

花崗岩系列の提唱と地球史におけるその意義

石原 舜三*

(地質調査所)

要旨

花崗岩系列とは、地球上に存在する花崗岩類が、微量鉱物である磁鉄鉱の有無、すなわちそのマグマ固結時の酸素 fugacity の高低によって、磁鉄鉱系列およびチタン鉄鉱系列に分けられることの提案である。花崗岩類には重要な金属鉱物資源が伴われるが、その探査に最も基本的な指標を与えるものである。前者は Ag, Pb, Zn, Cu, Mo など硫化物を形成する金属鉱物資源を伴い、後者は Sn, W, Li など、酸化鉱物、珪酸塩鉱物として産出する資源を伴う特色を有する。最初の発表は Ishihara (1971)、地質学雑誌であり、その後の総括的な発表は Ishihara (1977), (1981)、Ishihara et al. (2008) などである。

1. 入所から米国留学まで

筆者は 1956 年 3 月に広島大学理学部を卒業し、在学中の公務員試験と面接によって通商産業省工業技術院地質調査所に採用され、4 月に入所した。この年から日本のウラン探査が政府によって大規模に実施され、そのために、この年 4 月の地質専攻採用者は 2 名とも鉱床学専攻者が選ばれた。筆者らは、新宿区河田町の核原料資源課に配属され、ガイガー・シンチレーションカウンターと共に、当時ウランが出ることで我が国では定説であった花崗岩地域を全国的に飛び回った。3 年を経てこの日常業務に研究者としての疑問を感じ、アメリカ合衆国留学を目指したが、日本政府奨学金には年齢順序があって応募年齢（30 歳台の後半）に達しておらず、したがってアメリカ側の奨学金を探索した。

アメリカのウラン鉱床はコロラド高原にあり、堆積岩（陸成層）に含まれた新しいタイプである。その関連で地元の大学応募先を探したが、ソールトレイク市にあるユタ州立大学からは外国人への奨学金は無い旨の断り状が、コロラド鉱山大学（州立）と熱心なウラン鉱床研究者(Prof. P. F. Car) がいたニューヨークのコロンビア大学（私立）からは修士課程応募の許しが出た。応募書類は、まず日本の大学の 4 年間の成績である。筆者は教職課程を取り、かつ好奇心から語学は英語・独語のほか、仏語・中国語も取っていたから、成績が悪かったであろうが、全ての成績が広島大学からアメリカ側に提出された。

東京では、成増高校で在日米国子弟用の Aptitude test を受けた。これは内容的には日本の高校レベルであり、各設問の 5 回答から正解を探すのであるが、問題数が多い上に回答文が長いにかかわらず 1 題当たり 3 分の時間しかなく、筆者の読解力では半分も解答できなかった。英会話試験は成増高校またはアメリカ大使館が指定され、日本側の機関は含ま

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

れていなかった。筆者は四谷の日米会話学院の夜学（週5日）に川崎市の溝口から6ヶ月通学して英会話試験を合格することが出来た。

奨学金の申し込み結果は秋に公表され、コロラド鉱山大学からは、授業料と生活費が出せる満額の2,200ドル、コロンビア大学からは、半分は自分が負担しなければならない、Half scholarship, 1,500ドルを与える旨の通知が来た。当時の持ち出し額は、合法的には年間200ドルまでであったから、筆者はコロラド鉱山大学へ入学した。

