

東アジアのパイロフィライト鉱床

佐藤 興平¹⁾・金 炆榮²⁾・朱 金初³⁾・神谷 雅晴⁴⁾

1. はじめに

蛭石の主要鉱物パイロフィライト(葉蛭石, Pyrophyllite, $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$)は, かつて石筆として使われ我々に身近な存在であった(注1). また, その語源がギリシャ語の火・葉・石に由来するように古くから耐火物として利用され, 日本の製鉄産業を基盤で支えてきた重要な工業原料でもある. 製鉄業界における技術革新によって, 耐火物の内容はこの20年間に大きく変わったが(注2), 各種工業原料に使われる資源として, 日本のパイロフィライト鉱石生産量は年間約120万トンに達し, 世界第1位を誇っている(Fujii, 1983; Virta, 1993). 日本だけでなく, パイロフィライトは韓国や中国にも多産し, この鉱物は東アジアを代表する資源のひとつとさえ言えるのである.

ここでは, パイロフィライトの用途などについては最小限にとどめ, 世界の主産国である日本・韓国・中国のパイロフィライト鉱床について, 地質学的な特徴を概観し, 形成時期に注目しつつ, 広域的な鉱床生成区の視点からそれらを比較検討してみたい.

2. Al-Si 系工業原料資源の用途と主産国

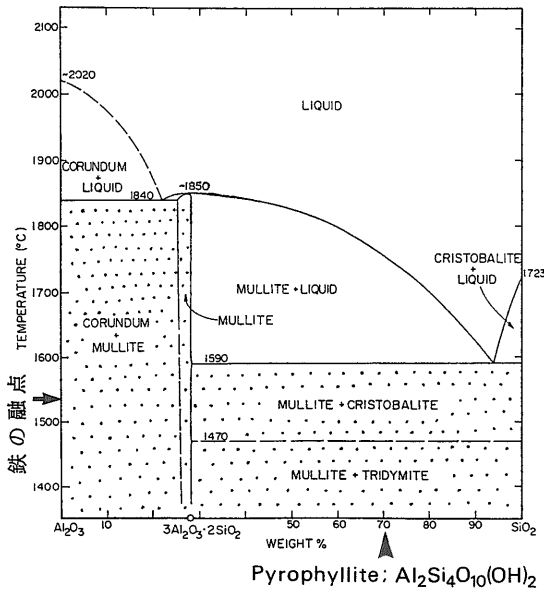
第1表にはパイロフィライトを含む天然のAl-Si系鉱種について, その用途・鉱床の成因・主産国をまとめた. これらはいずれも耐火物として利用されるが, 特にパイロフィライトでは, 生産国として日本・韓国・中国が非常に重要な役割を果たしていることが, 他の鉱種には無い特徴として挙げられる. この3国に共通する世界的な鉱物資源は, 石

第1表 主なAl-Si系工業原料資源の用途・鉱床・主産国

原料	用途	鉱床	主産国
パイロフィライト	耐火物, ガラス繊維, 陶磁器, 農薬	熱水鉱床	日本, 韓国, 中国
バン土頁岩	耐火物	堆積鉱床	中国, 南ア
ボーキサイト	耐火物	風化残留鉱床	オーストラリア, インドネシア, マレーシア, ガイアナ, スリナム
耐火粘土	陶磁器, 耐火物	風化残留鉱床	
カオリン	陶磁器, 耐火物, 製紙用コーティング剤, ガラス繊維	堆積鉱床 熱水鉱床 風化残留鉱床 堆積鉱床	米国, 中国, 南ア ブラジル(アマゾン・カオリン), 米国(ジョージア・カオリン), 英国, ニュージーランド, 韓国
珪砂・珪石	ガラス, 耐火物, 半導体用シリコン	海浜砂鉱床 ベグマタイト	オーストラリア, マレーシア, インド, ブラジル(高純度珪石)

1) 地質調査所 鉱物資源部
2) 韓国資源研究所(KIGAM=Korea Institute of Geology, Mining & Materials)
3) 南京大学 地球科学系(Department of Earth Sciences, Nanjing University)
4) 元所員, 現住鉱コンサルタント株式会社

キーワード: アジア, 日本, 韓国, 中国, 窯業原料, 耐火物, ガラス繊維, パイロフィライト, 白亜紀, 鉱床生成区, 火成活動, 海嶺の沈み込み



第1図 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系状態図(ムアン・オスボン, 1971). Bowen and Greig(1924)を改訂. 打点部は固相のみからなる. パイロフィライトの化学式は, 実用分野では $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ と表記する方が一般的.

灰石を別とすれば, 他には無いであろう.

さて, Al-Si 系窯業原料の理解には, この系の相平衡図が役に立つ. この系の研究は半世紀も前に行われた古典的なものであるが, 実験岩石学の初期の成果でもあった. その一例を第1図に示す. 製鉄用耐火物としてこの状態図を見ると, 例えば, 銑鉄の温度は炭素を含むため鉄の融点よりやや低く $1,500^\circ\text{C}$ 程度であるから, その温度で $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系の鉱物が溶けてしまうことはないことが読み取れよう. もちろん実際の製鉄過程では, 非常に大きな温度勾配といった過酷な条件にも長時間耐えるよう, それぞれの工程にふさわしい耐火物を選ぶだけでなく, 状態図のような基礎知識とは異なった様々な技術的工夫がこらされている.

ところで, 第1図は Al-Si の2成分系であるが, これに例えばアルカリが加われば事態は大きく変わる. 溶け始める温度は著しく低下し, 液相の温度は 800°C 以下にもなりうる. 従って, 原料にセリサイトや長石が多いと, 耐火度は著しく下がり高温に耐えられなくなる. 逆に, 比較的低温で焼かれる陶磁器では, これらの鉱物のアルカリ分が原因で部分熔融してできたガラスが膠結剤として強度や緻密性を

生んでいるというわけである. なお, カオリン(例: Kaolinite, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) も $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ の2成分系に近いが, 水の含有量が多いため(14%)焼成時の変形度が大きく, 耐火物原料としては, いったん焼いて骨材にするか結合剤に使われる. この様に, 含水量の少ない(5%)パイロフィライトには, カオリンに比べ耐火物原料として取り扱い易いという大きな利点がある. 日本にパイロフィライト鉱石が多産することは, 特に創始期の製鉄産業に重要な意味を持っていたのである(注3).

第1表に示したように, パイロフィライトはガラス繊維(長繊維)の原料としても多用されている. 融剤として灰ほう石(Colemanite, $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)を加えてできたガラスは(注4), アルカリを含まないため耐風化性に優れ, プラスチック強化材として例えばバスタブなどに使われ, 日常生活で身近な存在になっている.

