

資 料

553.2.061 : 549.02 : 536.7

外的条件と鉱物組成の相関関係*

D. S. Korzhinskii

小 西 善 治 訳

多重成分系の化学ポテンシャル図

化学ポテンシャル図は、2つの平衡内包因子と物質系の状態との相関関係を表わす図の特定の場合が示されてある。

この種の図では、温度—圧図が最もよく知られている。 $k+2$ 相の各共生成成分 k の物質系では、Gibbs の法則により不変系であつて、 $p-t$ 図の一定の点に対応する。相中1相が消滅する条件下では、残存 $k+1$ 相の共生関係は、1変系となる。すなわち $p-t$ 図では、不変系点からでる2~3の曲線に対応するはずである。一般的な場合には、 $k+1$ 相と異なる共生関係の $k+2$ が求められるであろう。すなわち不変系点からは、スクレイネマケルス束と呼ばれる反応束を形成する $k+2$ の1変系平衡曲線がでるはずである。2曲線束間の場合は、圧力および温度条件に対応し、この場合には、安定する共生関係を示す与えられた物質系では、 k 相以上は同時的に存在できない。各場に対しては、モデルあるいは図表で表わされる k 成分含量の相関関係と相組成との間に同意義的対応がみられる。したがつて各場には、1の定鉱物相が対応するといえよう。

1変系に対する $p-t$ 図の構成特性は、Skrejnemakers が数学的、物理化学的観点から詳しく研究した。Niggli のよく知られている著書は、スクレイネマケルスの方法を地質学者のために書いたものである。

$p-t$ 図を作成するには、全1変系反応の温度、容積効果を知ることが必要である。しかしこのような諸効果は、少数の1変系反応についてのみ知られている。したがつて $p-t$ 図の広範な適用可能性は制約される。さらにこの種の図の作成に関する問題に戻らう。

1変系における鉱物の共生関係を研究する場合に、大きな意味をもつものは、反応系の2成分の化学的ポテンシャル値が座標軸にそつて投影されている物質系図である。 $p-t$ と類似化学的ポテンシャルは、内包パラメータの形をとるから、化学ポテンシャル図は、 $p-t$ 図と同一の構造をもつている。一般的にいえば、座標としては、任意の2成分ポテンシャルが選ばれるであろう。しかし与えられた岩石が生成される場合に、全移動性となるような成分の化学的ポテンシャルと共生現象との相関関係を示す図がとくに有用である。

2全移動成分のポテンシャルによつて左右される虚不動成分 k_i 系の共生現象をみてみよう。たゞし任意の数値 $p-t$ および他の全移動成分 μ は一定とする。この場合には2種の全移成分 $f-g$ の化学的ポテンシャルは変わるが、残りの外的条件は、不変と考えられるから、相律により次式が求められる。 $n=k_i+2-\phi$ 、したがつて極大鉱物数は k_i+2 となる。 $\mu_f-\mu_g$ 図でこのような鉱物数をもつ各共生関係は1変系エレメント点に対応し、その点から、一般には k_i+1 鉱物の各共生関係に対応する k_i+2 1変系曲線がでる。 k_i 鉱物数をもつ共生現象は、2

* Д. С. Коржинский: Физико-химические основы анализа парагенезисов минералов, Глава IV, Зависимость минерального состава от внешних условий, p. 126~151, Издательство академии наук СССР, 1957

この訳文は地質調査所月報, 第10巻, 第12号, p. 75-(1111)~94-(1130)の続きである。

変系である。この2変系は変系曲線間の場に対応する。各2変系の場では、不動成分との相関関係によつて鉱物相の組成が異なってくる現象は、特別のモデルまたは図で表わされるのであろう。最も明白に表わされる場合は、3虚不動成分のみが反応系中に存在するような $\mu_f - \mu_g$ 図である。この場合には、各2変系の場の共生関係は、普通の三角組成図——3不動成分比によつて異なってくる——で示すことができるであろう。

3虚不動成分 a, b, c からなる(反応)系では、 μ_f と μ_g の全移動成分の化学的ポテンシャルの値が一定で、そのうえほかの外的条件が不変で、かつ自発的 (voluntary) である場合には、5種鉱物までの共生が可能である。いま5種鉱物 $A+B+C+D+E$ の共生平衡が観察によつて確認されたとしよう。この種の共生鉱物は、 $\mu_f - \mu_g$ 図では一定の点に対応する。この点からは、次の5つの(組合せ)4種鉱物共生関係の存在可能性を示す5線がでる。 $B+C+D+E, A+C+D+E, A+B+D+E, A+B+C+E, A+B+C+D$ この5つの組合せの共生は、 A, B, C, D, E の1種物ずつを5種物共生関係から逐次消去して求められる。この1線中間の場では、3種以下の鉱物が同時的に安定である。4種物曲線によれば、1つの場からほかの場へ移行する場合に完了される反応平衡条件が与えられる。4種物曲線の方向性を求めるためには、対応反応の方程式をつくるべきである。いま過渡反応方程式は、 $a'A+b'B+c'C+d'D+(f'f)+(g'g)=0$ (こゝで a', b', c', d', f', g' の係数は正の部分と負の部分を示すものとする) である。4種物平衡が維持されるためには、質量法則により次の条件が必要となる(方程式(46)、地質調査所月報、第10巻、第11号、p. 95—(1035)参照)。

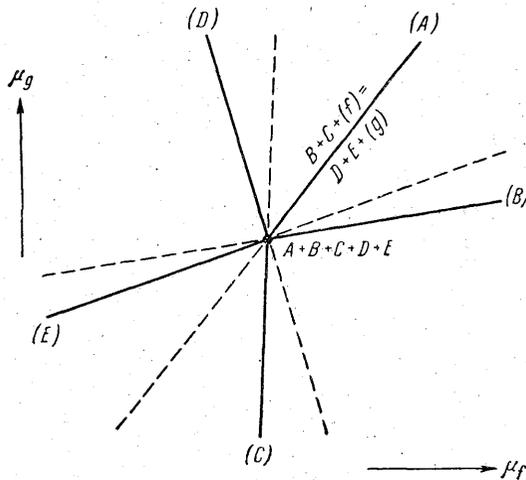
$$f'd\mu_f + g'd\mu_g = 0 \quad \text{または} \quad -\frac{d\mu_g}{d\mu_f} = -\frac{f'}{g'}$$

この方程式によれば $\mu_f - \mu_g$ 図で $A+B+C+D$ の4種物線の方向が求められる。この種反応では、またほかの全移動成分の吸収を伴なう。しかし条件的には、化学的ポテンシャルは不変であるから(ポテンシャルの微分値は0に等しいから、方程式(46)から除かれる(地質調査所月報、第10巻、第11号、p. 95—(1035)参照)、化学的ポテンシャルは、平衡線の方向に影響を与えない。 $d\mu_g : d\mu_f$ の比は f および g 成分が反応の際に同時に吸収されるならば、負となるが、1成分の吸収が他成分の析出を伴なうならば、正となるであろう。

化学ポテンシャル図では、不変組成の鉱物間の反応に対する平衡線は、直線となるであろう。この場合には、全移動成分の化学的ポテンシャルの変化は、反応に基づく吸収または析出成分量に影響を及ぼさないからである。可動組成の鉱物間に起る反応では、全移動成分 f と g との化学的ポテンシャルの変化が鉱物中における含量変化を誘起し、反応に干渉する成分量が変わってくるから、曲線となるであろう。

一般的な場合には、各反応曲線は、東の中心となる不変(系)点の一方の側にもみ有効である。Skrejnemakers の提案によれば、括弧中に含まれている鉱物のシンボル——所与の線に対する反応に干渉しないような鉱物——で、1束の各不変系線を表わしている。このような場合には、 $B+C+D+E$ の平衡線は (A)、 $A+C+D+E$ 等 (B) で表わされる。したがつて1種以上の鉱物部分が反応に干渉しない特殊の場合が可能となる。このような場合だけ、平衡曲線が反応東の中心から両側に沿う領域で安定となる。

