

## 山陰の花崗岩類と鉱物資源に関する概要

亀井 淳志\*

### Overview on the granitic rocks and ore deposits in San-in district

Atsushi Kamei\*

#### Abstract

Cretaceous to Paleogene intrusive rocks are widely distributed in San-in district, SW Japan. The magmatism is classified into three stages: Mochigase-stage (ca. 80 Ma), Inbi-stage (75–50 Ma), and Tamagawa-stage (44–30 Ma). The intrusive rocks are accompanied by significant ore minerals such as magnetite and molybdenite. The magnetite is generally contained in the granitic to gabbroic rocks with more than 0.2 modal percent. The magnetite is generated from the oxidation of mafic minerals by SO<sub>2</sub>. The molybdenite is mainly precipitated as a quartz-vein mineral. This suggests that the molybdenum behaves incompatibly and concentrates in a fractionated magma.

**Key word:** granite, gabbro, magnetite, molybdenite, San-in district, SW Japan

#### はじめに

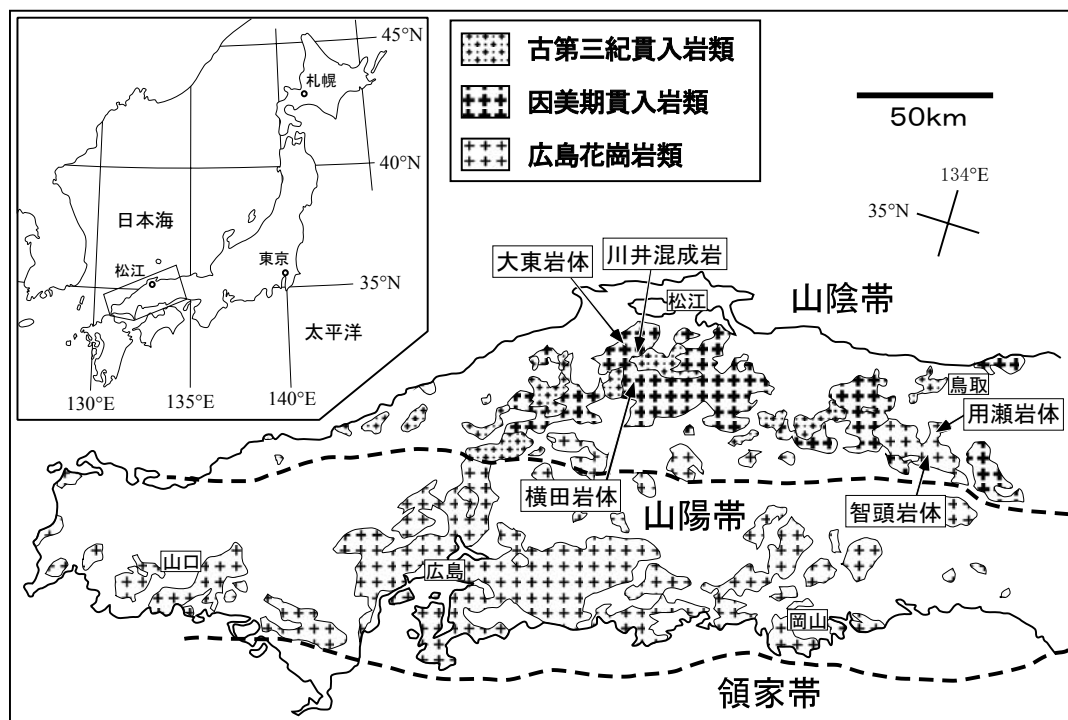
中国地方には白亜紀～古第三紀にかけて活動した花崗岩類が広く分布する。この花崗岩類は岩相、岩石・鉱物の化学組成、帯磁率などにより、南から領家帯、山陽帯、山陰帯の3帯に区分される(第1図)(Ishihara, 1971; Murakami, 1974; 飯泉ほか, 1985)。1960年代の後半から花崗岩類の放射年代が数多く報告され、領家・山陽帯の花崗岩類は主に白亜紀後期に、山陰帯の花崗岩類は主に白亜紀末期から古第三紀に活動したことが明らかとなった(河野・植田, 1966など)。この3帯の花崗岩類は随伴する金属鉱床のタイプが異なることも知られている。すなわち、領家帯、山陽帯、および山陰帯の各帯は、それぞれ不毛区、タングステン鉱床区、およびモリブデン鉱床区に対応する(Ishihara, 1971)。そして、山陽帯の花崗岩類にはタングステンのほか鉛などの酸化鉱物鉱床が、山陰帯の花崗岩類にはモリブデンのほか、銅、鉛、亜鉛などの硫化物鉱床が伴われる(Ishihara, 1981など)。さらに花崗岩類の帯磁率を見ると、領家・山陽帯から山陰帯に向かって帯磁率が上昇し(金谷・石原, 1973)、一般に前者がチタン鉄鉱系列、後者が磁鉄鉱系列に大別される(Ishihara, 1977)。

