intermediate-series granitic pluton in the Hobenzan area, western Japan. *Mining Geology*, **34**, 401-418.
- Ishihara, S., Matsuhisa, Y., Sasaki, A. and Terashima, S. (1985) Wall rock assimilation by magnetite-series granitoid at the Miyako pluton, Kitakami, northeastern Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **91**, 679-690.
- 石原舜三・佐々木昭・佐藤興平 (1992a) 日本鉱床生成図 深成岩活動と鉱化作用 (2): 白亜紀—第三紀, 1:2,000,000 地質編集図 15-2, 地質調査所。
- 石原舜三・佐々木昭・佐藤興平 (1992b) 日本鉱床生成図 深成岩活動と鉱化作用 (3): 第三紀—第四紀, 1:2,000,000 地質編集図 15-3, 地質調査所。
- Jin, M-S., Lee, Y.S., and Ishihara, S. (2001) Granitoid and their magnetic susceptibility in South Korea. *Resource Geology*, **51**, 189-203.

- Kagami, H., Honma, H., Shirahase, T. and Nureki, T. (1988) Rb-Sr whole rock isochron ages of granites from northern Shikoku and Okayama, Southwest Japan: Implications for the migration of the Late Cretaceous to Paleogene igneous activity in space and time. *Geochemical Journal*, **22**, 69-79.
- Kagami, H., Iizumi, S., Tainosho, Y. and Owada, M. (1992) Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks, Southwest Japan Arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **112**, 165-177.
- 金谷 弘・石原舜三 (1973) 日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化. 岩石鉱物鉱床学会誌, **68**, 211-224.
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987) Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 535-540.
- 木野崎吉郎 (1953) 中国地方の花崗岩とタングステン及びモリブデン鉱床について (概報). 広島大学地学研究報告, **3**, 61-75.
- 久保和也・柳沢幸夫・吉岡敏和・高橋 浩 (1994) 浪江及び磐城富岡地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅), 141p, 産総研地質調査総合センター.
- 久保和也・柳沢幸夫・利光誠一・坂野靖行・兼子尚知・吉岡敏和・高木哲一 (2002) 川前及び井出地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅), 136p, 産総研地質調査総合センター.
- 村上允英 (1985) 中国地方西部における中生代後期～古第三紀火成活動史. 地質学雑誌, **91**, 723-742.
- 中島 隆 (2018) 日本の花崗岩: 2017 年における総括. 地質学雑誌, **124**, 603-625.
- 中島 隆・石原舜三 (2004) 第5回ハットンシンポジウム: (3) 日本招致から大会終了まで. 地質ニュース, no. 593, 36-48.
- 中島和夫・今岡照喜・村上允英 (1984) 山口県鳳凰山花崗岩体の岩石記載・全岩化学組成及び帯磁率. 岩石鉱物鉱床学会誌, **79**, 370-386.
- 濡木輝一・浅見正雄・光野千春 (1979) 岡山県中・南部の花崗岩類. 地質学論集, **17**, 35-46.
- 先山 徹 (2005) 近畿地方西部～中国地方東部における白亜紀～古第三紀火成岩類の帯磁率一帯状配列の検討と歴史学への適用一. 人と自然, **15**, 9-28.
- Sasaki, A. and Ishihara, S. (1979) Sulfur isotope composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **68**, 107-115.
- Sato, K. (2012) Sedimentary crust and metallogeny of granitoid affinity: Implications from the geotectonic histories of the circum-Japan sea region, central Andes and southeastern Australia. *Resource Geology*, **62**, 329-351.
- 佐藤興平・石原舜三 (1983) 甲府花崗岩体の帯磁率と化学組成. 地質調査所月報, **34**, 413-427.
- Sato, K., Kovalenko, S. V., Romanovsky, N. P., Nedachi, M., Berdnikov, N. V. and Ishihara, T. (2004) Crustal control on the redox state of granitoid magmas: tectonic implications from the granitoid and metallogenic provinces in the circum-Japan Sea region. *Transaction of Royal Society Edinburgh, Earth Science*, **95**, 319-337.
- 柴田 賢 (1979) 東中国における花崗岩類の K-Ar 年代. 地質学論集, **17**, 69-72.
- Shibata, K. and Ishihara, S. (1979) Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic rocks from Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **70**, 381-390.
- 資源地質学会 (2009) 石原舜三 花コウ岩巡検 中国地方の酸化/還元型花コウ岩 (DVD), 資源地質学会.
- 島崎英彦 (1976) 花崗岩質マグマと鉱床 (2) マグマの酸化度と鉱床. 鉱山地質特別号, **7**, 25-35.
- Shimizu, M. (1985) Mineralogical characteristics of the Tokuya batholith composed of magnetite-series and ilmenite-series granitoids, Yamanashi Prefecture, central Japan. *MAGMA*, **73**, 139-152.
- 田結庄良昭 (1985) 鳥取県東部智頭町, 沖山累帯深成岩体の地質および岩石. 岩石鉱物鉱床学会誌, **80**, 337-351.
- Takagi, T. (1992) Mineral equilibria and crystallization conditions of Ukan Granodiorite (ilmenite-series) and Kayo Granite (magnetite-series), San'yo Belt, Southwest Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **98**, 101-124.
- Takagi, T. (2004) Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan Arc. *American Journal of Science*, **304**, 169-202.
- Takagi, T. and Tsukimura, K. (1997) Genesis of oxidized- and reduced-type granites. *Economic Geology*, **92**,

- 81-86.
- Takahashi, M., Aramaki, S. and Ishihara, S. (1980) Magnetite-series/Ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids. *Mining Geology, Special Issue*, **8**, 13-28.
- 高橋裕平 (1993) 広島花崗岩—巨大な垂直方向累帯深成岩体. *岩鉱*, **88**, 20-27.
- 寺島 滋・石原舜三 (1982) 明延鉱床地域周辺の白亜紀花崗岩類における錫存在量. *鉱山地質*, **32**, 73-36.
- 寺島 滋・石原舜三 (1983) 日本の花崗岩類中の銅, 鉛, 亜鉛, ヒ素と硫黄— (1) 北上山地と阿武隈高地—. *地質調査所月報*, **34**, 443-453.
- 寺島 滋・石原舜三 (1984) 日本の花崗岩類中の銅, 鉛, 亜鉛, ヒ素と硫黄— (2) 西南日本内帯—. *地質調査所月報*, **35**, 127-145.
- 寺島 滋・稲積章生・石原舜三 (1981) 中国・四国地方の泥質岩中の炭素と硫黄. *地質調査所月報*, **32**, 167-181.
- 友成 才 (1976) 広島県東南部における万成型花崗岩と流紋岩類の岩石学的特徴とその相互関係. *岩石鉱物鉱床学会誌*, **71**, 37-43.
- 津末昭生・石原舜三 (1974) 西南日本における花崗岩質岩石中の Fe-Ti 酸化鉱物. *鉱山地質*, **24**, 13-30.
- 上野宏共 (1987) 岩石の磁氣的諸量の国際単位系 (SI) と CGS 系間の換算. *岩石鉱物鉱床学会誌*, **82**, 441-444.
- 山口佳昭 (1987) 粒間マグマ残液の固結と酸化—高山貫入岩体の磁鉄鉱—. *MAGMA*, **80**, 22-25.
-
- TAKAGI Tetsuichi (2020) Establishment and development of the magnetite-and ilmenite-series granitic rocks: A tribute to the great achievement of Dr. Shunso Ishihara.
-

(受付: 2020年9月8日)