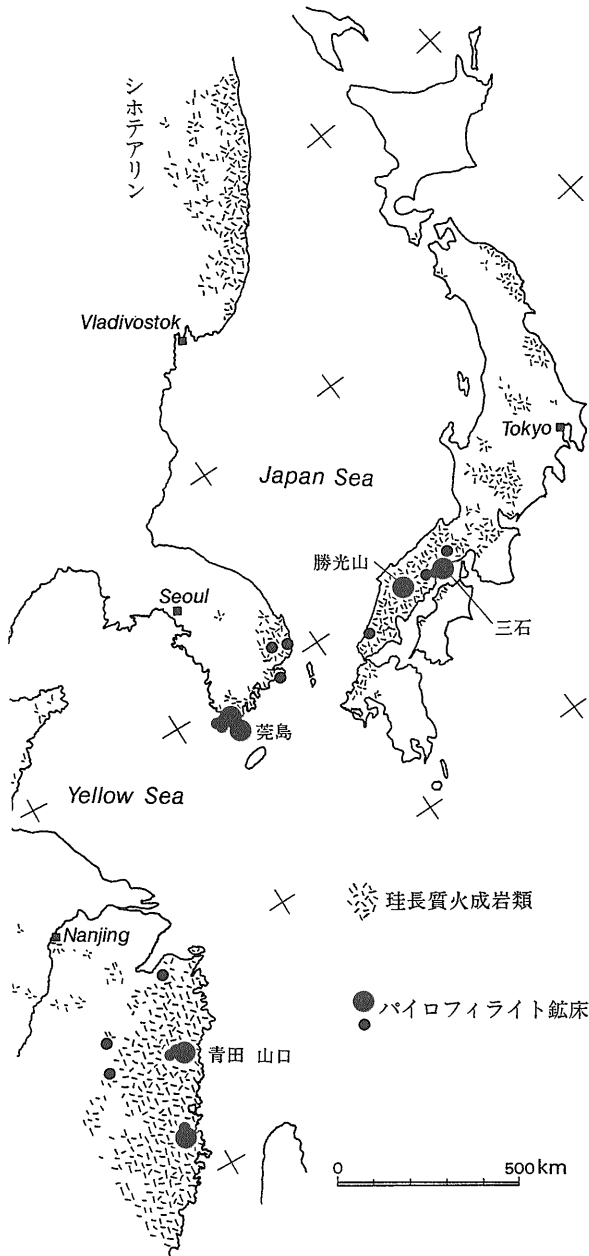
3. 東アジアのパイロフィライト鉱床

東アジアのパイロフィライト鉱床は, 主に西南日本, 韓国南部, 中国南東部に分布する(第2図). これらの多くは後期中生代の珪長質火成活動に伴う熱水変質作用で形成されたもので, 東アジアを代表する鉱物資源のひとつと見なされる. なかでも日本は, 既に述べたように, 世界の生産国であり, これら3国の生産量だけで世界の総生産量の大半を占めている. 以下に日本・韓国・中国の順で鉱床の地質を概観し, 次章でそれらの特徴をまとめてみたい. 日本には新生代にできた鉱床もあるが, 広域的な比較に重点を置く本稿では割愛する.

3.1 日本

日本のパイロフィライト鉱床は, 中国地方に分布する後期白亜紀の鉱床と, 長崎(五島)・長野(信陽など)・栃木(大峠など)の各県下に分布する新生代(中新世以降)の鉱床に分けられる(Fujii, 1977). 後者の生産量も小さくはないが, 本稿では後期白亜紀の鉱床についてのみ記述する.

中国地方のパイロフィライト鉱床と珪長質火成岩類の分布を第3図に示した. この地方の火山岩類とよく似た火山岩類は中部地方にも広く分布するが(濃飛流紋岩類), 小規模なセリサイト鉱床は伴うものの, パイロフィライト鉱床の存在は全く知られて



第2図 東アジアのパイロフィライト鉱床と白亜紀—古第三紀珪長質火成岩類の分布。中国はジュラ紀火成岩類も含む。鉱床の分布は須藤ほか(1992)による。

いないので、近畿以東は図から除いてある。この図には、セリサイトを主とする鉱床も含め、得られている K-Ar 年代も併せて示した。

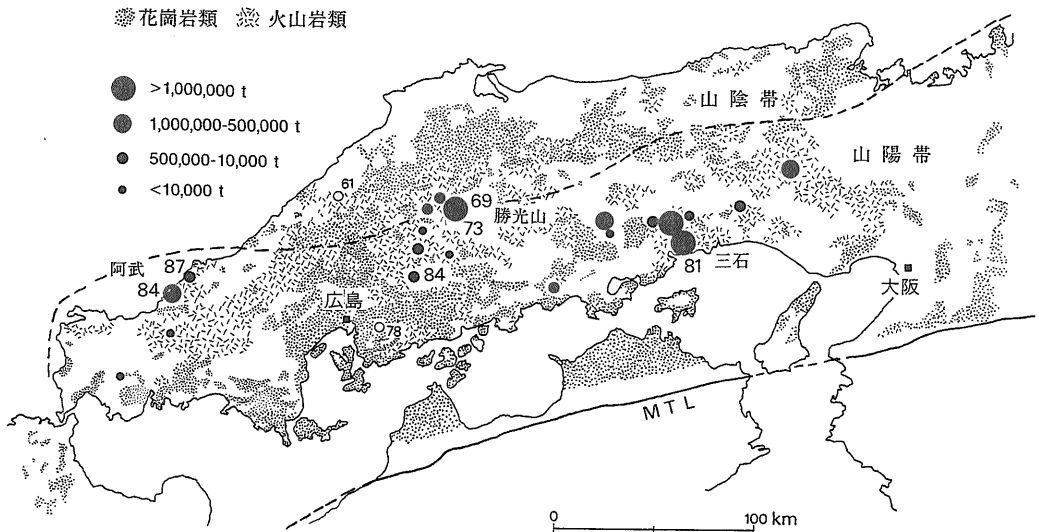
中国地方のパイロフィライト鉱床は、いずれも後期白亜紀の流紋岩—デイサイト質火山岩類が熱水変