次に (A) 反応線をつくつてみよう。(A) $b'B+c'C+f'f=d'D+e'E+g'g$ 、こゝではすべての係数は正である。Le chatier の法則により、増大側 μ_f および減少側 μ_g の平衡線上では、 $D+E$ 共生が安定となるが(第73図)、平衡線のほかの側では $D+E$ 共生は不安定となり、その代りに $B+C$ 共生が安定となる。(B) $=A+C+D+E$ および (C) $=A+B+D+E$ 平衡では、 $D+E$ 共生が干渉する。したがつて (B) および (C) 東の安定部分は、 $D+E$ の半面——東線の右下——にあるはずである。(D) と (E) の平衡線の相似の安定部分は $B+C$ の半面(第73図)にもあるはずである。このような配列規則(スクレイネマケルスの法則)は、任意の東線に関して守らなければならない。

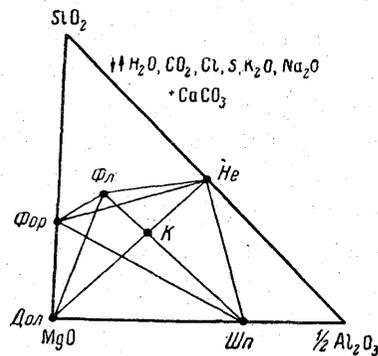


第 73 図 Skrejnemakers の法則による不変点周辺の 1 変系反応線の安定部分の配列状態を示す。B+C の共生鉱物は (A) : B+C=D+E の平衡線より左側上部で安定であるから、1 変系共生(鉱物)(B) および (C) の平衡線の安定部分は (A) 線より右側下部に位置している

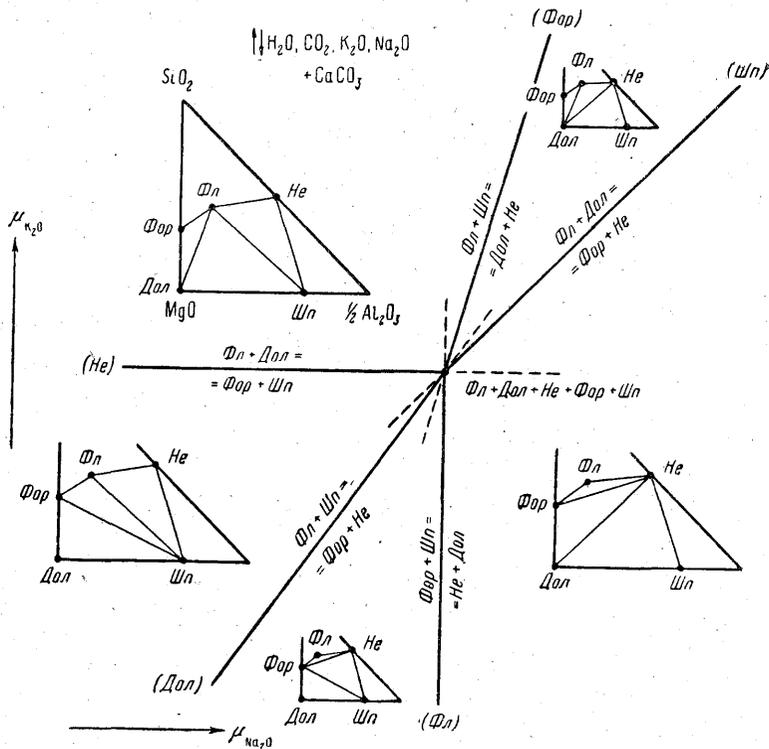
1 例として、南部沿海州の古代の天藍石鉱床にみられる変成岩をあげておこう。この種鉱床の生成過程では、完全移動挙動は、 H_2O , CO_2 , Cl , S , SO_3 , K_2O , Na_2O にみられる。最初の 2 成分は、徐々にポテンシャルが一定となるが、他の成分は、徐々に変動を示す。 Cl , S , SO_3 のポテンシャルの変動は、ある場合には、 Cl , S , SO_3 が十分に高ポテンシャルでないために天藍石および藍方石の代りに霞石が生成されることをみても明らかである。単純な例としては、 Cl , S , SO_3 成分が系に含まれていない時に霞石が生成される場合があることに留意すべきであろう。カリおよびナトリウムのポテンシャルの変動は常にみられ、共生関係の変化に表われている。

カリウムおよびナトリウムのポテンシャルは、共生鉱物の型を決定する要因にあげられる。上述の変成岩は、大理石中に存在し、方解石を含んでいるかまたは方解石で飽和されているので、カルシウムは、過剰成分である。鉄は、この種の岩石類中では、類質同像混合物としてきわめて僅か含まれている。虚不活動成分としては、 Al_2O_3 , SiO_2 , MgO があげられる。したがって本例では、成分の挙動として次のことが考えられる。(1) 不変のポテンシャルをもつ全移動成分— H_2O , CO_2 ; (2) 仮想全移動成分— K_2O , Na_2O ; (3) 過剰全移動成分— CaO ; (4) 虚不活動成分— Al_2O_3 , SiO_2 , MgO ; (5) p と t とが不変である。

この条件に対して、交代(飽和)方解石中にみられるカリおよびナトリウム——沿海州の原生代岩石中に発達している——の全ポテンシャル値に対応する 1 変系線束図を作成した。ここでは、多数の鉱物をもつ共生関係、すなわち白雲石(Dol) + 尖晶石(Sp) + 霞石(Ne) + 金雲母(Phl) + 苦土カンラン石(For)の共生関係に対応する 1 点のみをあげておく。すでに指摘しておいたように、このような共生関係の安定性は、所与の片麻岩系の変成岩中にみられる共生関係を系統的に解析して確認される。



第 74 図 白雲石 Dol (Dol), 霞石 He (Ne), 金雲母 Phl (Phl), 苦土カンラン石 For (For), 尖晶石 Sp (Sp) の配列を示す



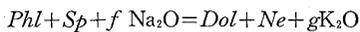
第75図 過剰カルシウムの条件下の3虚不動成分 MgO—1/2 Al₂O₃—SiO₂ をもつ多成分系に対する Na₂O, K₂O の化学ポテンシャル図。沿海州の原生代の交代天藍石鉱床の鉱物相

対象鉱物類は次の組成をもつ。

- 白雲石 (*Dol*) ····· MgO · CaO · 2CO₂
- 尖晶石 (*Sp*) ····· MgO · Al₂O₃
- 霞石 (*Ne*) ····· Na₂O · Al₂O₃ · 2SiO₂
- 金雲母 (*Phl*) ····· 2H₂O · K₂O · 6MgO · Al₂O₃ · 6SiO₂
- 苦土カンラン石 (*For*) ····· 2MgO · SiO₂

この種鉱物類の組成が 1/2 Al₂O₃—SiO₂—MgO 三角形図への配列は、第74図に示されてある。このような条件の下では、5種鉱物の共生関係は、不変系であつて、μ_{Na₂O}—μ_{K₂O} 図の若干点に対応する(第75図)。

各4鉱物共生は、不変点からでる束線に対応する。束線をひくためには、物質系の鉱物間に考えられる全反応の方程式をつくる必要がある。たゞし閉系条件では、不動成分関係、開系では全移動成分関係によつて反応式を求めるものとする。第74図では、各反応は、対鉱物を結び付ける2円錐の交点に対応する。したがつて *k* 点組成は、*Phl*+*Sp* かまたは *Dol*+*Ne* かの共生関係を表わしているであろう。すなわちこの種共生関係は、K₂O および Na₂O のポテンシャルによつて、次のような非可逆、可逆反応が可能であるからである。



Na₂O は霞石にのみ、K₂O は金雲母のみに含まれていることに留意するとともに、第74図の鉱物組成の相対的配列によれば、5種鉱物間の次の可能な反応方程式が求められる(たゞし CaO, H₂O, CO₂ の反応干与が Negligible とする)。