#### 山陰帯の花崗岩類

山陰帯の花崗岩類は約 85～30 Ma に活動し、その中でも白亜紀末期から古第三紀にかけての活動が活発であった。花

崗岩類の活動変遷を見ると、大局的には苦鉄質から珪長質への組成変化がある(村上, 1979; 飯泉ほか, 1985; 高木ほか, 2000など)。すなわち、白亜紀後期(80 Ma 前後)に石英閃緑岩～トータル岩、次いで古第三紀前～中期(75～50 Ma)に花崗閃緑岩～花崗岩、そして古第三紀中～後期(44～30 Ma)に花崗岩～花崗斑岩が多く活動している。ただし、塩基性深成岩類の年代はほとんど報告がなされておらず、その多くが 80 Ma 前後のものかどうかは不明である。大東地域のモリブデン鉱床に密接に伴われる川井混成岩(斑れい岩～花崗閃緑岩)では、地質学的に白亜紀とする見解(西田ほか, 2005など)と古第三紀とする見解(松浦ほか, 2005など)があり、議論がまとまっていない。また 80 Ma 前後には、智頭岩体や用瀬岩体などの花崗岩や花崗閃緑岩で構成される大きな酸性岩体も存在する。これらの火成活動に関しては今後の詳しい検討が必要である。このような幾つかの問題点は残されているものの西田ほか(2005)は花崗岩類の活動時期を総括し、大きく用瀬期(80 Ma 前後)、因美期(75～50 Ma)、田万川期(44～30 Ma)に区分した。用瀬期の花崗岩類は約 80 Ma 前後の山陽帯花崗岩類に共通する古い貫入年代を有し、山陰帯南部に散在する。これらの岩体には山陰帯に一般的でないチタン鉄鉱系列の花崗岩類が伴われる(先山, 1986など)。因美期の花崗岩類は山陰帯中部～東部にかけてバソリス状に広く分布し、若い岩体ほど珪長質な傾向がある。たたら製鉄の原料となった良質な砂鉄を含む磁鉄鉱系列の岩体に富み、国内最大級のモリブデン鉱床を胚胎することでも知られている(Ishihara, 1971など)。田万川期の花崗岩類は山陰帯の広範囲に散在し、因美期の花崗岩類とは約 600 万年の隔たりをもって活動している。この時期の花崗岩類は、従来、古第三紀中～後期の鉛山進入岩類と古第三紀後期以降の田万川期貫入岩類に区分されていた(村上, 1974, 1979など)。

\*島根大学総合理工学部地球資源環境学科 〒690-8504 松江市西川津町 1060  
Department of geoscience, Shimane University, Nishikawatsu, Matsue, 690-8504, Japan.



第1図 中国地方の白亜紀～古第三紀貫入岩類. 西田ほか(2005)をもとに作図.