2. アメリカの大学生活、特にサマージョブ

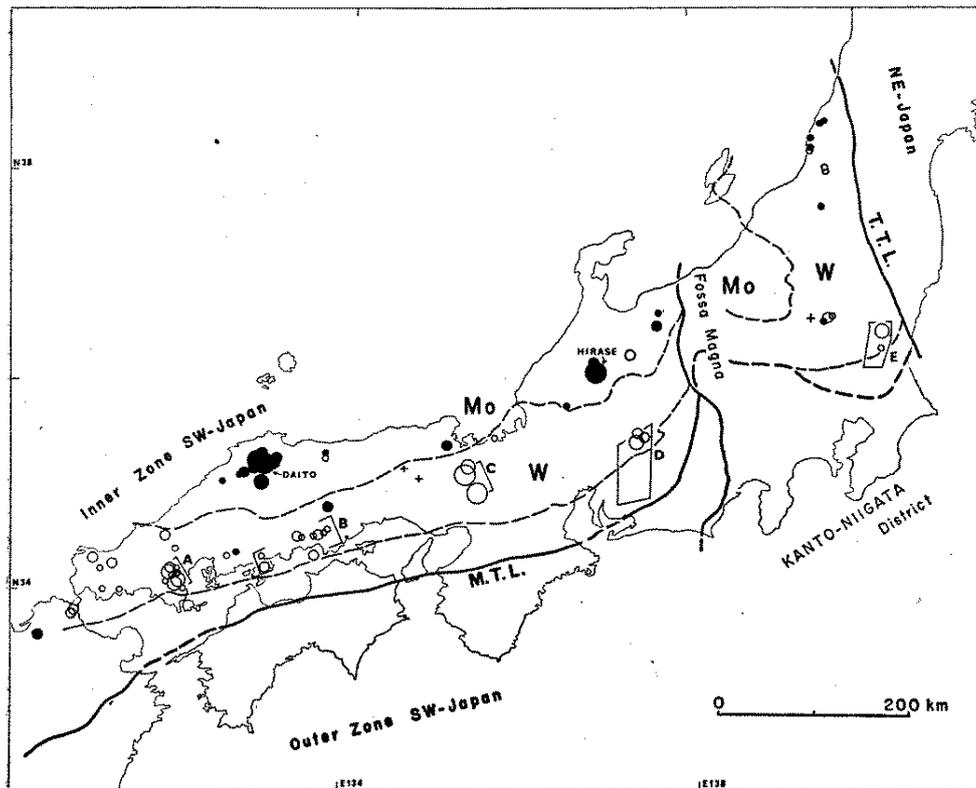
コロラド鉱山大学の学生は4年終了時に、172単位を取っており、これは一般大学の理工系卒業生より30単位多く、大学院大学として自負していた。したがって、授業は少なく自主研究が多かった。筆者は全分野をカバーする時代に即した大学院授業を希望したから転校を考え、そこで秋になるとコロンビア大学の奨学金に再度応募する許可を、指導教官のProf. R. H. Carpenterに願い出て了解された。この再応募では年額3,000ドルの奨学金を得て、コロンビア大学の修士課程に挑戦し、新たに30単位の科目に合格し、修士論文を残して修士課程を卒業した。我が人生で最も勉強した時期であった（Ishihara, 2013）。

ふた夏休みのサマージョブは教授がコンサルタントをしていたNew Mexico州のQuesta鉱山で働いた。その鉱山はロッキー山脈の南方延長である山岳地帯にあり、夏でも涼しく快適な山歩きが出来た。初年度は一人で広域的な地質図作りを行い、山中でコヨーテの鳴き声を聞いたときは、ハンマーを持ちかえて緊張した。第2年目は開発に向けて6人の米人学生を付けてくれたので、3班に分けて鉱床周辺の精密地質図のルートマップ作成を命じて毎朝ジープで担当地域に送り出し、午後は別の大学2年生を助手として鉱体内ボーリングコアの観察・記録、そして品位分析用のサンプリング（コアの半分を10フィート間隔で粉末化）を行った。分析結果は二日後には届けられ、肉眼鑑定品位分析の成果が試される。この定量化の経験が帰国後の最初の研究に生きることになる。

3. 鉱床生成区の定量的表現

帰国後、最初に試みた仕事は、日本のモリブデン鉱床の定量的評価とそれに基づく鉱床生成区図の作成である。1950年代に出版されていた地質調査所の既存図は鉱床を定性的にしか表示していなかった。その為に過去の生産量、残存鉱量を探し出し、各鉱床の定量的表現を試みた。その結果、山陽地方とその延長部のモリブデン鉱床は規模が小さく、一方、山陰帯のモリブデン鉱床は中部地方北部でも、ポーフィリー型を含めて優勢であり、西南日本内帯の花崗岩地帯は、量的には南部のタングステン鉱化地帯、および北部のモリブデン鉱化地帯に分帯できることを明らかにした（第1図）。