- 1) (*Ne*) $n^1_{Dol} Dol + n^1_{Phl} Phl = n^1_{For} For + n^1_{Sp} Sp + g^1 K_2O$
- 2) (*Phl*) $n^2_{Dol} Dol + n^2_{Ne} Ne = n^2_{Sp} Sp + n^2_{For} For + f^2 Na_2O$

資 料

- 3) (For) $n^3_{Dol}Dol + n^3_{Ne}Ne + g^3K_2O = n^3_{Sp}Sp + n^3_{Phl}Phl + f^3Na_2O$
- 4) (Dol) $n^4_{Sp}Sp + n^4_{Phl}Phl + f^4Na_2O = n^4_{For}For + n^4_{Ne}Ne + g^4K_2O$
- 5) (Sp) $n^5_{Dol}Dol + n^5_{Phl}Phl + f^5Na_2O = n^5_{For}For + n^5_{Ne}Ne + g^5K_2O$

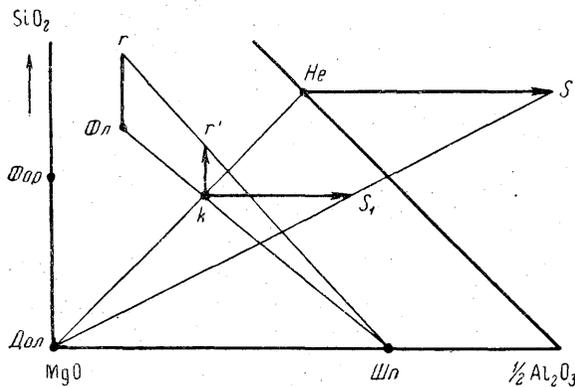
質量作用の法則により、4種鉱物平衡の1変系線の傾きを決定するためには、 glf 係数比を知ることが必要である。いま反応中に2仮想移動中1成分のみが反応に干与するならば、 glf 比は0に等しいかあるいは ∞ となる。すなわち $\mu_{Na_2O}-\mu_{K_2O}$ 図の対応化学平衡線は $f=0$ ならば水平となり、 $g=0$ ならば垂直となる。したがって (Ne) 反応に対する平衡線は、第75図では水平線であるが、Phl 線は、垂直線となっている。

2個の仮想全移動成分が反応に干与するならば、 f および g 値は、グラフまたは代数的方法によつて求めることができるであろう。

耗方眼紙上でグラフによる計算をするためには、5成分組成を投影できる補ヴィクトルをもつ成分図が利用できるであろう。第76図上には、(For)反応のグラフ計算例が示されてある。この図表では、所与の組成における $MgO-1/2 Al_2O_3-SiO_2$ の相関関係が与えられる点はヴィクトルで示され、その水平成分 (constituent) は任意のスケールの $Na_2O : (1/2 Al_2O_3 + SiO_2 + MgO)$ の分子含有量比に等しいが、垂直成分は、同一スケールの $K_2O : (1/2 Al_2O_3 + SiO_2 + MgO)$ 分子含有量比に等しい。Phl-r および Ne-s ヴィクトルは、金雲母および霞石における K_2O と Na_2O の含量(第76図)を表わす。Dol+Ne および Phl+Sp 円錐の交点 k は、この共生関係から構成される組成を表わす。Dol+Ne 共生の単位量では、 Na_2O 含有量は水平ヴィクトル ks' 長に等しい。Phl+Sp 共生関係では、 Na_2O の含量は0に等しいが、 K_2O の含量は、 kr' 垂直ヴィクトル長に等しい。したがって、この場合には3に等しい $ks' : kr'$ 線分比は、反応に干与する Na_2O+K_2O 量の比を直接与えるから、第75図の化学ポテンシャル図の1変系線の傾きの tangent が求められる。

$$(For) \quad d\mu_{K_2O} : d\mu_{Na_2O} = \frac{f}{g} = \frac{ks'}{kr'} = 3$$

この符号は (For) 反応では K_2O の吸収が Na_2O の遊離を伴うからで正となるであろう。



第76図 補ヴィクトルにより Дол (Dol) + He (Ne) + $gK_2O = \Phi_l$ (Phl) + Шп (Sp) + fNa_2O 反応における f と g 係数のグラフ決定
 $r = K_2O : (MgO + 1/2 Al_2O_3 + SiO_2)$ (金雲母), $s = Na_2O : (MgO + 1/2 Al_2O_3 + SiO_2)$ (霞石) をそれぞれ示す。

鉱物類が2箇の仮想全移動成分 (K_2O と Na_2O) を含むならば、グラフの作成は、若干複雑となる (この場合鉱物組成は、傾斜ヴィクトルで表わされる)。この場合には第76図におけるように、まず k 組成、すなわち2個の異なる鉱物共生中に存在する $1/2 Al_2O_3-SiO_2-MgO$ の3仮想不動成分の相関関係をみいだすことである。次いで、2組成ヴィクトルに対しては、別々にグラフによつて決定する。この場合には、転移前および転移後の組成中の K_2O の含量

を最初に決定し(この含量差は、 g 係数に相等している)次いで他の組成ヴィクトル、すなわち Na_2O に対しても類似の手続きで決定する。図の作成精度を引き上げるために、できる限り一層尺度を大きくとることが必要である。この場合組成ヴィクトルの方向性を変え、所与の反応計算に最適の配例を選ぶことが可能である。化学ポテンシャル図を作成するために、反応計算にグラフ法を用いることは、一般的には精度が落ちるが、代数的方法よりも一層実用的である。さらにグラフの方法は、変移組成鉱物——その組成は代数的計算の複雑で厄介な式で表わされる——が反応に干渉する場合にはとくに便利である。

代数的計算による場合には、方程式の2項を形成する共生鉱物の各想定不動成分の含量が平衡状態にあるとみなして、反応係数を算出しなければならない。一般的なこの種計算法は次章でとりあげる。最も単純な場合には、簡単な数値を試算的に設定して n 係数を選ぶことができる。 n 係数が決まれば、反応に干渉する過剰成分 (CaO) と全移動成分 (H_2O , CO_2 , K_2O , Na_2O) に対する係数は容易に選びだされる。とくに、(For) 反応に対しては、次の値が求められている。 $8\text{CaMgC}_2\text{O}_6$ (Dol) + 6NaAlSiO_4 (Ne) + (K_2O) + (8CO_2) + ($2\text{H}_2\text{O}$) = $2\text{H}_2\text{KMg}_3\text{AlSi}_4\text{O}_{12}$ (Phl) + $2\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (Sp) + 8CaCO_3 (Ka) + ($3\text{Na}_2\text{O}$)。

同様に、グラフまたは代数的に、残余の2反応に対する角係数が求められる。(Sp) 反応に対しては、 $d_{\mu_{\text{K}_2\text{O}}} : d_{\mu_{\text{Na}_2\text{O}}} = \frac{f}{g} = 1$ (Dol) に対しては $1/3$ に等しい。(Ne) 反応に対する対応比は0であるが、(Phl) に対しては ∞ となる。

次に不変系点のどの側に安定領域があるかによつて、各1変系系線に対して決めるべきである。最初に水平の反応線 (Ne) : $\text{Phl} + \text{Dol} = \text{For} + \text{Sp}$ を検討してみよう。この反応は、金雲母が形成されるために、カリウムの吸収が左方向に進行する。しかし上述のスクレイネマケルスの法則により、1変系線 (Dol と Phl) は、水平線以下で安定であるが、(For と Sp) の反応線は、その線以上で安定である。いま他の線、例えば垂直線に対する他の線をとつてみよう。Phl : $\text{For} + \text{Sp} = \text{Ne} + \text{Dol}$, $\text{Dol} + \text{Ne}$ この場で形成される $\text{Dol} + \text{Ne}$ 共生関係には、ナトリウムの吸収を伴うはずである。このような現象が発生するのは、この種共生が Phl 線より右側、すなわちナトリウムのポテンシャルの増加する側で平衡状態となるはずであるからである。そこで反応平衡 (For + Sp 平衡を含む) 線 (Ne) は、その線と Phl 線との交点から左側で安定となるはずである。このようにして各線束の方向が決定される。