しかし、両者の活動時期が連続することから、西田ほか(2005)は田万川期の花崗岩類として一括している。

#### 花崗岩類に付随する鉱物資源

山陰帯の花崗岩類は前述のように磁鉄鉱系列の岩体を主体とし、領家・山陽帯のチタン鉄鉱系列とは異なる。磁鉄鉱系列の花崗岩類はモード組成で0.2～1.5%の磁鉄鉱を含むため(Ishihara, 1977; 高木, 1998), 山陰帯の花崗岩類の風化マサには豊富な砂鉄が残留する。この砂鉄は古来8世紀より採取され、13世紀には「たたら製鉄」の始まりによって良質な鋼の原料となった。花崗岩類に磁鉄鉱が多く含まれる原因についてはTakagi and Tsukimura (1997)による詳しい検討があり、以下にその概略を述べる。磁鉄鉱は $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ )で構成され、3価の鉄が多く含まれる。一般に主要鉱物の鉄は2価の状態であり、そのため磁鉄鉱の晶出には酸化的条件が必要と言える。ここで磁鉄鉱の産状を見ると、山陰の大東～横田地域の花崗岩類の磁鉄鉱は角閃石の周囲に生成しており、この角閃石はコアからリムに向かって $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ が減少する(Czamanske et al., 1981)。また、須佐の高山磁石石として知られる斑レイ岩中の磁鉄鉱は単斜輝石の周囲に生成し、この輝石はリムに向けて $\text{Fe}/(\text{Ca}+\text{Fe}+\text{Mg})$ が減少する(Yamaguchi, 1988)。現在は山陰帯の他の花崗岩類にも、この苦鉄質鉱物と磁鉄鉱の特徴が共通することが分かっている(Takagi, 1992; 高木, 1993)。したがって、これらの磁鉄鉱は苦鉄質鉱物の分解・交代により生成したもので、これはサブソリダス期もしくは結晶作用末期の岩石中に酸化状態が存在したことを示唆する。酸化状態を作る候補としては揮発性

流体の関与が考えやすく、マグマ中に多く含まれている $\text{H}_2\text{O}$ の解離(Czamanske et al., 1981; 山口, 1987)や、 $\text{CO}_2$ の解離による酸素の供給が想定される。しかし、Takagi and Tsukimura (1997)は、これらの作用で苦鉄質鉱物から磁鉄鉱が生成しないことを熱力学的に証明し、酸化剤として最も有効なものは $\text{SO}_2$ であると提案した。 $\text{SO}_2$ の硫黄は $2\text{H}_2\text{S}+3\text{O}_2=2\text{SO}_2+2\text{H}_2\text{O}$ の反応で酸素を緩衝する。このガス緩衝は $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}=0.1$ のとき、約700～850℃で岩石中の単斜輝石の2価鉄を利用して磁鉄鉱を作る反応を起こす( $9\text{FeO}+\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}\rightarrow 3\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{H}_2\text{S}$ )。この反応が起こる原因は、先のガス緩衝( $2\text{H}_2\text{S}+3\text{O}_2=2\text{SO}_2+2\text{H}_2\text{O}$ )の曲線が、温度-fO<sub>2</sub>図上で単斜輝石-磁鉄鉱-石英の固相緩衝曲線と約700～850℃で交差することで説明されている。さらに、Takagi and Tsukimura (1997)は、磁鉄鉱系列の花崗岩類の条件である0.2%以上の磁鉄鉱を生成するには、マグマ中に250 ppm以上の $\text{SO}_2$ が含まれていれば良いと計算した。このようなことから、山陰帯の花崗岩類は $\text{SO}_2$ に富むマグマから結晶作用が進行したため、磁鉄鉱に富む岩体となったことが考えられる(高木, 1993; Takagi and Tsukimura, 1997)。一方、領家・山陽帯の花崗岩類には、マグマ生成時に還元剤である堆積岩類が大きく関与したため磁鉄鉱を生成する酸化条件を獲得できず、チタン鉄鉱系列となった可能性が指摘されている(Matsushita et al., 1972; Ishihara and Terashima, 1977など)。

山陰帯の花崗岩類に関連する鉱物資源にはモリブデンも重要である。モリブデン鉱床は磁鉄鉱系列の花崗岩類に密接に関連し、両者は無縁ではないことが知られている(Ishihara, 1977)。ちなみにチタン鉄鉱系列の花崗岩類にはタングステン鉱床が関連することが多い(Ishihara, 1977)。山陰帯では大