また、日本のモリブデン鉱床は全鉱石量の100%近くが、タングステン鉱床は50%以上が花崗岩類中に胚胎していることが判明した。これを成因的関点から捉えると花崗岩の性



第1図 西南日本内帯のモリブデン・タングステン鉱床の定量的表示(Ishihara, 1971 原図)。
 ●はモリブデン鉱床、○はタングステン鉱床、共に大きさは鉱床の規模を表す。
 Aは山口県東部、Bは広島県東部・岡山県南部、Cは京都府下、Dは岐阜県苗木地
 域、Eは茨城県高取近傍の鉱床群。

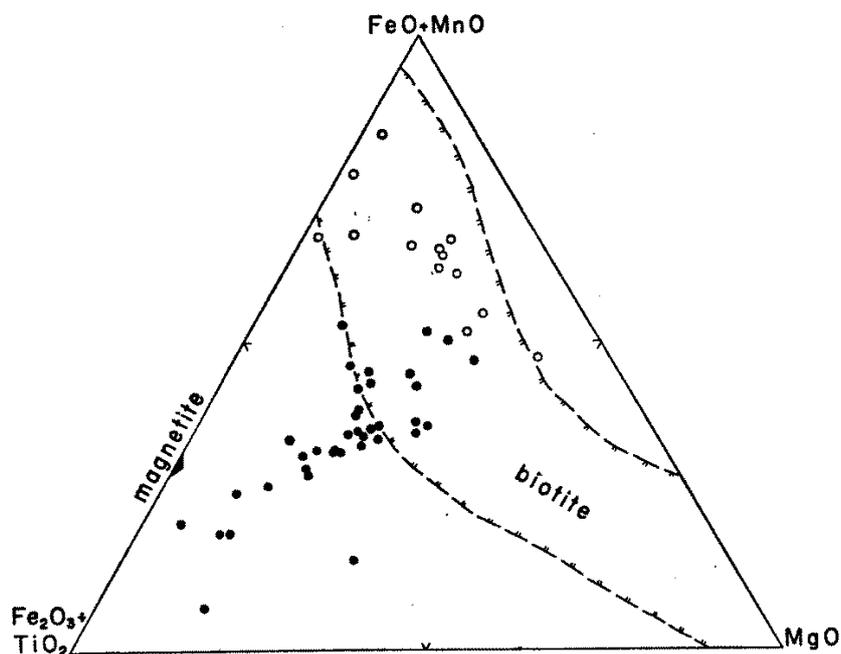
質は両者で異なることが予想されるが、年代論に基づく当時の岩石学者の分類では、山陽帯、山陰帯共に新期の同時期のバソリス形成期の産物と見なされていた。そこで筆者は手持ち試料がないタングステン鉱床生成区の花崗岩類を観察し、サンプリングをすべく22日間の旅費を当時の企画課長に申し出た。それは“面白そうだ”と判定され、昼間は花崗岩の観察とサンプリング、夜はドライビングで移動する調査を山口県東部から京都、中山道の苗木地区まで行った。

4. 花崗岩類の不透明鉱物量：花崗岩系列の提唱

採取試料についてモード分析の結果、タングステン鉱床地域の花崗岩類は不透明鉱物に乏しく、色指数が低いことが判明した(Ishihara, 1971)。既存のモリブデン鉱化地域の結果(石原, 1971)と比較すると、タングステン鉱化地域では微量の不透明鉱物が少なく、全岩化学成分の FeO/Fe_2O_3 比が高い(第2図)。これらの事実は花崗岩中の微量の磁鉄鉱量に大きな差があり、モリブデン鉱化域では磁鉄鉱が多く含まれ、タングステン鉱化域では磁鉄鉱が皆無であることを示している。磁鉄鉱の遍在性については、実は山陰地方の農家の人

は江戸時代の山砂鉄の採掘で気づいていたのであるが、明治時代以降のプロの地質家が重視しなかった。

FeO/Fe₂O₃比が異なる性質は花崗岩類の全シリカ含有量に対して成立する(第2図)。すなわち、モリブデン帯の花崗岩類はマグマ活動の初期から酸化的であって磁鉄鉱を晶出せしめ、タングステン帯の花崗岩質マグマは還元的で鉄酸化物を伴わなかった。したがって、この2者は新しい花崗岩系列、磁鉄鉱系およびチタン鉄鉱系、として提唱され、1975年、バンクーバーにおける太平洋学術会議で口頭発表され、1977年に論文化された(Ishihara, 1977)。