質を受けてできたものである。母岩の火山岩類には溶結構造が普通に見られ、所々に凝灰質頁岩や頁岩を挟み、陸上の火山活動の休止期には湖成堆積物も形成されたことが分かる。鉱床の分布を花崗岩類とこれに関係する金属鉱床生成区と比べてみると、主要鉱床は全て山陽帯(Sn-W-F 鉱床区)に分布し、山陰帯(Mo-W 鉱床区)には見るべき鉱床が無いことが指摘される。報告された K-Ar 年代には明瞭な広域変化は認められず、大半が85-65 Ma (75±10 Ma)の範囲に入る。北側に比較的若い年代が見られるが、帯状分布と言うにはデータが少な過ぎる。これらの鉱床の年代は山陽帯の花崗岩類や金属鉱床の年代と大局的には一致する。鉱化のスタイルや場所は変わっても一連の火成活動の産物であることは言うまでもない。むしろ興味深い点は、次に述べる韓国も含めて、広い範囲で70-80 Ma 前後にパイロフィライト鉱床ができていのに、近畿以東には存在しないということである。しかしその理由は今のところ分からない。

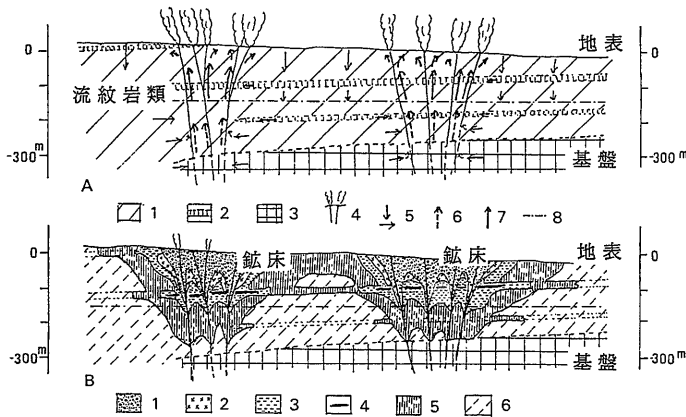
中国地方の鉱床も、詳しくみると、鉱体の産状や鉱石の特徴が変化に富む。地表付近もしくは極めて浅所で形成されたとみられる三石地区や勝光山地区の鉱床に比べ(例えば、藤井ほか, 1979, 注5)、鉱体中心部に紅柱石が多産する阿武地区の宇久鉱床は花崗岩類の貫入に関して比較的深所でできたと推定される(神谷, 1974)。しかし、いずれも母岩の構造や断裂に規制されて変質帯が発達しており、透水性の高かったとみられる層が選択的に変質を受けることから、細かくみると変質帯の構造は複雑であるが、全体として茸状あるいはロート状の形態を示し、周辺部にセリサイト帯を伴うという傾向がある。三石地区では、鉱床の中心部から周辺部へ、珪化帯—“蠟石”帯—弱粘土化帯—変質母岩という累帯配列が見られる(第4図)。“蠟石”帯の多くと弱粘土化帯は石英とセリサイトからなり、一部の“蠟石”帯が石英—パイロフィライトの組合せをもつ。中心部の珪化帯は熱水の通路にあって最も変質(溶脱)の進んだ部分と解されている(藤井ほか, 1979)。

3.2 韓国

パイロフィライトは韓国の最も重要な非金属鉱物資源のひとつであり、近年は年間50-70万トン生産され(第2表参照)、国内の需要を完全に満たし、



第3図 中国地方のパイロフィライト鉱床と白亜紀-古第三紀珪長質火成岩類の分布。鉱床の分布と規模(生産量)は Fujii et al.(1976), K-Ar年代(2桁の数字, Ma単位)は柴田・藤井(1971)と柴田・神谷(1974)(再計算値)および Kitagawa et al.(1988)による。○印は年代値の報告されているセリサイト鉱床で、少量のパイロフィライトを伴う。山陽帯/山陰帯の境界は、チタン鉄鉱系(還元型)花崗岩類の分布の北限(佐藤ほか, 1992)を示す。



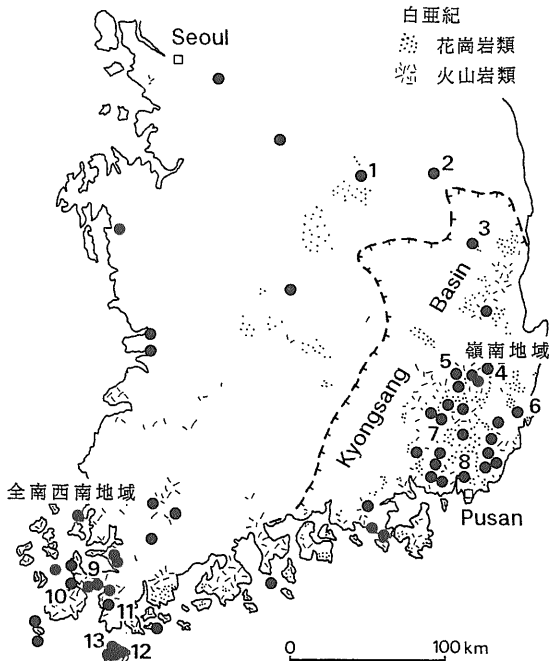
第4図 岡山県三石地区の鉱床の形成過程を示す模式断面図(藤井ほか, 1979)。A. 火山性噴気活動(1-2: 流紋岩類(2は凝灰質頁岩を挟む成層部), 3: 基盤(中生界), 4: 断裂と噴気, 5: 地下水の動き, 6: 熱水の動き, 7: 強酸性熱水の動き, 8: 地下水面)。B. 熱水変質作用(1: 珪化帯, 2: 斑入り陶石化帯, 3: 蛭石化帯(主要鉱石), 4: 白蛭帯, 5: 弱粘土化帯, 6: 弱変質帯)

生産量の30%余りは輸出(主に日本)に廻されている。賦存鉱量は7千万トン余りと見積られるが、かなりの部分は鉄の含有量が高いため品質は必ずしも良くない(Lee, 1994)。

鉱床は主に朝鮮半島南端部に分布する(第5図)。これらはいずれも後期白亜紀の珪長質火成活動に伴う熱水変質鉱床であるが、半島南東端の嶺南地域(慶尚南北道)と南西端の全南西南地域(全羅南道)では鉱床の性格がいくぶん異なる。前者はパイロフィライトを主とするが、後者ではカオリンやアルーナイトが多く、パイロフィライトは比較的少ない。

1) 嶺南地域の鉱床

慶尚盆地の白亜系は碎屑性堆積物からなる前期白亜紀の地層とこの上にある白亜紀中-後期の火山岩類からなり、これらは後期白亜紀(一部古第三紀)の花崗岩類(佛国寺花崗岩類-注6)に貫かれる。火山岩類は全層厚が2 kmを超えると見積られ、下位から上位へ安山岩質から流紋岩質へと変化する(例えば, Lee, 1988)。溶結凝灰岩を含むことから、少なくとも一部は陸上の活動であったと考えられる。この地域の鉱床は、この火山岩類が熱水変質を受けてできたもので、レンズ状・板状・脈状の形態をと



第5図 韓国の蠟石鉱床の分布(金玉準教授停年退任記念誌編輯委員会, 1982, p. 369を一部改訂). 地質の概略は Korea Institute of Energy and Resources(1981)による. 番号を付けた鉱床は, 近年採掘中の主要鉱山. 番号は第2表に対応.

