

■ シリーズ特集 ■

明日を支える資源(18)

長石資源の現状と将来

Feldspar Resources : Present and Future

正 路 徹 也*

Tetsuya Shoji

1. はじめに

シリカとアルミナを主成分とするセラミック材料に、ナトリウムやカリウムなどのアルカリを加えると、融点が下がるとともに、できた融体の粘性が小さくなる。このため、ガラスを産物とする製品においては、均質なガラスが得られる。焼結体産物の生産においては、焼結性を高めることができる。このためのアルカリ原料として、長石が使われる。

ところで、上記の目的のためのアルカリ原料は、必ずしも鉱物としての長石である必要はない。アルカリに富む原料であれば、他の物質でもよい。実際は、長石に富むアプライト、カリウム濃度の高い風化花崗岩や閃長岩も長石と同様に利用される。鉱業統計上、これらの物質は必ずしも十分に区別されていない。したがって、ここでは一括して長石資源として扱う。厳密な意味で長石精鉱と呼べるものには、ペグマタイト産長石と、浮選産物の長石がある。ペグマタイト産鉱物は結晶が大きいのので、手選により容易に長石を他の鉱物から分けることができる。アプライト、風化花崗岩、閃長岩から良質の長石を得るためには、浮選による分離が行われる。

日本の長石資源については岡野^{2,3)}が、世界の長石資源についてはRobbins⁵⁾が詳しい解説を行っている。また、「日本の窯業原料」¹⁾には、長石を始めとする多くの非金属鉱床の概要がまとめてある。以下の解説は、これらに負うところが大きい。

2. 長石と準長石

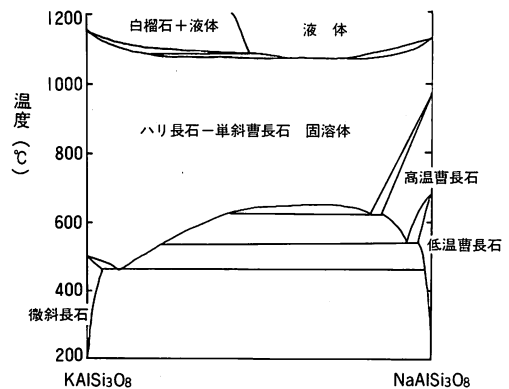
珪酸塩鉱物は、1個の珪素の周囲に4個の酸素が配位した $[\text{SiO}_4]$ 四面体を基本構造とする。この $[\text{SiO}_4]$ 四面体が角を共有して3次元的骨格構造をなす鉱物を、テクト珪酸塩という。その代表的鉱物が石英(SiO_2)である。 $[\text{SiO}_4]$ 四面体の中心に存在する Si^{4+} は、イオン

半径の似た Al^{3+} により置換される。このとき生じる電荷の不足を補うために、格子の構成要素として、アルカリあるいはアルカリ土類元素が結晶構造内に入る。これが長石および準長石である。

2.1 長石

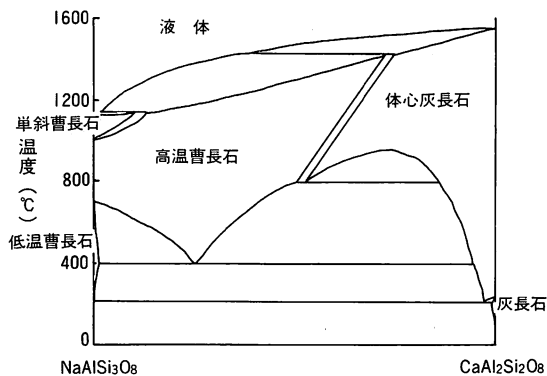
地殻を構成する長石のほとんどは、正長石($\text{KA1-Si}_3\text{O}_8$)、曹長石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、灰長石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)を端成分とする3元系のうち、正長石-曹長石系(アルカリ長石)と、曹長石-灰長石系(斜長石)に限られる。稀に産する鉱物としては、灰長石のCaをBaで置換したセルシウス長石($\text{BaAal}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)や、Srで置換したスローソン長石($\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)がある。