5線束間(第75図)には、5つの2変系場があり、各変系場には鉱物組成間および3の想定不動成分 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$ 比との間に同一意味をもつ一定の対応が成立する。このような対応関係は第75図の各場に入る小三角形に三角形分割すると明らかとなる。したがつて各場は、一定の交代相に対応することになる。實際上、南沿バイカル地域の天藍石鉱床には、5相中4相に出会す。岩石中における鉱物の共生関係を観察すると第75図型の図表を基にして、この種岩石の生成される場合における全移動成分の化学的ポテンシャルの相対値について回答が求められる。例えば閃長岩と白雲石および苦土橄欖石との共生関係(第75図の右側の下方の場)では、カリの低いポテンシャル下できわめて高ポテンシャルで、ナトリウムがきわめて高いポテンシャルを示す。

1変系4鉱物共生 (Dol) : $\text{Phl} + \text{Sp} + \text{For} + \text{Ne}$ は、ある一定の値 $\mu_{\text{K}_2\text{O}}$ までカリのポテンシャルが低下する場合に安定である。このような場合には、さらに5(番目)鉱物、透輝石がこの種鉱物類に結合するから、線束 (Dol) は下方の新不変系点で終わり、その点から、5種の1変系線がそれぞれでている。Korzhinskii は、1947年に、原生代の飽和状態のカルシウムと少量の鉄分を含む高温岩石類に対して全図表 $\mu_{\text{Na}_2\text{O}} - \mu_{\text{K}_2\text{O}}$ を求めた。この図では、この岩石類に対して確認された極大鉱物数をもつ、6成分共生に対応する6不変(系)点の1変系線網が分割されている。例えば透輝石・尖晶石岩相では、溶液は最低のアルカリ値に対応する。金雲母鉱床の生成相には、原生地層中でのアルカリ度が、普通な相でとられるであろう。天藍石鉱床は作用溶液のアルカリ度がきわめて高いことで特色付けられる。この場合には、高ポテン

シャルはナトリウムばかりでなく、一般にカリもそうである。

上述の例では、一定圧下の交代作用について述べた。たゞし同時に安定した鉱物の極大数は、不動成分数に等しいものとする。交代作用が一定の容量の下で行なわれるならば、単位あたりの同時的に安定な鉱物の極大数が不動成分数を上廻る。このような交代作用の下では、規則通りに、1個の過剰全移動成分に出会す。この種の過剰成分は交代作用の進行に伴って起こる圧力の変化によつてさまざまな型で再沈殿する。たゞしこの場合には、被交代岩石の容積は変わらない。この種の鉱物(過剰成分からなる)は不動成分からなる鉱物類が占める容積の変化を補償する。上述の場合における原生代金雲母・天藍石鉱床等の生成下の高温度交代過程では、このような全移動鉱物は方解石である。上述の図表は、CaOが過剰不動成分でなく、方解石の全移動鉱物中に含まれる全移動成分(与えられた交代作用地帯)と考えられるならば、容積不変下の交代作用に対して有効である。この場合には、外的条件から温度および化学的ポテンシャル H_2O , CO_2 , CaO が常に干渉し、鉱物に働く圧は、従属変数となる。

想定不動成分に対する組成三角形の反応鉱物組成の相対的配例は、1変系線の線束構造が異なるので、それに対応して異なってくる。この問題をさらに次の理由で詳しく論じる必要がない。すなわち Skrejinemakers, および一部は Niggli の著作では、考えられる線束型が充分研究されており、化学ポテンシャル図表では、反応鉱物組成の配例差を表わすことは困難でないからである。たゞ次の点だけを指摘しておこう。A, B, C の3鉱物組成は、不活動成分に対する組成三角形図では1直線上におち、この3鉱物間には、全移動成分のポテンシャルによつて $aA + bB + cC = 0$ (a, b, c 係数は負) 反応が可能である。たゞしこの場合には、残余の鉱物 D, E は、(D)および(E)の反応とそれに対応する線束とが一致するので干渉しない。

化学ポテンシャル図で無条件の意味をもつものは、平衡曲線の傾きである。不変系共生における成分の絶対的的化学ポテンシャル値は、知られていないから、座標軸に対する不変点の配列は、任意にとられる。さらに化学的ポテンシャル値はある一定の正の値から $-\infty$ まで減少することに留意すべきである。したがつて任意の図表は、化学的ポテンシャルの考えられうる値の部分のみを表わしていることになる。

化学ポテンシャル図表は、さまざまな成分数をもつ物質系の解析に利用できるであろう。2個の想定全移動成分が存在する場合には、鉱物組成に対するその影響は研究されているが、残余の全移動成分の化学的ポテンシャル μ_p が不変の場合には、相律はすでに指摘したように $n = k_i + 2 - \phi$ の型をとる。いま不動成分数が2に等しいとすると、図表の不変系点では、4鉱物の共生が安定である。おのおのの4個可能な3種鉱物共生は、不変系点からでる1変系線に対応するが、この種曲線間には、2種鉱物共生をもつ2変系場が配列する。このような物質系の化学ポテンシャル図は、第75図と異なるであろう。すなわち不変系点からは、5つの線束でなく、4つの線束がでるが、2変系場の共生関係は、組成三角形でなく、2成分系列で特色付けられるであろう。不変系点に4個の不動成分が存在する場合には、6種鉱物が平衡状態にあり、不変点からは6つの1変系平衡線がでるであろう。しかしそれらの間の2変系場の条件の下では、4種鉱物の共生関係は、平衡状態となりそれを示すためには、組成三角形図の代りに、組成四面体図が必要とされる。

2つ以上の全移動成分によつて左右される共生関係を明らかにするためには、1種以上の化学ポテンシャル図表が必要とされる。この場合には、比較的移動度の低いすべての不動成分を考えに入れて、2個の極大移動成分(例えば K_2O , Na_2O)の化学ポテンシャル図を作成する。このような図の各場は、一定の鉱物相を代表し、その場では、2個の極大移動成分の化学的ポテンシャルの変化は、鉱物の共生的関係の質的変化を誘導しない。次に各場に対して、それぞれ化学ポテンシャル図を作成すると、比較的移動度の低い2成分(例えば MgO と FeO)に左右される共生関係が明らかとなる。文献にはこの種解析例は、現在みられない。

f と g 成分の化学ポテンシャル図では、 f と g 成分の全移動挙動条件下で起こる鉱物相を誘

導することが可能となる。それとともに、この種図表では、(生成されるためには)*f*, *g* 成分の不動性を必要とするようなすべての共生関係は、不変点を中心として1変系曲線を描いて表わすことができる。したがって化学ポテンシャル図は、1つの不動成分をもつ物質系を研究する場合には必要となってくる。この場合には、2種の成分は、1平面上で多成分系の共生関係が展開する可能性がある場合に限って全移動性成分として、全く条件的に分けられる。例えば第75図では、1平面上には、5成分系の全共生関係に関する表象が与えられている。この種の共生関係をモデルにより完全に表わすためには、4次元空間の化学的および鉱物学的組成の結び付きが要請される。

行列式による多量成分系反応の代数的計算について

既知組成の鉱物間の反応方程式をつくるためには、方程式の右側ならびに左側の鉱物における不動成分の含量が相等しくなるように、鉱物の化学式の係数を選ぶようにする必要がある。このことは、行列式により一次方程式を解くことに帰する。行列式理論に対しては、例えば解析幾何学に書かれている初歩的知識が必要とされる。したがって読者は、本目的にとつて必要な行列式のおもな性質を想起してみるがよい。

行列式とは、一定の多項数を記号で表わす列数に等しい行数をもつ矩形の数値表を指すのである。行列式における列数または行数は、階数と名付けられる。行列式をとく方法は、次の例で明らかである。