第2表 韓国の蠟石生産実績(韓国資源研究所による)

番号	鉱山名	生産量 (1989-93年, 単位:トン)
1	大 壘(Daehyun)	39,085
2	大 鵬(Daehyun)	50,355
3	府 南(Bunam)	287,016
4	慶 州(Kyongju)	72,164
5	中 央(Chungang)	28,295
6	佛國寺(Bulguksa)	144,433
7	密 陽(Milyang)	48,063
8	寶 盃(Bobae)	113,103
9	白 岩(Bakam)	352,001
10	富 谷(Bugok)	257,932
11	陶 岩(Doam)	55,845
12	久 市(Gusi)	48,472
13	蘆花島(Nohwado)	524,822
	莞 島(Wando)	864,589
	その他	362,412
合 計		3,248,587

鉱山の番号は第5図に対応.

る. 変質岩の放射年代は得られていないが, 周辺の火山岩類と花崗岩類については60-80 MaのK-Ar年代が得られている(Jin et al., 1981; Min et al., 1982). 鉱床の分布と産状から(第6図参照), 変質作用は花崗岩類あるいは流紋岩類の貫入によりもたらされたものと考えられている.

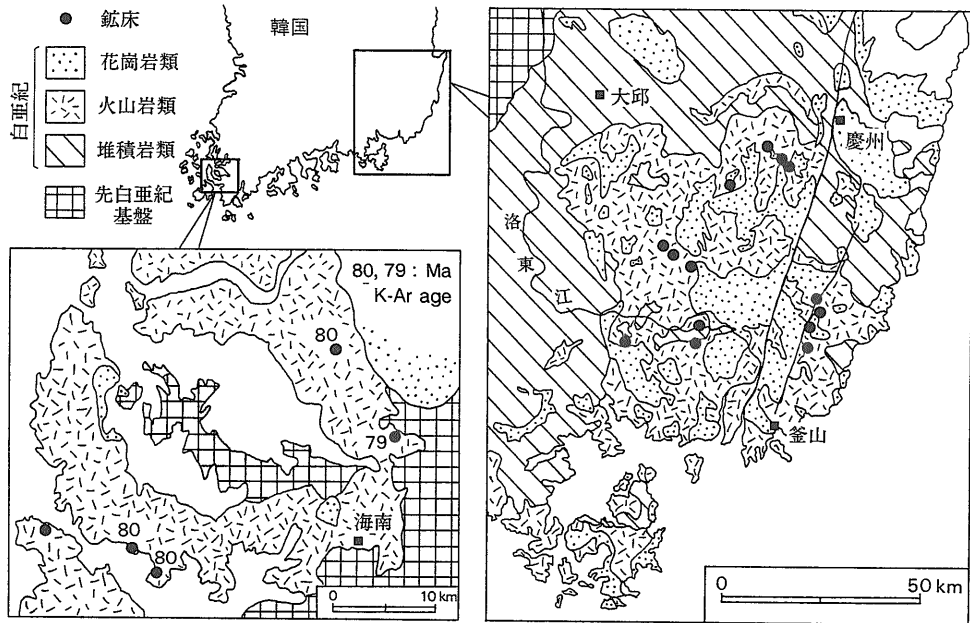
鉱石は主にパイロフィライトからなり, カオリン・セリサイト・石英・黄鉄鉱を伴う. 次に述べる全南西南地域の鉱床に比べて, アルーナイトとデイッカイトが少なく, しばしば黄鉄鉱を多量に含む. 例えば, 密陽(Milyang)鉱床は流紋岩質溶結凝灰岩が変質されてできたもので, 鉱石は主にパイロフィライト・カオリン・セリサイトからなり, 少量のダイアスポア・コランダム・紅柱石・アルーナイト・黄鉄鉱などを含む. パイロフィライトを主とする鉱石は鉱床中央部に産し, 周辺部に向かってカオリンやセリサイトの多いゾーンがある(Sang, 1992; Lee, 1994).

2) 全南西南地域の鉱床

この地域の鉱床は海南(Haenam)・珍島(Jindo)・蘆

花島(Nohwado)一帯に分布する(第5, 6図). 一帯には, 先カンブリア紀の変成岩類とジュラ紀の花崗岩類を不整合におおって後期白亜紀の火山岩類が広く分布し, これらに貫く後期白亜紀の花崗岩—花崗斑岩類が小規模に露出する. 火山岩類は安山岩—流紋岩質(一部玄武岩質)で, 後期のものほど珪長質になる傾向がある(例えば, Kim, 1992). 鉱床は流紋岩質溶岩あるいは凝灰岩中に層状もしくはレンズ状に胚胎し, 母岩と一連の火山活動末期の熱水変質でできたものと考えられる. 変質岩中のセリサイトとアルーナイトについては72-81 MaのK-Ar年代が, また周辺の火山岩類については103 Maから66 Maにわたる年代値が報告されている(Moon et al., 1990; Kim and Nagao, 1992).

Kim(1992)によれば, この地域の鉱床はパイロフィライト型とカオリン型に2大別されるという. 海南鉱床は前者の例で, パイロフィライトに富む鉱石が変質帯中央部に発達し, コランダム・紅柱石・ダイアスポアを含む(Lee, 1994). 母岩の流紋岩質凝灰岩との間にはカオリン帯やセリサイト帯が産する(第7図参照). 久市(Gushi), 嶺川(Dogcheon), 莞島(Wando), 蘆花島鉱床もこれに似る. 莞島鉱山は韓国で最も大きく, 年間15-20万トンの鉱石を生産している(第2表). カオリン型ではカ