アルカリ長石の両端成分間は、高温では完全固溶体をなすが、低温ではKに富む相と、Naに富む相に分かれる(図-1)。このため、カリ長石を母晶とし、ソーダ長石を客晶とする離溶構造が見られる。これをペルト石という。アルカリ長石は、4個の四面体のうち、3個が $[\text{SiO}_4]$ で、1個が $[\text{AlO}_4]$ である。カリ長石において、Alが4個の四面体のうちある特定の1つの位置のみを占める場合、これを微斜長石という。また、特定の2つの位置に、それぞれ1/2の確率で入る場合を正長石、すべての位置に1/4の確率で入る場合をハリ長石という⁶⁾。これらの鉱物の安定領域は、それぞ

図-1 アルカリ長石の相図⁸⁾

* 東京大学工学部資源開発工学科助教

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

図-2 斜長石の相図⁹⁾

れ、200°C、500°C、800°Cと考えられている(図-1)。ソーダ長石も同様の変化をする。しかし、それぞれの安定温度が高温側にずれているため、天然のソーダ長石のほとんどは低温型である。

斜長石の相図は複雑である(図-2)。しかし、実際には、両端成分間に完全固溶体が存在すると考えておいて差し支えない。その融点は、灰長石成分に富むほど高くなる(図-2)。

2.2 準長石

カリ長石は、1,150°Cで白榴石(KAlSi_2O_6)と融体に分解する(図-1)。白榴石の化学式は、カリ長石から SiO_2 を1 mol取り去った形をしている。さらに1 mol引いた形の化学式を持つ鉱物を、カルシライト(KAl-SiO_4)という。カルシライトのKの3/4をNaで置き代えた鉱物を霞石($\text{KNa}_3\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$)という。これらはすべて、長石と同様に3次元骨格構造を取り、準長石と呼ばれる。準長石は、相対的にシリカが少なく、アルカリに富む岩石の構成鉱物となる。

白榴石のKをLiで置換した鉱物をペタライト($\text{Li-AlSi}_2\text{O}_6$)という。ペタライトは良質のリシウム源として、陶磁器やガラスの原料になる。

3. 用途

長石は、1) アルカリおよびアルミナを供給する工業原料、および2) 貴石あるいは石材として使われる。

3.1 工業用原料

工業原料としての長石の最大の用途は、ガラス原料である。通常の板ガラスや瓶ガラスは Al_2O_3 を2%、 Na_2O を14%、 K_2O を1%含む。長石は、このためのアルミナおよびアルカリ供給源となる。アルミナは、ガラス融体の作業性を高めるとともに、生成したガラスの化学的安定性を増す。ガラスに次ぐ長石の用途は、

陶磁器原料である。良質の長石は、陶磁器の釉薬として使われる。一方、純度の落ちる長石は、白素地として使われる。素地中で、長石は石英などの粒子を結びつけるフラックスの役割を果たす。さらに純度の低い長石は、タイル用に供される。その他、建材、骨材、ペンキや石鹼の充填材、研磨材としても使われる。近年、溶接用フラックスとしての用途も注目されている⁵⁾。

3.2 貴石と石材

微斜長石には、青色を呈する変種がある。これを天河石という。また、ある種のペルト石は、離晶面に平行にカットすると、美しい閃光効果が現れる。このようなペルト石を月長石という。青色の閃光を発する種が好まれ、装飾用に使われる。この閃光は、正長石と曹長石の薄層が交互に規則正しく配列することによって生じる光の回折現象と考えられている。

Ca/Na比が1よりやや大きい斜長石でも、同様の閃光が現れることがある。図-2で明らかなように、この組成の斜長石は、ペルト石と同様に2相の混合物である。このような斜長石のみからなる斜長岩を切断して、表面を研磨すると、各結晶粒子がそれぞれ独立の結晶方位をもって、神秘的な独得の光を放つ。このため、墓石や石碑に利用される。