東-山佐地区がモリブデン鉱床地域として重要で、かつて日本最大のモリブデン産出量を誇った。山陰地域において花崗岩類の火成作用とモリブデン鉱化作用の関連性を検討した例はないが、この地域と構成岩石および鉱床タイプが対比されている飛騨帯では両者の関係が検討されている (Ishihara and Tani, 2004)。以下にその概略を示す。飛騨帯には白川地域に大きなモリブデン鉱床があり、花崗岩類に伴われる石英脈にモリブデン鉱物 (主に輝水鉛鉱) が晶出している。これは花崗岩類の固結末期に、モリブデンに富む熱水脈が活動したことを示す。石英脈が産する付近には、苦鉄質マグマと酸性マグマが不均一もしくは均一に混合した閃緑岩~花崗閃緑岩質の岩体や、桃色カリ長石を含む花崗岩の岩体が存在する (亀井・赤羽, 1985 など)。閃緑岩~花崗閃緑岩は高 Na ( $\text{Na}_2\text{O} > 4.25 \text{ wt}\%$ ) かつ高 Sr 同位体比初生値 (0.7100) の特徴を有し、一方、カリ長石を含む花崗岩は低 Na ( $\text{Na}_2\text{O} < 4.25 \text{ wt}\%$ ) の特徴を有する (Shibata and Ishihara, 1979; Ishihara and Wu, 2001)。Ishihara and Tani (2004) は、閃緑岩~花崗閃緑岩が古い角閃岩起源の塩基性マグマと、堆積岩もしくは高 Na 花崗岩に富む変成-深成複合岩体起源の高 Na 酸性マグマとが混合してできたと解釈した。また、希土類元素組成から、このマグマは大きく結晶分化していないことを示した。一方、低 Na 花崗岩マグマは変成-深成複合岩体起源もしくは下部地殻起源とし、マグマが斜長石を主体とする結晶分化作用の影響を大きく受けていることを示した。そして、このような結晶作用の度合いから見て、モリブデンに富む残留鉱化溶液を生成することが可能な岩体は低 Na 花崗岩であると結論した。Ishihara and Tani (2004) は飛騨帯のモリブデン鉱床地域の構成岩石が山陰帯にも共通し、不均質なマグマ混合を示す岩体が川井混成岩、混合が均質になるまで進んだ岩体が大東花崗閃緑岩、そしてカリ長石を特徴的に含む岩体が横田花崗岩などに対比されるとしている。

### 今後の課題

山陰帯の花崗岩類は良質な磁鉄鉱を豊富に含む岩体が多いが、このような花崗岩類を形成するための  $\text{SO}_2$  の供給過程がよく解明されていない。Takagi (2004) は沈み込み堆積物の量と花崗岩類の磁鉄鉱~チタン鉄鉱系列の成因を関連付ける先駆的な提案をした。すなわち、沈み込み堆積物が 15% 以上関与しつつマントル下で生成した花崗岩マグマは還元物質を初生的に多く含むためチタン鉄鉱系列になるというものである。しかし、沈み込み物質がマントル下で融解すれば一般にアダカイト的な初生メルトが形成される。山陰帯を含めた中国地方全体でアダカイト質岩石は優勢ではない。したがって、この堆積物の直接的な融解では花崗岩類の成因を説明できない可能性があり、今後は間接的な関与や別の成因モデルによる議論もなされる必要があるだろう。一方、山陰帯のモリブデン鉱床を伴う花崗岩類は飛騨帯のものに比べ Sr 同位体比初生値が低い (0.7050 付近) ことが知られている (加々美ほか, 1999; 西田ほか, 2005 など)。さらに、それらは典型的な磁鉄鉱系列でもあることから堆積岩類の関与を

考えにくい。これは山陰帯の混成岩の成因が必ずしも飛騨帯のものに共通しない可能性を示す。また、山陰帯では Ishihara and Tani (2004) のような全岩化学組成に基づく花崗岩類の包括的成因論が明確にされていない部分があり、高 Na タイプ・低 Na タイプの存在なども良くわかってない。さらに、鉱化溶液を生成することができる大規模な結晶分化作用を経験した岩体の特定も行われていない。これらは山陰帯の花崗岩類とモリブデン鉱床との成因関係を明らかにするための今後の課題となるだろう。

### 謝辞

赤坂正秀教授 (島根大学) には本原稿を作成する機会を与えていただき、本文内容に関する有益なコメントを賜った。飯泉 滋名誉教授 (島根大学) には原稿を読んでいただき、山陰地域の火成岩および鉱物資源に関する数多くの建設的なご指摘を賜った。木村純一教授 (島根大学) にはご丁寧に英文校閲をしていただいた。以上の方々に深く感謝申し上げます。