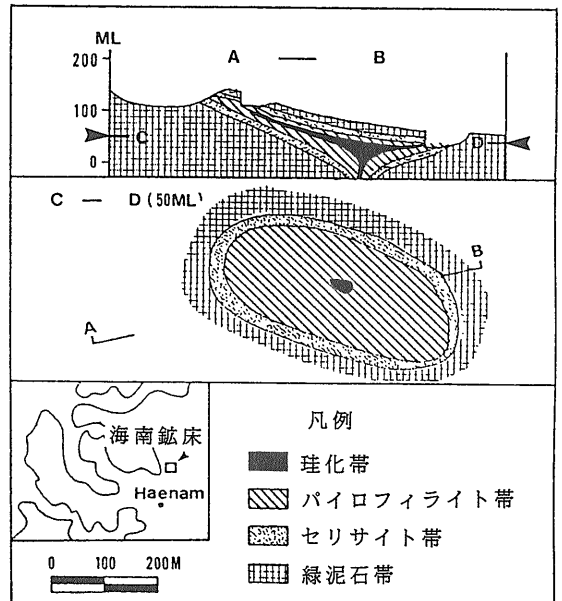
第6図 韓国南部のパイロフィライト鉱床の分布と地質。Korea Institute of Energy and Resources(1981), Kim and Nagao(1992)およびLee(1994)参照。

オリソナイト帯やアルーナイト帯が厚く発達し、パイロフィライトは少ないか見られない。例としては、聲山(Seongsan), 玉埋山(Ogmaesan), 中龍里(Jungyongri), 珍島(Jindo) 鉱床が挙げられる。アルーナイトが多産することから、かつてはアルーナイト鉱床として注目された(Moon, 1975)。

3.3 中国

中国のパイロフィライト鉱床は、主に南東端沿岸部の浙江・福建両省に産する(第2図)。この地域には、ジュラ紀および白亜紀の珪長質火成岩類が広く分布し、鉱床もこの活動に関係する熱水変質作用でできたものである。生産量は日本や韓国に次ぐと推定されるが、統計資料は公表されていない。浙江省南部の青田地区に産する蛸石は、古くから「青田石」として工芸・装飾用に利用され、山口(Shankou) 鉱山は現在中国最大の生産量をあげているので、地質調査所(1988)をもとに、その特徴を概観してみよう(第8図参照)。

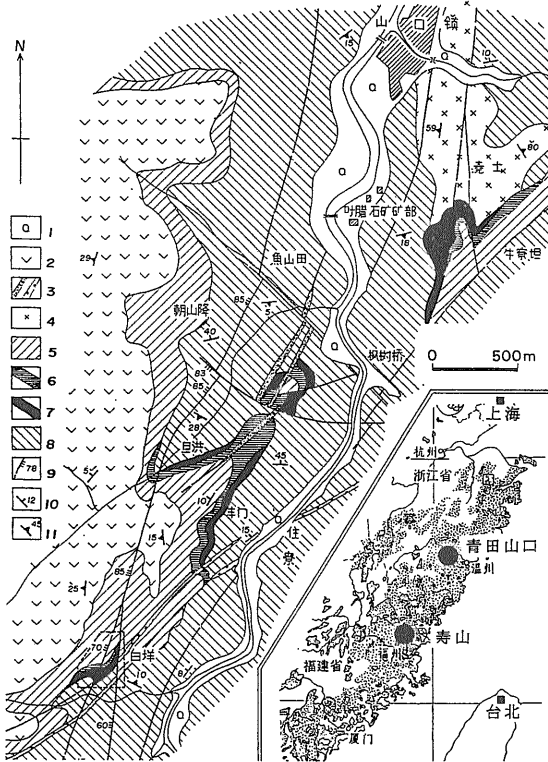
山口鉱床は流紋岩質溶岩・溶結凝灰岩・凝灰角礫岩などからなる火山岩類が変質されてきたものである。火山岩類の時代は後期ジュラ紀とされているが、後述のように、むしろ白亜紀と見るべきであろう。鉱床は5つの鉱体群に分けられるが、それら



第7図 韓国全南西南地域、海南鉱床の模式断面図(Kim, 1992)。

は北北東—南南西方向の断裂に沿って分布し(第8図)、火山岩層のはぼ一定層準に胚胎するという。鉱体の上位には珪化帯が発達し、風化侵食に耐えて

山口鉛石矿床地質図



第8図 中国浙江省青田地区，山口鉛床の地質図。

1: 第四系, 2: 火山岩類(J₃d), 3: 珪化破砕帯と岩脈, 4: 流紋岩体, 5: 火砕岩類(J₃c 後期), 6: 珪化帯, 7: 鉱化帯, 8: 火山岩類(J₃c 前期), 9: 断層, 10: 層理面, 11: 葉理面・流理面。J₃c-dは後期ジュラ紀を示す中国の地層コードで, dがより上位。挿図の打点部は‘後期ジュラ紀’-白亜紀の珪長質火成岩類。地質調査所(1988)参照。山口鉛床付近の流紋岩類については, 白亜紀のK-Ar年代が得られている(本文参照)。

断崖をつくっていることが多い。鉱石は石英・パイロフィライトを主とし, セリサイト・カオリンのほか微量の紅柱石・コランダム・デュモチエライトなどを伴う。鉱体を詳しく観察すると, パイロフィライト・コランダム・ダイアスポアなどからなる脈状・層状の高アルミナ質鉱石の周辺に珪質鉱石や弱変質岩が産するという帯状配列が見られることがあり, 変質が断層や地層面に沿って進んだことがうかがわれる。弱変質部には原岩の組織が残存するという。個々の鉱体が示す塊状・層状・レンズ状・脈状など様々な形態も, 熱水に対する原岩の浸透率を反映しているのであろう。

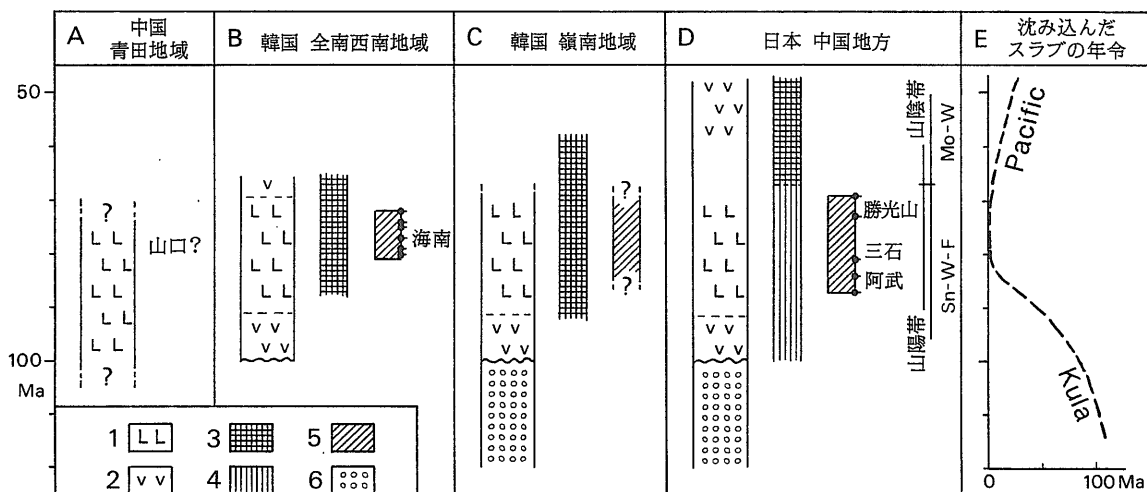
さて, 中国南東部に分布する後期中生代の花崗岩類と鉛床は著しく異なる2つのグループに分けられる。Sn-W-Be-REEなどの鉛床を伴い磁鉄鉛に乏しい内陸側の花崗岩類(南嶺山脈など)に対して, Cu-Pb-ZnやAu-AgやMoなどの鉛化を伴い磁鉄鉛に富み低いSr初生値で特徴づけられる一群が, 浙江省や福建省などの沿岸部と揚子江周辺に分布する(例えば, Xu et al., 1984)。前者はジュラ紀, 後者は主に白亜紀である。山口鉛床がどちらのグループに属するのかという問題は, 中国南東部の鉛床生成区における位置づけだけでなく, 韓国や日本との対比を行うためにも重要である。