建設用石材として、日本では花崗岩(御影石)、凝灰岩(大谷石)、安山岩、石灰岩(大理石)が広く用いられている。このうち、花崗岩は強度、硬度、美観の点から最良の材料である。花崗岩の主要構成鉱物であるカリ長石は、しばしば赤味を帯びている。このような花崗岩は特に美しく、建物の化粧用石板として使われる。日本では、岡山県の万成花崗岩が有名である。フィンランドおよびスウェーデンの先カンブリア盾状地に産するラバキピ花崗岩のカリ長石は、特に濃い赤ないし赤褐色を呈する。このカリ長石は周囲を細粒の斜長石に取り巻かれて、全体として卵型をした大きな斑晶を構成している。一方、石基は石英、カリ長石、斜長石、黒雲母、角閃石からなる。この色および岩石組織上の特徴のために、非常に美しく、最良の建築用石材となる。

4. 長石に富む岩石

表1に、有色鉱物の量および珪長質鉱物の量比にもとづく、火成岩の分類を示す。また、図-3と図-4に、それぞれ、日本および世界における主な長石鉱床の位置を示す。

図-2をもとに、斜長石組成の融体から斜長石の結晶

表1 火成岩の分類 (深成岩)

		珪長質岩	中性岩	苦鉄質岩
苦鉄質鉱物の量		20	40	70 %
白 色 鉱 物	石英 + 長石	$Kf > Pc$ $Kf < Pc$	石英閃緑岩 (安山岩)	石英斑れい岩
	花崗岩 (流紋岩) (石英安山岩)	花崗閃緑岩 (石英安山岩)		
	長石	$Kf > Pc/2$	$Kf > 2Pc$ $Kf < 2Pc$	斑れい岩
	閃緑岩 (粗面岩)	モンソニ岩	閃緑岩 (安山岩)	斑れい岩
長石 + 準長石	霞石閃長岩	霞石モンソニ岩	エセックサイト	

Kf=カリ長石の量, Pc=斜長石の量, ()内は噴出岩

が析出する過程を考えてみる。この際、生成した斜長石は残液と一切反応せず、系外へ取り出されるものとする。このような条件では、温度の低下につれて、1) 残液は次第にナトリウムとシリカに富むようになり、2) それにともなって、後期生成の斜長石ほどその組成は曹長石に近くなる。この傾向は、火成岩全般についても当てはまる。マグマから晶出する結晶は、初期ほど鉄やマグネシウムに富む苦鉄質の有色鉱物であり、残液は次第にSiO₂、K₂O、Na₂Oに富むようになる。このため、火成岩全体としてみると、苦鉄質鉱物の量は、MgO、FeOの量とは正の相関を、SiO₂、K₂O、Na₂Oの量と負の相関を示す。

4.1 ベグマタイトとアラスカイト

花崗岩質マグマが固結するにつれて、残液はさらにSiO₂やK₂Oに富むようになるとともに、固相中に入りにくいH₂OやFなどの揮発性成分にも富むようになる。この時期をベグマタイト期という。ベグマタイト期には、新たな結晶粒子が形成されることは稀で、既存の結晶のみが大きく成長する。このような大きな結晶の集合した岩石をベグマタイトという。ベグマタイトには、しばしば、巨大な結晶が入り組んだ文象組織が見られる。ベグマタイトは花崗岩形成の最終産物である。したがって、ベグマタイトは花崗岩底盤や岩株中に塊状岩体として産する。また、残液が、母岩である花崗岩や、周囲の岩石中に入貫することもある。このときは、ベグマタイト岩脈が形成される。

塊状ベグマタイトでは、花崗岩が次第に粗粒になって、やがて文象組織を示すベグマタイトとなる。その中心部にはしばしば晶洞があり、石英、長石、黒雲母、白雲母の巨大結晶が得られる。長石は正長石ないし微斜長石、あるいはペルト石である。ベグマタイトは、しばしば、錫、リシウム、ベリリウムを含む鉱物を伴い、これらの鉱床ともなる¹¹⁾。