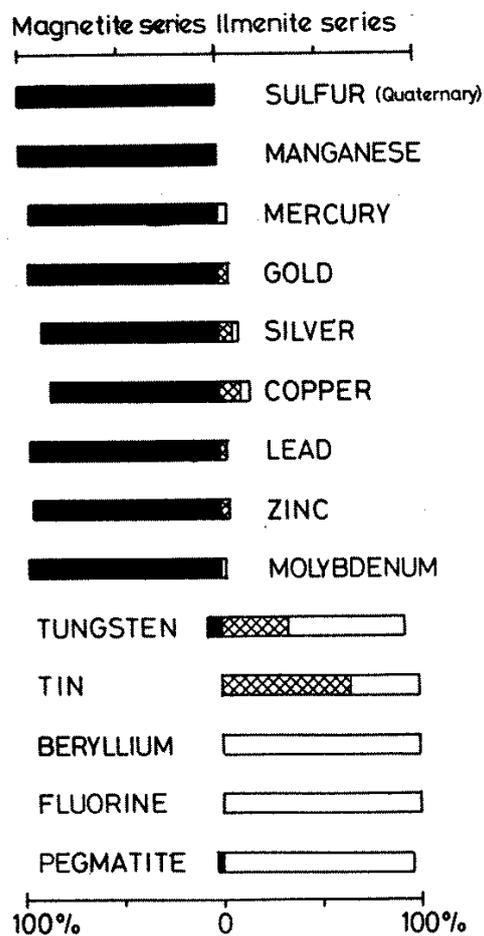
第2図 全岩化学分析値に見られる磁鉄鉱系(●)とチタン鉄鉱系(○)花崗岩類(Ishihara, 1981)を簡略化)。チタン鉄鉱系は黒雲母(biotite)領域に、磁鉄鉱系はそれから磁鉄鉱(magnetite)・赤鉄鉱へ向けての領域にプロットされる。

この提案は数多くの学会で評価され、日本鉱山地質学会加藤武夫賞(1978年)、日本地質学会賞(1988年)、Economic Geology学会のSilver Medal(1989年)、日本岩石鉱床鉱物学会の渡辺万次郎賞(2003年)などを受賞した。Mo, Cu, Pb, Zn, Agなど、硫化物として産出する重要な金属鉱物資源は磁鉄鉱系に伴われるから(第3図)、鉱床探査における帯磁率の測定は重要な第1歩で、かつ必須事項であり、かつては広域磁力調査、現在では空中磁気測定がまず鉱床探査に先立って実施される。

一方、チタン鉄鉱系花崗岩類に伴われる金属鉱物資源は、Sn, W, Liなど、酸化物あるいはケイ酸塩鉱物として産出するものである。我が国における関係火成岩に対する鉱石産出比率は第3図のように示される。

5. 花崗岩系列の成因

花崗岩系列はどのようにして生まれるのであろうか？日本の花崗岩類は最大の露出面積を持つ西南日本内帯で、全岩酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) によって2分され、磁鉄鉱系が8%より小さく、チタン鉄鉱系が8%により大きい傾向を示す。後者は中央構造線を少し北へ離れた領家変成帯中心部の花崗岩類で最も高い値を示す。この事実は、前者が主に苦鉄質マグマ起源、後者は主として堆積岩類を含む地殻物質起源と考えられた(Ishihara and Matsuhisa, 2002)。地殻物質では、 $\delta^{18}\text{O}$ はチャートで最も高く、次いで頁岩、砂岩の順に低くなり、前2者では常に花崗岩類の値より大きい。酸素同位体比は北方へ漸減する。また Sr 初生値も磁鉄鉱系で低く、チタン鉄鉱系で高い。



第3図 我が国の花崗岩系列ごとの鉱石生成量。■は磁鉄鉱 (Magnetite)系花崗岩帯の鉱床、□はチタン鉄鉱 (Ilmenite)系花崗岩帯の鉱床、チタン鉄鉱系の斜線部はゼノサーマル型鉱床産 (Ishihara, 1981 原図)。