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \\ & \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1 \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} - a_2 \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} + a_3 \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix} = \\ & = a_1 (b_2 c_3 - b_3 c_2) - a_2 (b_1 c_3 - b_3 c_1) + a_3 (b_1 c_2 - b_2 c_1) = \\ & = a_1 \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} - b_1 \begin{vmatrix} a_2 & c_2 \\ a_3 & c_3 \end{vmatrix} + c_1 \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} = a_3 \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix} - b_3 \begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix} + c_3 \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

一般的には、行列式は、任意行(列)の項によつて開くことができるであろう。選ばれた行(列)の各項に対しては、与えられた項の行および列から消去して求められるさらに低い階数の行列に掛けられる。符号は、交互にとられる。すなわち行(列)の最初の成分の積には+の符号がとられるならば、第2成分の積の前には-の符号をつけ、第3項の積の前には、ふたたび+の符号が付される。行(列)の最初の成分の積の符号は、行列式における当該行(列)の配列状態に左右される。最上端左成分 a_1 は+の符号、隣接項 a_2 と b_1 とは-の符号、さらに離れた成分には、ふたたび+の符号を付する。

行列を開く方法から次のことがいえる。すなわち行列の1行(1列)の全成分が0に等しい場合には、全行は零に等しい。さらにこのことから次のことが明らかである。ある値に対する1つの行(列)の全成分の積(商)は、全行列のこの値に対する積(商)と同等である。例えば、

$$\begin{vmatrix} da_1 & b_1 & c_1 \\ da_2 & b_2 & c_2 \\ da_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = d \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

1つの行(列)の成分から、同一乗数を掛けたほかの行(列)の対応成分を減じても、行列値は変わらない。例えば、

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (a_1 - db_1) & b_1 & c_1 \\ (a_2 - db_2) & b_2 & c_2 \\ (a_3 - db_3) & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ (a_2 - ea_3) & (b_2 - eb_3) & (c_2 - ec_3) \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

資 料

この性質は、行列値を簡単にするために広く利用される。そのために1つの行(列)のできる限り多くの項数を0にするように努められる。

行列式が多重成分系の反応方程式の作成に適用されるうえにおいて大きな意味をもっているのは、容易に暗記できる適切な計算処理法であることである。以下において、独創的とみえる反応計算法を紹介しよう。

2個の内包平衡因子(2つの全移動成分の温度、圧、または化学的ポテンシャル)により左右されるような、3つの仮想不動成分、 a, b, c からなる物質系では、ほかの外的条件が不変の場合には、5種鉱物 A, B, C, D, E までは同時に共存できるものとする。この場合には、想定不動成分に対するこの種鉱物組成は、他のすべての成分を無視すると、次のように表わされる。

$$A = a_{AA} + b_{Ab} + c_{Ac}$$

$$B = a_{BA} + b_{Bb} + c_{BC}$$

$$C = a_{CA} + b_{Cb} + c_{CC}$$

$$D = a_{DA} + b_{Db} + c_{DC}$$

$$E = a_{EA} + b_{Eb} + c_{EC}$$

ここで a, b, c は、ある種の代数値とみなされるさまざまな成分の単位量を表わす。 $a_A, a_B, \dots, b_A, b_B$ の記号は、数的係数を表わす。 A, B, \dots, E 記号は、鉱物の各単位量を代表する。

与えられた諸鉱物間に考えられるあらゆる反応を計算するためには、次のような短形表が作成される。この短形表は、行列の環と呼ばれる。

$$\begin{array}{l} A \quad a_A \quad b_A \quad c_A \\ B \quad a_B \quad b_B \quad c_B \\ C \quad a_C \quad b_C \quad c_C \\ D \quad a_D \quad b_D \quad c_D \\ E \quad a_E \quad b_E \quad c_E \end{array}$$

この行列式では、単位あたりの行数は列数より多い。

環の行列から1行を交互に消去してゆくと、5つの行列式が求められる。この行列式の第1列は、鉱物の記号を代表する。各行列式値は、以下でみられるように0に等しい。この行列式を展開すると、5種鉱物間に可能な全反応方程式が与えられる。例えば、(A) 反応に対しては、A の行列式を除いて求められる。

$$(A) \equiv \begin{vmatrix} B & a_B & b_B & c_B \\ C & a_C & b_C & c_C \\ D & a_D & b_D & c_D \\ E & a_E & b_E & c_E \end{vmatrix} = 0$$

この零行列の等式は以下のことから明らかとなる。いま B, C, D, E 鉱物の記号値を置き換え、 a には第2列を、 b には第3列を、 c には第4列を掛けると、次の行列式が求められる。

$$(A) = \begin{vmatrix} B & a_B & b_B & c_B \\ C & a_C & b_C & c_C \\ D & a_D & b_D & c_D \\ E & a_E & b_E & c_E \end{vmatrix} = \frac{1}{abc} \begin{vmatrix} a_{BA} + b_{Bb} + c_{BC} & a_{BA}, b_{Bb}, c_{BC} \\ a_{CA} + b_{Cb} + c_{CC} & a_{CA}, b_{Cb}, c_{CC} \\ a_{DA} + b_{Db} + c_{DC} & a_{DA}, b_{Db}, c_{DC} \\ a_{EA} + b_{Eb} + c_{EC} & a_{EA}, b_{Eb}, c_{EC} \end{vmatrix} = 0$$

求められた行列式では、第1列の項からは、他列の対応項の総和が求められる。第1列項から次列の項を減じると、第1列の全項は0に等しいような行列式に移行し、行列式の値は変わ

らない。したがって全行列式は、零に等しく、(B), (C), (D), (E) の類似の行列式も、零に等しいことは明らかである。

例として(第75図)上述の1変系線束を計算してみよう。反応鉱物の全組成表は次のようである。

	$\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3$	SiO_2	MgO	Na_2O	K_2O	CaO	CO_2	H_2O
<i>Dol</i>	0	0	1	0	0	1	2	0
<i>Sp</i>	2	0	1	0	0	0	0	0
<i>Ne</i>	1	1	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
<i>Phl</i>	1	3	3	0	$\frac{1}{2}$	0	0	1
<i>For</i>	0	1	2	0	0	0	0	0

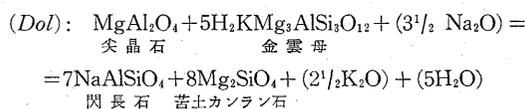
次に想定不動成分が $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 , MgO すなわち方程式の両側の鉱物におけるこの3成分の含量が等しくなるような条件の下で、この鉱物間のあらゆる可能な反応方程式を作ることが問題となってくる。この場合残余成分の含量は、溶液または過剰鉱物(CaO)から平衡を保ちながら、附加されるものとする。このような条件の下では、環の行列は、次の型をもっている(前掲表中で太線で示された部分)。

$$\begin{array}{l} \text{Dol} \quad 0 \quad 0 \quad 1 \\ \text{Sp} \quad 2 \quad 0 \quad 1 \\ \text{Ne} \quad 1 \quad 1 \quad 0 \\ \text{Phl} \quad 1 \quad 3 \quad 3 \\ \text{For} \quad 0 \quad 1 \quad 2 \end{array}$$

そこで各4鉱物間の5反応を計算するために5つの行列式が求められる。

$$(\text{Dol}) = \begin{vmatrix} \text{Sp} & 2 & 0 & 1 \\ \text{Ne} & 1 & 1 & 0 \\ \text{Phl} & 1 & 3 & 3 \\ \text{For} & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Sp} - \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Ne} + \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Phl} - \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \end{vmatrix} \text{For} = \text{Sp} - 7\text{Ne} + 5\text{Phl} - 8\text{For} = 0$$

組成表により、鉱物記号を鉱物式(化学式)に置き換え、方程式の右側に負量に移して全移動成分と過剰成分との含量と釣合わすと、次のような反応方程式(Dol)が求められる。