福島県の白岩と石川、広島県の山三、島根県の城

山と馬谷、佐賀県の杉山などが日本の有名なベグマタイト鉱床である(図-3)。世界にも多くの鉱床がある(図-4)。その中でも、オーストリアからイタリアへかけてのアルプス地方、スペインとフランスの国境、ブラジルのミナス・ジェラエス州北部に大きな鉱床がある。これらのベグマタイト鉱床の分布域は、当然、花崗岩地帯に限られる。ベグマタイト鉱床からは、長石以外に、石英や雲母が生産されている。否、大概の場合は、石英の副産物として長石が回収される。

石英と長石からなる優白質の岩石をアラスカイトという。前世紀には、米国のアラスカとネヴァダで、金を伴うアラスカイトが多数発見され、ゴールドラッシュの一因となった。ベグマタイトから石英脈への移行部にも、しばしばアラスカイトが見られる。アラスカイトも、重要な長石の供給源となる。

4.2 アプライト (半花崗岩)

アプライトは、微粒の石英と長石を主成分とする脈状岩石である。単純には、ベグマタイトマグマが急冷されて生成した岩石と考えればよい。一般に、脈幅は狭く、数cmから、広くても1~2mである。これらの岩脈が、数本ないし数十本集まって、岩脈群を形成することがある。また、アプライト脈周辺で、花崗岩がアラスカイトのような優白質岩に変わっていることがある。このようなところは、アプライト鉱床として、採掘される。鉱業統計では、これらを半花崗岩と一括している。主成分鉱物の長石は、ベグマタイトと同じくカリ長石である。しかし、しばしばペルト石や曹長