山口鉛床を胚胎する火山岩類は, これまで後期ジュラ紀とされてきた(例えば, 地質調査所, 1988)。しかし, 南京地質鉛産研究所と浙江省地質鉛産局により得られた流紋岩質火山岩の全岩K-Ar年代(それぞれ101 Maおよび79 Ma)は, この火山岩類と鉛床が白亜紀のものであることを示唆する。測定試料は鉛石そのものではないので, 鉛化時期の詳細については今後の検討を待たなければならないが, 得られた年代値が日本や韓国の白亜紀パイロフィライト鉛床の年代に極めて近い点が注目される。

4. 東アジアのパイロフィライト鉛床の特徴

4.1 陸上の火山活動と断裂の役割

ここで取り上げた日本・韓国・中国の後期中生代パイロフィライト鉛床は, 陸上の珪長質火山活動に関係して形成されたとみられる。鉛化の時期も似ていた可能性が高い。これらの鉛床は, 従来から言われているように, 浅所での酸性熱水による変質作用でできた古地熱系の化石とも言えよう。陸上の酸化環境は酸性熱水の形成に好都合であったと考えられる(Fujii, 1977)。水の起源は主に天水と考えられる。水素同位体組成からこのことを裏付けた研究もある(渡辺ほか, 1994)。貫入岩体と密接でやや深い所で出来たとみられる鉛床では, あるいは熱水の全てが天水起源ではなかったかも知れないが, 透水性に富む地層や断裂は熱水の通り道として変質の中心となり, これらに規定されて鉛体の形状が決まっただけでなく, 個々の鉛床では, それぞれの地質状況を反映して, 鉛体の形態や変質鉛物の分布に多様性が見られる。しかし少なくとも, 鉛床を形



第9図 東アジアの主要パイロフィライト鉱床の鉱化時期と火成活動の消長および海洋プレートの年令の時間関係。

1: 流紋岩類, 2: 安山岩類, 3: 花崗岩類(酸化型=磁鉄鉱系), 4: 花崗岩類(還元型=チタン鉄鉱系), 5: 鉱化年代の範囲, 6: 堆積岩類(一部火山岩類を括む)。

参照資料; A: 本文, B: Moon et al.(1990), Kim and Nagao(1992), C: Lee(1988)と本文, D: 本文第3図, E: 磯崎・丸山(1991)。中国山口鉱床と韓国嶺南地域の鉱化時期は推定。火成活動の消長については再検討の余地がある。

成した浅所の高温度変質条件は、断層やカルデラ構造のような地下深部に達する断裂と密接に関係しているように思われる。

4.2 鉱化作用の同時性と火成活動の地域性

西南日本と韓国の鉱床は、後期白亜紀の70-80 Maの頃ほぼ同時期に形成されたらしい。韓国嶺南地域の鉱床については、鉱化時期に関する具体的な年代データが得られていないが、花崗岩類や火山岩類の放射年代に65-90 Maのものが卓越することから(Lee, 1988), これらもほぼ同時期に形成されたとみても大きな間違いは無いであろう。中国の浙江・福建両省の鉱床も後期白亜紀に形成された可能性が高い。浙江省山口鉱床付近の火山岩類について得られた79 MaのK-Ar年代は、西南日本や韓国の鉱床の年代に一致する。推定も交えたこれらの関係を第9図に示した。火成活動の消長や鉱化時期の詳細については今後さらに検討を加える必要があるが、中国東部から西南日本にわたる広い範囲でパイロフィライト鉱床がほぼ同時期に形成されているように見える点が興味深い。また、鉱化の時期は火成活動の全期間にわたるのではなく、特に流紋岩類の卓越する一時期に限られるらしいという点も注目

される(注7)。これらの「同時性」や「一時性」は何を意味するのだろうか。

第9図にはこの頃日本付近に沈み込んだ海洋プレートの年令も併せて示してある。鉱化の時期は、海洋プレートの年令がゼロの時期すなわち中央海嶺の沈み込みの時期に対応する。これは偶然であろうか。やや飛躍するが、三波川帯主部の変成岩もこれと似たK-Ar年代をもつ。海嶺の沈み込みが、高压変成帯の上昇とともに内陸側に大規模な珩長質火成活動を引き起こし(磯崎・丸山, 1991), 断裂など好条件の整った所でパイロフィライト鉱床が形成された、と解することができよう。パイロフィライトができるような熱水変質作用は、火成活動の時期を問わず起こり得たであろう。しかし、それが後に鉱床として採掘されるような規模を持つためには、海嶺の沈み込みに起因する巨大な熱的事変という舞台装置が必要であったと考えられる。

一方、鉱化をもたらした火成活動の性格は地域によって異なるようである。これを見るため、第9図には比較的データの整った韓国と西南日本の花崗岩類の岩型を示した。西南日本ではSn-W-F鉱床を伴う還元型=チタン鉄鉱系であるのに対して、韓

国のそれは酸化型＝磁鉄鉱系らしい。韓国の白亜紀火山岩類についてはFe-Ti酸化鉱物の詳しい検討がなされていないが、花崗岩類については特に半島南端部付近で高い帯磁率を示すことが知られている(Ishihara et al., 1981)。中国の浙江・福建両省の状況も韓国に似ていると見なされる。本稿では割愛したが、日本の新第三紀パイロフィライト鉱床も酸化型の火成活動に関係していると考えられる。従って、珩長質マグマ活動の岩型とパイロフィライト鉱床との間には、直接的な関係は無いとみるべきである。パイロフィライト鉱床のように地下浅所で天水起源の熱水によりできた鉱床では、岩型の違いによる影響は仮にあったとしても目立たなくなっていると思われる。