### 引用文献

- Czamanske, G.K., Ishihara, S., Atkins, S.A., 1981. Chemistry of rock-forming minerals of the Cretaceous?Paleogene batholith in southwestern Japan and implication for magma genesis. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 10431-10469.
- 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.
- Ishihara, S., 1971. Modal and chemical compositions 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-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, **27**, 293-305.
- Ishihara, S., 1981. The granitoid series and mineralization. *Economic geology* 75<sup>th</sup> Anniversary volume. 458-484.
- Ishihara, S. and Terashima, S., 1977, Chemical variation of the Cretaceous granitoids across southwest Japan, -Shirakawa-Toki-Okazaki transaction-. *Journal of the Geological Society of Japan*, **83**, 1-18.
- Ishihara, S., Wu, C.-Y., 2001. Genesis of Late Cretaceous?Paleogene granitoids with contrasting chemical trends in the Chubu District, central Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **52**, 471-491.
- Ishihara, S., Tani, K., 2004. Magma mingling/mixing vs. magmatic fractionation: genesis of the Shirakawa Mo-mineralized granitoids, central Japan. *Resource Geology*, **54**, 373-382.
- 加々美寛雄・川野良信・井川寿之・石岡 純・加々美慎一・柚原雅樹・周藤賢治・飯泉 滋・今岡照喜・大和田正明・小山内康人・田結庄良昭, 1999, 本州弧白亜紀~第三紀火成活動の時空変遷と下部地殻-Rb-Sr 全岩アイソクロン年代と Sr,Nd 同位体比初生値からの検討-。地質学論集, **53**, 1-19.
- 亀井玄人・赤羽久忠, 1985, 岐阜県大野郡白川村, 鳩ヶ谷複合花崗岩質岩体. *MAGMA*, **73**, 53-57.
- 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. *岩鉱*, **68**, 211-224.
- 河野義礼・植田良夫, 1966, 本邦火成岩の K-Ar dating (V) - 西南日本の花崗岩類. *岩鉱*, **56**, 191-211.
- 西田和浩・今岡照善・飯泉滋, 2005, 山陰中央における白亜紀~古第三紀火成活動: Rb-Sr アイソクロン年代からの検討. *地質学雑誌*, **111**, 123-140.
- Matsushita, Y., Honma, H., Matsubaya, O. and Sasaki, H., 1972. Oxygen isotopic study of the Cretaceous granitic rocks in Japan. *Contributions to*

- Mineralogy and Petrology*, **37**, 65-74.
- 松浦浩久・鹿野和彦・石塚吉浩・高木哲一, 2005, 木次地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 72 p
- Murakami, N., 1974, Some problems concerning late Mesozoic or early Tertiary igneous activity on the inner side of Southwest Japan. *Pacific Geology*, **8**, 139-151.
- 村上允英, 1974, 西南日本内帯における後期中生代～古第三紀酸性火成岩類の進入と構造との関係—とくに西中国を例として. 地団研専報, **18**, 9-31.
- 村上允英, 1979, 東中国における後期中生代～古第三紀酸性岩類の南北変化の概要. 地質学論集, **17**, 3-18.
- 先山 徹, 1986 山陰東部の白亜紀～古第三紀深成岩類の地質学的—岩石学的研究. 広島大学地学研究報告, **26**, 111-194.
- Shibata, K. and Ishihara, S., 1979, Rb-Sr whole rock and K-Ar mineral ages of granitic rocks in Japan. *Geochemical journal*, **13**, 113-119.
- 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.
- 高木哲一, 1993, 磁鉄鉍系列/チタン鉄鉍系列花崗岩質マグマの酸化還元状態の推移—中国地方中部～東部の例—. 岩鉍, **88**, 165-178.
- 高木哲一, 1998, 酸化型花崗岩類と還元型花崗岩類. 地球科学, **52**, 57-58.
- Takagi, T. and Tsukimura, K., 1997, Genesis of oxidized- and reduce-type granite. *Economic geology*, **92**, 81-86.
- 高木哲一・内藤一樹・飯泉 滋, 2000, 鳥根県東部の花崗岩類と鉍床. 日本地質学会第107年学術大会見学旅行案内書. 35-44.
- Takagi, T., 2004, Origin of magnetite and ilmenite-series granitic rocks in the Japan Arc. *American Journal of Science*, **304**, 169-202.
- 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鉍—. *MAGMA*, **80**, 22-25.
- Yamaguchi, Y., 1988, Oxidation of interstitial magma: magnetite fractionation of Fe responsible for reverse zoning in pyroxene and amphibole during solidification of interstitial magma of the Koyama intrusive, Susa, southwest Japan: International symposium on Tin/Tungsten granite in southeast Asia and the Western Pacific, 5<sup>th</sup>, Extend abstracts, 245-246.