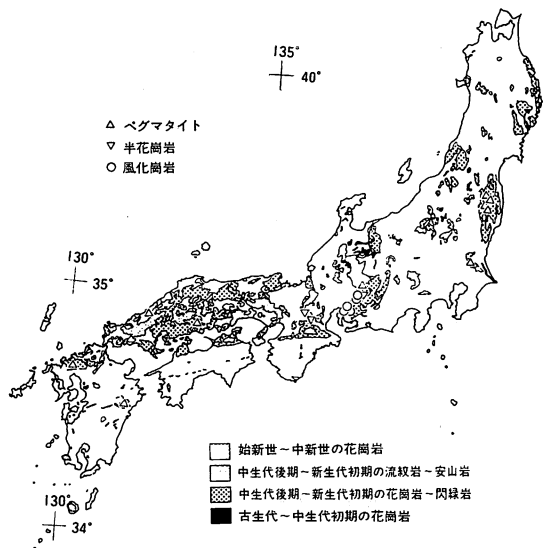


図-3 日本における珪長質および中性火成岩の分布と、主な長石鉱床の位置

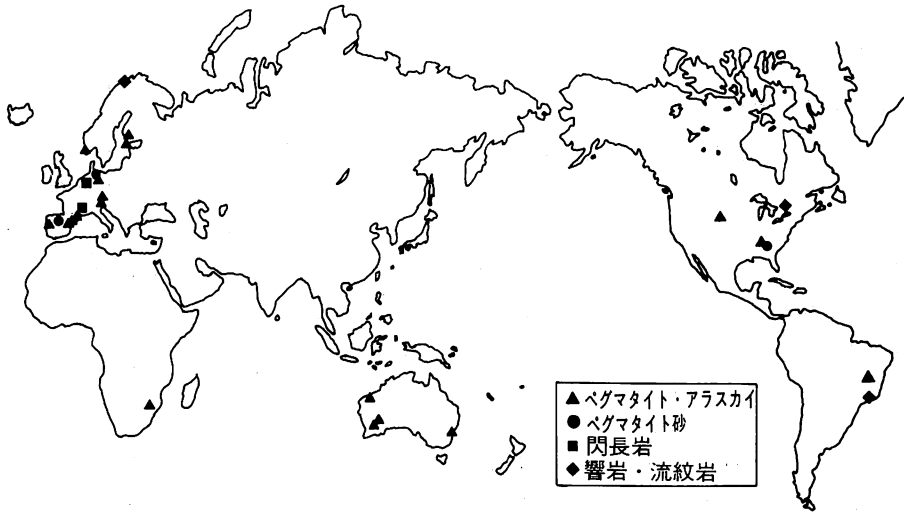


図-4 世界における主な長石鉱床の位置

石も存在する。随伴鉱物としては、少量の黒雲母や白雲母以外に、ザクロ石や螢石を伴うこともある。群馬県の御座入、岐阜県瑞浪市の釜戸地区、滋賀県南部の信楽地区でアプライト鉱床が開発されている(図-3)。

4.3 風化花崗岩(サバ)とペグマタイト砂

花崗岩が風化されると、石英や長石などの各結晶粒子が単体分離される。この砂状の風化産物を、サバと俗称する。花崗岩の地表露頭ならば、サバはどこでも多かれ少なかれ観察される。愛知県の小原、岐阜県の明智、長野県の南木曾(図-3)では、このサバを陶磁器用のカリウム原料として採掘している。サバは砂状のため、採掘および選鉱が容易に行える。サバの長石は、多かれ少なかれカオリン化している。

西ドイツ、イタリア、スペイン(図-4)では、ペグマタイトに由来する長石の砂が回収されている。この長石も、風化作用を受けているため、カオリン化している。

4.4 アルカリ岩

アルカリ長石を主成分とする岩石を閃長岩という。石英はほとんど存在しないか、皆無である。特にアルカリ成分に富む岩石では、霞石を含む。これを霞石閃長岩という。これらアルカリに富む岩石をアルカリ岩と総称する。

日本の閃長岩は、花崗岩に伴う小岩体として、局所的に産するのみである。このため、資源としての重要性はない。これに対し、世界的には、閃長岩は重要な長石の供給源である(図-4)。例えば、カナダのBlue Mountain 鉱山(Nephton 鉱床)は、50万t/年規模の

霞石閃長岩を生産している⁵⁾。この量は、世界の長石生産量(図-6)の約10%に相当する。

アルカリ岩岩体は一般にあまり大きくないので、その分布を図-6のような小縮尺の地図に示すことはできない。この岩石は極端にアルカリに富み、特殊な地質状況の場所に産する。このため、世界的によく研究されている岩石である。これらの研究⁷⁾を参照することによって、アルカリ岩の分布地を知ることができる。なお、希土類などの供給源となるカーボナタイトはアルカリ岩に伴う¹⁰⁾ので、この点からも重要な岩石である。

閃長岩や霞石閃長岩に相当する噴出岩である響岩や粗面岩も長石資源となる。福島県滝谷鉱山は、変質した粗面岩を採掘している。

4.5 曹長岩と斜長岩

蛇紋岩中に、白色を示す岩塊が存在することがある。それらの大部分は、CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O系の鉱物を主とする。しかし、極めて稀に曹長石を主とする白色岩がある。これを曹長岩という。この曹長岩はナトリウムに富む。北海道の日高地方で、小規模な採掘が行われたことがある。曹長岩は、しばしばヒスイ輝石を伴う。このため、ヒスイ輝石の探査にとっては、重要な岩石である。

斜長岩は、斜長石を主とする超塩基性岩石である。盾状地あるいは卓状地に見られる層状火成岩の主要構成岩の1つとなる。この層状火成岩には、白金鉱床やクロム鉄鉱床が伴うので、探査状重要である。しかし、石材として利用される以外、長石資源としての開

発例は少ない。ノルウェーの南西部では、研磨材用に斜長岩が採掘されている。

5. 生産量と今後の見通し

ここでは、工業用原料としての長石およびそれに富む岩石のみを考える。

日本における長石類の生産量は、図-5に示すように、この10年間で急増している。この急増に最も貢献しているのが、風化花崗岩である。すなわち、1979年の17万t/年から、1985年の66万t/年まで、その年平均増加率は約15%に達する。また、半花崗岩（アプライト）の生産量も、1975年の32万t/年から、1985年の50万t/年まで、平均年率約5%で増加している。これに対し、長石の生産量は、2万t/年と5.5万t/年の間で変動している。全体としてみると、やや減少気味であろう(図-5)。これは、良好なペグマタイト鉱床が新たに発見されていないことに起因する。