韓国や中国では、ジュラ紀にも火成活動があった地帯に重複して生じた白亜紀の活動に伴ってパイロフィライト鉱床が出来ているらしい。火成活動が重複する地帯の新しい活動は酸化型に、付加帯が初めて火成活動帯に転化するような場合には還元型になる傾向がある(佐藤ほか, 1993)。韓国にはジュラ紀の花崗岩類(主に還元型)が広く分布するが、金属鉱床も含めて熱水鉱床のほとんどは白亜紀の火成活動に関係している(例えば, Shimazaki et al., 1981)。ジュラ紀に形成された鉱床があったとして

も、その大半は削剝され現在は残っていないと解される。

5. あとがき

東アジアのパイロフィライト鉱床について概観し、主要鉱床が後期白亜紀のほぼ同時期に形成された可能性が高いことを指摘すると共に、鉱化時期の同時性がアジア大陸と古太平洋との間の相互関係といった広域的なテクトニクスとも無縁ではなかったと考えた。もちろん、これらはパイロフィライト鉱床についての一側面に過ぎず、上記の同時性の検証も含めて、今後に残された検討課題は多い。後期白亜紀の珩長質火成岩類は、日本海を隔てた極東ロシアのシホテアリン地域にも広く分布する(例えば, 佐藤ほか, 1993)。しかし、この地域には今までのところパイロフィライト鉱床は知られていない(Dr. Levashev, 私信, 1994)。工業原料資源の開発が進んでいないので、まだ発見されていない可能性が考えられるが、それだけだろうか。日本でも中部地方のように、濃飛流紋岩類が広く分布するにもかかわらず、パイロフィライト鉱床が見られない地帯がある。あるいは削剝レベルも関係しているのかも知れない。三石鉱床では、鉱化の最末期もしくは



写真1 勝光山滝之谷採掘場(勝光山鉱業所提供)

終了直後に噴出した溶結凝灰岩層が鉱体を覆った(藤井ほか, 1979)。8千万年も前に地表付近でできた鉱床が今なお残存するためには、風化侵食から鉱床を守る保存機構が有効に働く必要があったろう。本稿では除外したが、中新世以降の火成活動に伴う日本のいくつかの鉱床は、形成時期が新しいだけに、形成環境に関してもより具体的な手がかりを与えると期待されよう。

また、本稿のような広域的な視点を更に拡大して太平洋の東西兩岸を比較すると、東西の著しい違いに気付かされる。生産量で見ると、東アジアが圧倒的に大きいのに対し、アメリカ大陸は極めて小さく、環太平洋の東側には実質的にはパイロフィライト鉱床が存在しないかのように見えるのである。例えば米国では、全土の生産量を合わせても年間8万トン程度であって(注8)、日本の生産量の10分の1にも満たない。ほぼ同時代の火成活動は太平洋の兩岸に生じていたから、生産量が鉱床の規模や数を反映しているのだとすると、火成活動やそれに伴う熱水変質作用の性格が東西で異なっていたことを物語るとも考えられる。しかし、これとは別の要因として、製鉄業の発達した北米東部では主にマグネシウム系の耐火物が使われてきた(小田中, 私信, 1994)という歴史的背景も重視する必要がある。工業原料資源の統計には、地質学的要因の他に類似原料の利用など工業全体の構造も強く反映されているので、両要素を区別した考察が今後に残されている(注8)。

[謝辞] 新日本製鐵株式会社プロセス技術研究所の稲角忠弘氏とセントラル硝子株式会社の中村暢雄氏からは耐火物およびガラス製造技術についてご教示頂いた。ロシアの極東地質学研究所(Vladivostok)のG.B. Levashev 博士にはシホテアリン地域の非金属鉱床についてご教示頂いた。岡野武雄・小田中眞一郎・藤井紀之の3氏から頂いた資料や助言は、本稿の作成に不可欠であった。以上の方々に深謝する。

[注]

注1) 蛸石という名称は、カオリンやセリサイトを主とする蛸感にとむ軟質岩全体に対しても使われる。かつて石筆として親しまれた「ろうせき」には滑石(タルク)も含まれていた(岡野, 私信, 1994)。ここでは本来の

パイロフィライト蛸石について述べるが、取り扱い統計にはカオリンやセリサイトも含まれることがある。

注2) 耐火物として消費される日本国産のパイロフィライトは、1990年の時点で約20万トンであるが(小田中, 1994)、その他ガラス・陶磁器・農業などの原料にも使われ、一時期程ではないにしても、日本の鉱石生産量は年約120万トンに達し世界第1位である(U.S. Bureau of Mines, Minerals Year Bookなど)。

注3) 耐火物原料として近年消費が伸びている合成アルミナは、第1図の状態図でいえば左端に当たる。高価であっても使い方で長持ちするので、結果的にはコストの低減をはかることができるという。類似のAl鉱物は蛸石鉱床の中にもコランダム(Al_2O_3)やダイアスポア($AlO(OH)$)として産するが、産出は通常部分的であり合成アルミナと競合するまでには至っていない。一方、中国のぼん土頁岩(古生代のボーキサイト鉱床の一種)には主にダイアスポアからなる高アルミナ質鉱が産し、近年日本の輸入量が著しく増加した(小田中, 1994)。

注4) 最も一般的なホウ素原料であるホウ砂($Borax, Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)は、アルカリに富むのでこの種の長繊維ガラスの製造では使われない。

注5) 勝光山鉱床は、珪化帯が発達せずコランダムや紅柱石が産する点では宇久鉱床に似る(Fujii, 1983; 藤井, 私信, 1994)。

注6) 韓国の花崗岩類は主に白亜紀(一部古第三紀)の佛国寺花崗岩類とジュラ紀の大宝山花崗岩類に分けられる。

注7) 本題から少し外れるが、飛騨地域神岡鉱山付近の流紋岩脈が変質してできた陶石(石英—セリサイト)鉱床も同様の年代を示す(佐藤ほか, 準備中)。

注8) 米国のパイロフィライト鉱床は、東部のアパラチア山脈(主に北カロライナ州)とカリフォルニアにあるが(Espenshade, 1962)、近年(1992)稼行中の4鉱山のうち3鉱山は北カロライナ州にあり、西部にはカリフォルニア州に1カ所あるだけである(U.S. Bureau of Mines, 1993 Annual Report)。工業原料としてのパイロフィライトの役割は、多産する類似原料のタルク(年産約100万トン)に比べ、米国では著しく小さい。