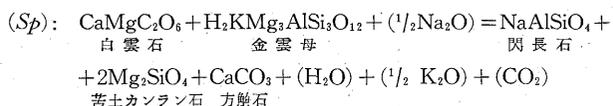


尖晶石 (Sp) 反応に対しては次の行列式が求められる。

$$\begin{vmatrix} \text{Dol} & 0 & 0 & 1 \\ \text{Ne} & 1 & 1 & 0 \\ \text{Phl} & 1 & 3 & 3 \\ \text{For} & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Dol} - \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Ne} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} \text{Phl} - \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \end{vmatrix} \text{For} = \text{Dol} - \text{Ne} + \text{Phl} - 2\text{For} = 0$$

資 料

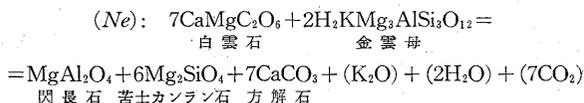
鉱物記号を鉱物式に置き換え、他の成分で補足すると、



相似の行列式により、

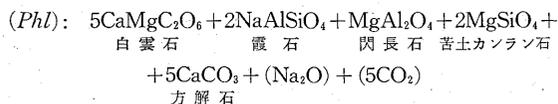
$$(Ne) = \begin{vmatrix} Dol & 0 & 0 & 1 \\ Sp & 2 & 0 & 1 \\ Phl & 1 & 3 & 3 \\ For & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 7Dol - Sp + 2Phl - 6For = 0$$

次のような反応方程式が求められる。

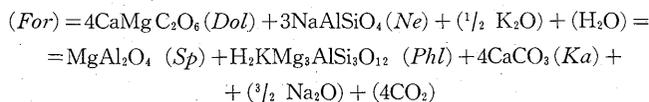


さらに

$$(Phl) = \begin{vmatrix} Dol & 0 & 0 & 1 \\ Sp & 2 & 0 & 1 \\ Ne & 1 & 1 & 0 \\ For & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 5Dol - Sp + 2Ne - 2For = 0$$



$$(For): \begin{vmatrix} Dol & 0 & 0 & 1 \\ Sp & 2 & 0 & 1 \\ Ne & 1 & 1 & 0 \\ Phl & 1 & 3 & 3 \end{vmatrix} = 2(4Dol - Sp + 3Ne - Phl) = 0$$



この方法は不変系共生の鉱物間に起こる1変系反応の全計算ばかりでなく、個々の1変系反応——単位あたりの関与鉱物数(過剰鉱物以外)が仮想不動成分数を上廻る反応——の計算にも適用される。このような反応方程式を計算するためには、行列式をつくり、各行は、反応に関与する鉱物記号とその反応に含まれる仮想不動成分記号で構成し、それを上述のように解く。このようにして行列式をとけば、未知の反応方程式が求められる。

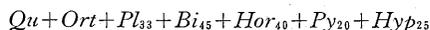
以下において、行列式の簡単な計算方法が吟味されている。

花崗閃緑岩組成の岩石類に対するカリとナトリウムの化学ポテンシャル図

若干複雑な例として、花崗閃緑岩組成岩石類に対するカリ、ナトリウムの化学ポテンシャル図を検討しよう(Korzhinskii, 1946年)。

沿バイカルの原生代の片麻岩系における高温鉱物の共生関係が研究され、石英(Qu) + 正長石(Ort) + 斜長石(Pl) + 黒雲母(Bi) + 角閃石(Hor) + 単斜輝石(Py) + 紫蘇輝石(Hyp)のような、共生関係が安定であり、その鉱物組成には SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MgO, FeO, H₂O が含まれることが確認された。そのほかに、磁鉄鉱・榍石・燐灰石・褐簾石・ジルコン・磁硫鉄鉱が存在し、各鉱物は補足的成分の性質を帯びている。磁鉄鉱に対してはこの Fe₂O₃、または O₂ が、榍石に対しては TiO₂ が補足成分となる。いま主要鉱物と成分とが限られているならば、8成分からなる7鉱物の共生関係を持ち、そのうちで H₂O は交代作用を蒙ると常に完

全移動する。したがってこのような共生関係では、鉱物数は、不動成分数(7)に相等することになる。派生的(導函数)な一定の温度、圧力の下では、このような共生関係は、1変系である。すなわちこのような条件の下では、各鉱物類は、全く一定の組成をもっているはずである。實際上、この種共生関係に対しては、斜長石が灰長石分子を約 33%含むが、 $100 \text{ FeO} : (\text{FeO} + \text{MgO}) \text{ mol} = f$ 比は紫蘇輝石に対しては約 25、黒雲母に対しては約 45、角閃石に対しては 40、単斜輝石に対しては、約 20 に相等するので、次のように表わすことができる。



共生関係中で紫蘇輝石が消滅すると、残余の 6 鉱物は、そのなかで鉄成分の増加に伴なつて、鉱物成分(係数 f)の 1 成分系変化が可能となる。

この種の 1 成分系 (p, t 不変) 共生関係 ($Qu + Ort + Pl + Bi + Hor + Py$) では FeO は MgO と類質同像をなす。しかし鉄分の増加とともに、有色鉱物には(他の成分に対して)鉱物組成にある種の変化が起こるので、類質同像は、この場合完全でない。とくに斜長石はやゝ塩基性となる。しかし解析課題を簡単化するために、このような反応系は、交代作用が完全に達成されないものとして無視される。したがって、著しく変成作用、とくに花崗岩化、熱水化作用を蒙つた花崗岩状組成の岩石類では、鉱物の鉄分 (f) は、限られた範囲内で普通変動することになる。この種現象は幾分か酸素の易動性と関連性があるようである。そのために過剰の酸化第一鉄は酸化して磁鉄鉱となるので、花崗岩状組成のあらゆる岩石類中にほとんど常に存在する。有色鉱物の規準鉄分を含むような岩石類に限ると、有色鉱物類の鉄分の変動は、与えられた小範囲内では、他の成分に対して、共存鉱物の組成の本質的な変化を誘導しないものとみなされるであろう。すなわち、完全な FeO と MgO との類質同像が仮定される。

したがって次の系に到達する。

不変の外的要因は $p, t, \mu_{\text{H}_2\text{O}}$ に等しい。

内部完全移動成分: $\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}$ 。

不動成分:

過剰成分: $\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (磁鉄鉱);

燐灰石・ジルコン・褐簾石・榍石組成に対応する分離鉱物・成分;

成分・混合物: Mn, BaO およびその他;

類質同像: FeO , 類質同像 MgO ;

仮想不動成分: $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, (\text{MgO} + \text{FeO})$

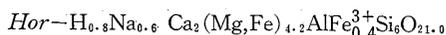
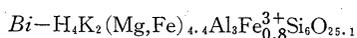
本反応系における過剰、分離鉱物およびその成分を抽象化すると、4 仮想不動成分と 2 想定全移動成分となるであろう。したがって導函数値 p, t (自由度 $2: n=2$) と従属(特別)変数値 $\mu_{\text{Na}_2\text{O}}$ と $\mu_{\text{K}_2\text{O}}$ の場合には、6 鉱物類の共生関係 ($\phi = k + 2 - n = k = 6$)、とくに $Qu + Ort + Pl_{33} + Bi + Hor + Py$ の安定が可能となる。この共生関係は、 $\mu_{\text{K}_2\text{O}} - \mu_{\text{Na}_2\text{O}}$ 図の一定点と対応することになる。この不変系点から 5 鉱物の 1 変系平衡の 6 つの線がでる。この線で 6 つの区画が分割され、その場では、平衡状態の共生関係を示す鉱物数は、想定不動成分数(4数)に相等している。1 変系線束を計算するためには、不動成分に対する共生鉱物組成を知ることが必要である。そのために普通の化学式をとりあげる。 SiO_2 - 正長石; KAlSi_3O_8 - 斜長石 33%, $An - 2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAlSi}_2\text{O}_8$, 単斜輝石 - $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$, 黒雲母に対しては、Tröger (344 試料)の花崗岩および花崗岩ペグマタイトの平均雲母組成をとつた。角閃石に対しては、石灰質、アルカリ質花崗岩中に普通にみられる角閃石の平均成分を採用した。これらのデータを分子数に換算したのが下記の第 1 表中に掲載されてある。行列の環をつくる場合には、混合物 (TiO_2) の含量は、切り捨てた。酸化第二鉄は、酸化第一鉄とともに、過剰成分(磁鉄鉱)として切り捨てたが、酸化第一鉄の残余の部分は、第 2 欄および第 5 欄に示してあるように MgO に結合された。最後に 4 想定不動成分の相対量は素数とするために、求められた数値を簡約化する。