世界における長石の生産量の推移を図-6に示す。1975年の約300万t/年から、1985年の430万t/年まで、平均年率4%で生産量が伸びている。但し、図-6の統計には注釈が必要である。この数字は米国鉱山局発行の「鉱物年鑑 (Minerals Yearbook)」から取った。この年鑑では、長石を半花崗岩や霞石閃長岩と一応区別している。しかし、各国が統計を発表するときの長石鉱床に対する定義が異なるため、純粹の長石と、長石や準長石に富む岩石とが混在している可能性がある。例えば、日本の生産量は、図-5と比較すれば明らかな

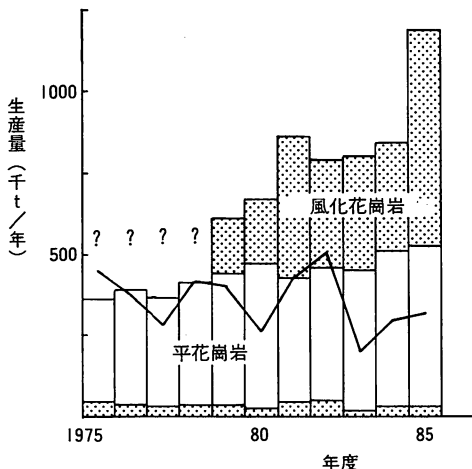


図-5 日本における長石(下), 半花崗岩(中), 風化花崗岩(上)の生産量の推移 (通産省発行「本邦鉱業の趨勢」による)。折線は、長石の生産量を10倍した値

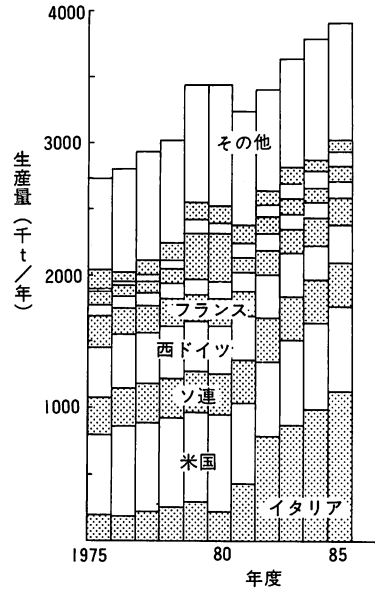


図-6 世界における長石の生産量の推移 (米国鉱山局発行「鉱物年鑑」による)。1985年の生産量の多い順に下から並べてある。フランス以下は、ブラジル、スペイン、韓国、メキシコである。

ように、長石のみである。これに対して、もっとも大きな生産量の伸びを記録しているイタリアでは、その増加量の大部分が半花崗岩と長石質砂である⁴⁾。実際、別の統計⁵⁾では、日本の1984年における生産量が46万t/年となっており、半花崗岩を含めた数字(図-5)に一致する。

過去10年間における日本の長石およびそれに関連する岩石の輸入量は、0.5~1万t/年(大蔵省輸出入統計)である。この量は、わが国におけるそれらの生産量の1%弱に過ぎない。

世界においても、日本においても、長石の生産量はかなりの伸びを示している。一方、良質の長石を供給することができるペグマタイト鉱床の発見は限られている。したがって、世界的には閃長岩が、日本では風化花崗岩が今後一層活発に開発されるであろう。図-3に示してある珪長質ないし中性の火成岩はすべて、日本にとっての潜在的長石資源である。しかし、風化花崗岩について考えてみると、その将来は楽観的でない。なぜならば、1)愛知・岐阜・長野の県境付近など、良質で採掘し易い風化花崗岩は、現在急速に採掘が進められて、次第に残存鉱量が少なくなっていると、2)これら良質の風化花崗岩を産する地域の多くは丘陵地帯をなしていて、土地利用率が高く、新たな開発が困難