参考文献

- Bowen, N.L. and Greig, J.W. (1924): The system $Al_2O_3-SiO_2$. Jour. Am. Ceram. Soc., 7, 238-254.
 Brobst, D.A. (1991): Other selected industrial minerals. Economic Geology, U.S., Geology of North America Vol. P-2, 189-211.
 地質調査所(1988): 耐火物原料に関する研究。国際産業技術協力プロジェクト(no. 8314)報告書, 214p.
 Espenshade, G.H. (1962): Pyrophyllite, and kyanite and related

- minerals in the United States. Mineral Investigations Resource Map MR-18, U.S. Geological Survey.
- Fujii, N. (1977): Distribution and genetic consideration of the hydrothermal clay deposits in Japan. Proc. 8th. Int. Kaolin Symp. & Mtg. on Alunite, Madrid-Rome, K-6, 1-10.
- Fujii, N. (1983): The present position of Japanese pyrophyllite. Industrial Minerals, Nov. 1983, 21-27.
- Fujii, N., Igarashi, T. and Togashi, Y. (1976): Distribution map of kaolin, pyrophyllite and sericite clay deposits in Japan. 1:2,000,000 map series no. 17-1, Geological Survey of Japan.
- 藤井紀之・平野英雄・須藤定久・神谷雅晴・富樫幸雄(1979): 岡山県三石地区のろう石鉱床形成の場について. 鉱山地質, 29, 83-95.
- 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 Geol., 31, 311-320.
- 磯崎行雄・丸山茂徳(1991): 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分. 地学雑誌, 100, 697-761.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee, J.S. (1981): Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin, Korea. Mining Geol., 31, 245-260.
- 神谷雅晴(1974): 山口県宇久ろう石鉱山の熱水変質作用. 鉱山地質, 24, 31-43.
- Kim, I.J. (1992): Alteration zoning, mineral assemblage and geochemistry of the hydrothermal clay deposits related to Cretaceous felsic magmatism in the Haenam area, southwest Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 25, 397-416.
- Kim, I.J. and Nagao, K. (1992): K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, 1, 58-70.
- Kim, J.W. (1992): Studies of volcanogenic epithermal mineralization and modeling (Ⅲ). 韓国資源研究所報告書 KR-92(T)-25(韓国語)
- 金玉準教授停年退任記念誌編輯委員会(1982): 韓国の地質と鉱物資源. 延世大学校地質学科同門会, 523p.(韓国語)
- Kitagawa, R., Nishido, H. and Takeno, S. (1988): K-Ar ages of pyrophyllite (Roseki) deposits in the Chugoku district, Southwest Japan. Mining Geol., 38, 357-366.
- Korea Institute of Energy and Resources (1981): Geological Map of Korea. 1:1,000,000 scale, KIER, Seoul, 1981.
- Lee, D.J. (1994): Geological occurrence and current status of demand-supply on industrial minerals in South Korea. ESCAP Technical Bull. (印刷中)
- Lee, D.S. ed. (1988): Geology of Korea. Kyohak-Sa, Seoul, 514p.
- Min, D.M., Kim, O.J., Yun, S., Lee, D.S. and Joo, S.W. (1982): Applicability of plate tectonics to the post-late Cretaceous igneous activity and mineralization in the southern part of South Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 15, 123-154.(韓国語, 英文要旨)
- Moon, H.S. (1975): A study on genesis of alunite deposits of Jeonnam area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 8, 183-202.(韓国語, 英文要旨)
- Moon, H., Kim, Y.H., Kim, J.H. and You, J.H. (1990): K-Ar ages of alunite and sericite in altered rocks, and volcanic rocks around the Haenam area, southwest Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 23, 135-141.(韓国語, 英文要旨)
- ムアン, A.・オスボン, E.F.(宗宮重行訳)(1971): 製鉄製鋼における酸化物の相平衡. 技報堂, 東京, 240p.
- 長沢敬之助・M. クズヴァルト(1989): 工業原料鉱物資源. 修学館, 東京, 280p.
- 日本セラミック協会編(1989): セラミック工学ハンドブック. 技報堂, 東京, 2521p.
- 小田中眞一郎(1994): 耐火物原料の時空的考察. 耐火物, 46, 106-115.
- Park, H.B., Park, B.Y., Shin, S.E. and Huh, M. (1988): A study on the ceramic and clay mineral resources and its genesis in Cheonnam province and Hadong area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 21, 1-15.(韓国語, 英文要旨)
- Sang, K.N. (1992): Genesis of kaoline-pyrophyllite deposits in the Youngnam area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 25, 101-114.(韓国語, 英文要旨)
- 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, 1992.
- 佐藤興平・石原文実・A. Vrublevsky・石原舜三(1993): Sikhote-Alin 南部の磁気異常分布と火成岩類. 地質ニュース, no. 470, 18-28.
- 柴田 賢・藤井紀之(1971): 岡山県三石地区のろう石鉱床の研究—第2報 八木鉱山産セリサイト鉱の K-Ar 年代—. 地調月報, 22, 575-580.
- 柴田 賢・神谷雅晴(1974): 山口県阿武地区ろう石鉱床の K-Ar 年代. 地調月報, 25, 323-330.
- Shimazaki, H., Sato, K. and Chon, H.T. (1981): Mineralization associated with Mesozoic felsic magmatism in Japan and Korea. Mining Geol., 31, 297-310.
- 須藤定久・吉井守正・平野英雄・神谷雅晴・古宇田亮一(1992): 日本及び隣接地域鉱物資源図. 日本地質アトラス(第2版), 地質調査所, 1992.
- Virta, R.L. (1993): Talc and pyrophyllite-1992. U.S. Bureau of Mines, Annual Report, 10p.
- 渡辺禎三・石山大三・水田敏夫・松葉谷治・石川洋平(1994): 広島県矢野勝光山西山東パイロフィライト鉱床の生成機構. 資源地質, 44, 111-123.
- Xu, K., Sun, N., Wang, D., Hu, S., Liu, Y. and Ji, S. (1984): Petrogenesis of the granitoids and their metallogenic relations in South China. In: Xu, K. and Tu, G. eds., Geology of Granites and their Metallogenic Relations, Science Press, Beijing, 1-32.

SATO Kohei, KIM Moon Young, ZHU Jinchu and KAMITANI Masaharu (1994): Pyrophyllite deposits in East Asia.

<受付: 1994年6月7日>