資 料

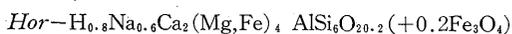
第1表. Tröger に基づく黒雲母および角閃石の平均化学組成

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO-Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O
黒雲母	593	31	316	44	201	157	253	15	24	88	200
概 数	6	—	3	(0.4)		410	4	0	0	1	2
角閃石	799	6	124	20	160	140	352	230	27	7	54
概 数	6	—	1	(0.2)		492	4	2	0.3	0	0.4

この解析によれば、鉱物の次のような経験式が求められる。



磁鉄鉱の分子を区別するならば、次式が求められる。



そこで、鉱物組成の次表を作成し、2重線の枠で、環の計算に必要な行列を区別する。

	SiO ₂	AlO _{3/2}	(Mg,Fe)O	CaO	Fe ₃ O ₄	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O
<i>Qu</i>	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ort</i>	3	1	0	0	0	0	0.5	0
<i>Pl</i>	8	4	0	1	0	1	0	0
<i>Bi</i>	6	3	4	0	0.4	0	1	2
<i>Hor</i>	6	1	4	2	0.2	0.3	0	0.4
<i>Py</i>	2	0	1	1	0	0	0	0

行列環から、1つの行を消して6つの行列式が求められる。最初の列(記号列)を開くと、反応系で考えられる6つの1変系反応方程式が与えられる。次に *Py* 反応のような1反応の計算順序を検討してみよう。

$$(Py) = \begin{vmatrix} Qu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ Ort & 3 & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 8 & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 6 & 3 & 4 & 0 \\ Hor & 6 & 1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 0$$

この方程式は次のようにして簡単化される。第4列数(左側)を4で割り、第2列から2を乗じて第3列を引き、第3列から第4列を引く。この操作を行なうと次の行列式が求められる。

$$(Py) = \begin{vmatrix} Qu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ Ort & 1 & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 0 & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 0 & 2 & 1 & 0 \\ Hor & 4 & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 0$$

さらにすでに述べたように、各鉱物の係数を直接計算して第1列の行列式を直接解く。また行列式の階数を減らすことによつて、横の行を組み合わせることも可能である。第2の方法は一層実地的であるから、ここで検討してみよう。行列式の任意の行(列)では、 a_{ij} を除くすべての要素が零に等しいという性質を基にして、+または-の記号をもつこの a_{ij} 要素に求められ

一層低い階の行列式を乗じて、この要素 a_{ij} を含む列および行を消すことができる (この要素が行列式中で占める位置が偶数であるか奇数であるかによって+または-となる)。例えば次のようである。

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{12} & a_{11} & a_{13} \\ 0 & a_{21} & a_{23} \\ 0 & a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = -a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix}$$

この種性質は任意の行(列)について行列式を展開すると誘導される。この場合には反応の行列式は、零に等しいから、符号を変えたり、また共通の乗数で約分することは、考える必要がない。

このようにして行列式のオーダを減らすために、水平の行を結合し、1要素を除き、1列の全因子を零になるまで減じる。このために、行列式 (Py) では、上方の第2列から第1列を差引くが、第5列からは、4を乗じた第1列を差引く。

$$(Py) = \begin{vmatrix} Qu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ (Ort-Qu) & 0 & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 0 & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 0 & 2 & 1 & 0 \\ (Hor-4Qu) & 0 & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (Ort-Qu) & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 2 & 1 & 0 \\ (Hor-4Qu) & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 0$$

次いで4倍の第1列を第2列から、2倍の第1列を第3列から差引き、このような方法をさらに繰り返すと次のようになる。

$$(Py) = \begin{vmatrix} Pl-4(Ort-Qu) & 0 & 1 \\ Bi-2(Ort-Qu) & 1 & 0 \\ Hor-4Qu & 1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Bi-2(Ort-Qu) & 1 \\ Hor-12Qu-2Pl+8Ort & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$(Py) = Bi - 10Ort + 14Qu + Hor + 2Pl = 0$$

正因子と負因子とを区分し、鉱物記号の代りに鉱物式を代入し、過剰成分と全移動成分とを釣合わすと、次式が求められる。

$$\begin{aligned} & H_4K_2 \cdot (Mg, Fe)_{4.4} Al_3 Fe_{0.8}^{3+} Si_6 O_{25.1} + 2(2NaAlSi_3O_8 \cdot CaAl_2Si_2O_8) + 14SiO_2 + (4K_2O) = \\ & = H_{0.8} Na_{0.6} Ca_2 (Mg, Fe)_{4.2} (AlFe_{0.4}^{3+} Si_6 O_{21.0} + 10KAlSi_3O_8 + (1.7Na_2O) + (1.6H_2O) \\ & + 0.2Fe_3O_4, Bi + Pl_{33} + Qu + (4K_2O) = Hor + Ort + Mt + (1.6H_2O) + (1.7Na_2O) \end{aligned}$$

計算には、石英のような単純組成の鉱物が反応に関与するので容易となる。したがって (Qu) 反応の計算が最も複雑である。しかし上述の方法を利用すると、この種計算はあまり難しくない。一般的な行列の環から、反応 (Qu) に対して次の行列式が求められる。

$$(Qu) = \begin{vmatrix} Ort & 3 & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 8 & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 6 & 3 & 4 & 0 \\ Hor & 6 & 1 & 4 & 2 \\ Py & 2 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Ort & 1 & 1 & 0 & 0 \\ Pl & 0 & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 0 & 3 & 4 & 0 \\ Hor & 4 & 1 & 4 & 2 \\ Py & 2 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

右側の行列式は、第2列から2倍の第3列を差引いて求められる。さらに Hor 行から2倍の Py 行を、Py 行からは2倍の Ort 行をそれぞれ差引く。このようにして求められた全行中の第2列は、Ort 行を除いて0となり、第2行列を消去する可能性が与えられるから、Qu 行列式は、次のような型に移される。

資 料

$$(Qu) = \begin{vmatrix} Pl & 4 & 0 & 1 \\ Bi & 3 & 4 & 0 \\ (Hor-2Py) & 1 & 2 & 0 \\ (Py-2Ort) & 2 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Bi & 3 & 4 \\ (Hor-2Py) & 1 & 2 \\ (Py-2Ort-Pl) & \bar{6} & 1 \end{vmatrix} = 0$$

数字上の線は負の記号を表わす。行列式の簡約化は、第4列から第1列を引くと求められる。このような手続きを行なうと次列と上の行を消去する可能性が与えられる。さらに最初の列か *Bi* から2倍の第2行を引き、第2行から2倍の第4行を引くと、最下位の項(要素)を除く最右列の項は零となり、右列と下位行を消去する可能性が与えられる。このようにして次のような行列が求められる。

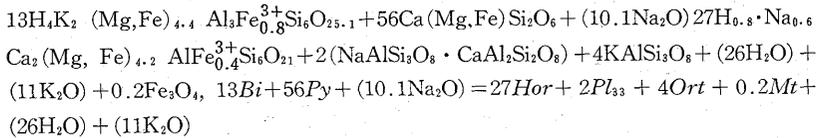
$$(Qu) = \begin{vmatrix} (Bi-2Hor+4Py) & 1 \\ (Hor-4Py+4Ort-2Pl) & 13 \end{vmatrix} = 0$$