である。長石類の現在の輸入量は極めて少ない。しかし、今後は漸次増加するであろう。現在、輸入量の50%を中国に依存している。ところで、マレー半島を中心とする錫鉱床は、風化花崗岩地帯に分布する。錫鉱物の副産物として、長石を回収できると、この地帯は長石資源の有力な供給地となる。そのためには、消費地である日本までの輸送費に見合うだけの低価格で長石を生産しなければならない。

「鉱物年鑑」のリシウムの章の生産量統計では、ブラジルのみが鉱物種毎に分類してある。それによると、ブラジルにおけるペタライトの生産量は、1977年が約1,000t/年で、1978年が約2,000t/年と、ここで倍増している。その後、1983年まで同じ水準を保ち、1984年から約500t/年と急減している。1985年におけるリシウム生産量の多い国は、ソ連(約6万t/年)、ジンバブウェ(約2.8万t/y)、中国(約1.6万t/年)である。しかし、これらの国における鉱物毎の生産量は不明である。ペタライトの生産量が伸びるかどうかは、リシウムの消費量とともに、他のリシウム鉱物の生産量の伸びに大きく関わっている。

6. おわりに

長石は、工業用原料として余り重要な位置を占めていない。しかし、その消費量は着実に伸びている。今後良質なペグマタイト産長石の確保は、次第に困難になるであろう。したがって、アプライト、風化花崗岩、閃長岩からいかにして良質の長石を回収するか、あるいはそれらをそのままの状態できかに有効に使うかが今後の課題である。いずれにしても、他の鉱物資源と同様、長石についてもその安定確保の方法を考えておかなければならない時にきている。

謝辞：東京大学工学部武内壽久 禰教授と、地質調査所の元鉱床部長岡野武雄氏は原稿を読んで有益な助言を下された。記して、感謝の意を表する。

参考分 献

- 1) 工業技術連絡会議窯業連合部会；日本の窯業原料(1978), 名古屋工業技術協会。
- 2) 岡野武雄；わが国の長石資源, セラミックス, 3巻, 12号(1968), 992~998。
- 3) 岡野武雄；日本の工業原料としての非金属鉱物(1), 地学雑誌, 92巻, 5号(1983), 344~364；同(2), 同巻, 6号(1983), 392~408。
- 4) Potter, M. J. ; Feldspar, Nepheline Syenite, and Aplitite, Minerals Yearbook 1983, vol. 1(1984), 325~332, U. S. Bureau of Mines.
- 5) Robbins, J. ; Feldspar and Nepheline Syenite, Industrial Minerals, September(1986), 69~101.
- 6) 例えば, 正路徹也；X線粉末法によるアルカリチョウ石の組成および構造(Al/Si秩序無秩序)の決定, 鉱物学雑誌, 10巻, 6号(1972), 413~425。
- 7) 例えば, Sørensen, H. ed. ; The Alkaline Rocks(1974), John Wiley & Sons.
- 8) Smith, J. V. ; Feldspar Minerals, vol.1(1974), Springer-Verlag.
- 9) Smith, J. V. ; Phase Relations of Plagioclase Feldspar, Feldspars and Feldsparthoids (ed. W. L. Brown ; 1983), 55~94, D. Reidel Pub. Co.
- 10) 詳しくは例えば, 武内壽久 禰；カーボナタイト鉱床(I), 鉱山地質, 23巻, 5号(1973), 367~382；同(II), 同巻, 6号(1973), 437~451。
- 11) 詳しくは例えば, 武内壽久 禰, 兼平慶一郎, 小村幸二郎, 鞠子正；錫, タングステン, モリブデン鉱床, 鉱山地質, 35巻, 5号(1985), 355~373；リチウム, ベリリウム, ニオブ, タンタル, 希土類, ジルコニウム・ハフニウム鉱床, 鉱山地質, 36巻, 4号(1986), 291~312。