これらを総合的に判断すると、チタン鉄鉱系花崗岩質マグマには古い地質時代の堆積岩類の寄与が大きく考えられる。堆積岩類には炭質物が特に頁岩類に含まれている可能性が大きく、それがマグマに含まれることにより、還元的な花崗岩質マグマが生じるものと思われる。一方、磁鉄鉱系花崗岩質マグマは沈み込んだ海洋底地殻あるいは大陸地殻中のその化石地殻の部分溶融によって生成したものと考えられる。

6. 地球史における花崗岩系列

地球上の酸化・還元状態については2説が対立している。すなわち (1) 古い先カンブリア時代(Archean)の海は還元的であり、24 億年頃何らかの原因で酸化的となり海水に溶けていた鉄が縞状鉄鉱層として沈殿し、現在に至っているとする説、(2) Archean の海と言えどもその後と大きくは変わらず、その証拠に鉄酸化物層も小規模であるが海底堆積物に含まれている。

磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系花崗岩類の観点からこの課題に挑戦すべく、南アフリカのバーバトン先カンブリア地塊で調査を行った。ここでは最も古いTTG (トロニウム岩-トナル岩-花崗閃緑岩) は主としてチタン鉄鉱系であり、30 億年前の花崗岩から磁鉄鉱系が存在する (Ishihara et al., 2006)。文献によればより古いグリーンランドのTTGは全分析値から見てチタン鉄鉱系であり、地球上最古期の花崗岩類は還元型と思われる。

この地球最初期の磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系花崗岩類を含む研究に対して、オーストラリア科学アカデミーから、Haddon Forrester King medal が授与された (2012 年)。

文 献

- 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. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 77, p. 441-452.
- 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. 地調報告, No. 239, 189 p.
- Ishihara, S. (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.* v. 27, p.393-305.
- Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol.* 75th Anniversary Volume 1981, 458-484.
- 石原舜三(2013) Geologist 物語: 想い起こすことなど. *日本地質学会ニュース*, v. 13, no. 8, p.5-6.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y. (1982) Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Cretaceous-Paleogene granitoids in the Inner Zone of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v. 53, 421-438.
- Ishihara, S., Ohmoto, H., Anhaeusser, C. R., Imai, A. and Robb, L. J. (2006) Discovery of the oldest oxidic granitoids in the Kaapvaal Craton and its implications for the redox evolution of early Earth. *Geol. Soc. America, Mem.* 198, 67-80.

著者略歴

(職歴)

- 1934 広島市生まれ
- 1956 広島大学理学部地質学鉱物学卒
- 1956 通商産業省工業技術院地質調査所入所。ウラン探査プロジェクト担当
- 1963 コロンビア大学修士取得
M. Sc : Questa molybdenum deposits in U.S.A.
- 1970 東京大学理学博士取得
Ph. D. : Molybdenum deposits in Japan
- 1985 地質調査所鉱床部長
- 1989 地質調査所長
- 1991 工業技術院長
- 1993 北海道大学理学部教授
- 1997 同退官
- 2001 独立行政法人産業技術総合研究所特別顧問

(受賞等)

- 1968 日本鉱山地質学会優秀論文賞
- 1978 第5回国際鉱床成因研究学会(Snowbird, Utah)優秀講演賞
- 1984 日本鉱山地質学会加藤武夫賞
- 1988 日本地質学会賞
- 1989 Economic Geology 学会 Silver Medal 賞
- 1999 アメリカ合衆国地質学会名誉会員
- 2003 Russian Academy of Science 海外名誉会員
- 2003 日本岩石鉱物学会渡辺萬次郎賞
- 2005 瑞宝重光章
- 2009 SGA (Society for Geology Applied to Mineral Deposit) Gold Medal 賞
- 2010 日本地質学会名誉会員
- 2011 資源地質学会名誉会員
- 2012 Haddon Forrester King Medal by Australian Science Academy

(出版物)

- (1) 300 件を超える原著論文
- (2) 5 冊の英文論文集と 7 冊の和文論文集を編集・出版

受理日：2016年3月27日