この行列式を解くと $(Qu) = 13Bi + 56Py - 27Hor - 2Pl - 4Ort = 0$ となる。

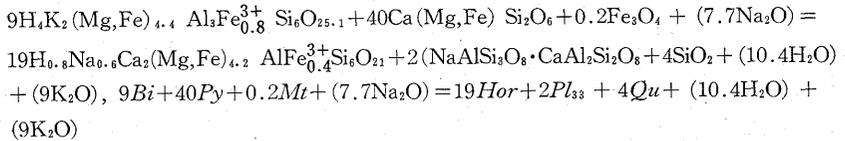
次にこれを鉱物式に置き換え、方程式の両側の全移動成分および過剰移動成分の含有量を釣合わすと、完全反応方程式が求められる。

このような方法で残余の全方程式が計算される。次に6鉱物間の間に可能な1変系反応の6方程式を掲げておく。

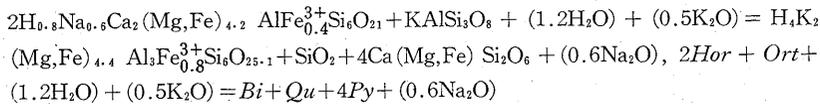
(*Qu*) 石英



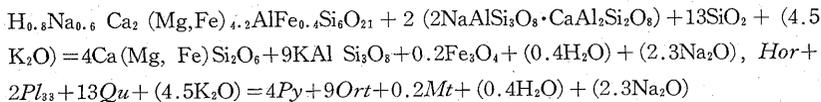
(*Ort*) 正長石



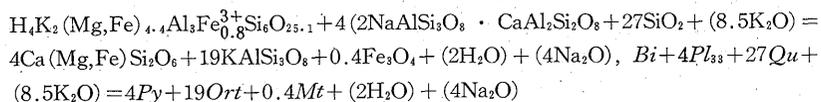
(*Pl*) 斜長石



(*Bi*) 黒雲母

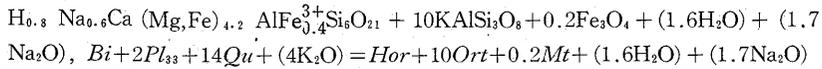


(*Hor*) 角閃石



(*Py*) 輝石(単斜)





この反応方程式によれば $\mu_{K_2O} - \mu_{Na_2O}$ 図の線束に対して全1変系平衡線の方向を求める可能性がでてくる。すなわちこの図の任意の点を通る線束の中心点を取り、反応に関与する K_2O と Na_2O との分子量比を基にして、全1変系線方向がつけられる。この場合図の線勾配の tangent 角 α は $tg\alpha = d\mu_{Na_2O} : d\mu_{K_2O} = -\Delta K_2O : \Delta Na_2O$ に相等する(第77図参照)。このようにして、全1変系反応の平衡線の方向を引き、各線に対して安定部分と不安定部分とを区別することが必要とされる。そのために各線を中心として、各線が反応平衡線の異なる側面に従って安定な鉱物共生関係を区分するように対応反応を記入する。例えば、(Bi) 反応に対しては、平衡線の右側が $Py + Ort + Mt$ 共生(関係)にとつて安定である。しかし左側では、 $Hor + Pl + Qu$ 共生が安定である。これは、反応方程式 (Bi) からみられるように、最初の反応は第2反応に比してカリに enrich されているからである。このことは、(Hor), (Pl), (Qu) 反応に対する平衡線の安定部分が (Bi) 平衡線の左側に、(Py) と (Ort) 反応の安定部分が (Bi) 平衡線の右側にあるというスクレイネケルスの法則によつて証明することが可能である。このようにして、安定部分と不安定部分とを区分し、そのために任意の他の線、例えば (Pl) 平衡線をとる。(Pl) 反応に対しては、 $Bi + Py + Qu$ 共生が一層右方、かつ下方の部分で安定である。しかし $Hor + Ort$ 共生は、一層左方、かつ下方の部分で安定である。このような現象が起きるのは、(Bi) 平衡反応では、とくに、(Pl) 平衡線より上方、かつ左方の領域でのみ安定な $Hor + Ort$ 共生が入るからである。

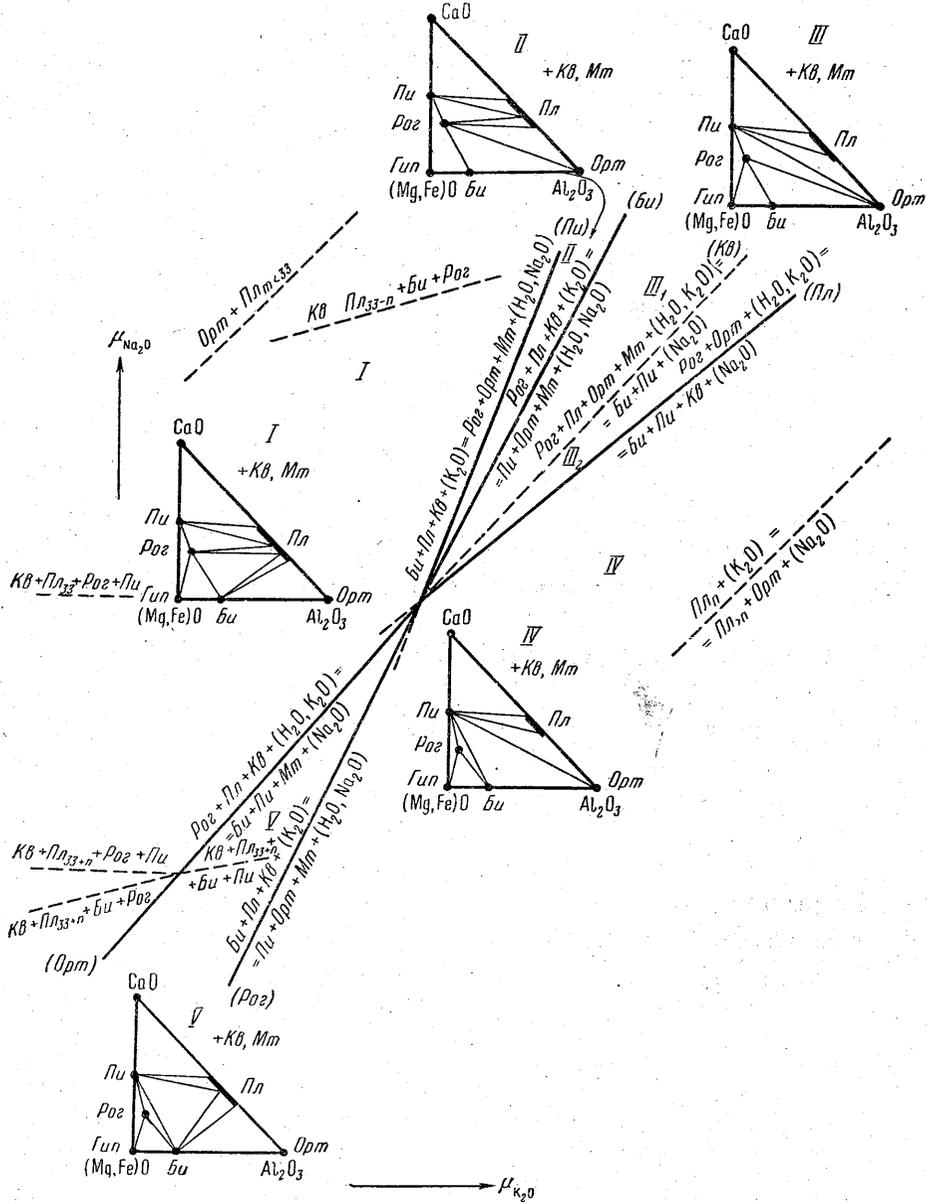
このようにして6つの安定な1変系線束が求められ反応図の全場は6つの場に分けられる。この種平衡線 (Qu) から求められるものは、石英を含まない共生関係に帰するから、花崗岩状岩石類に対しては、興味が薄い。したがつて (Qu) 線を点線でひき、5残存線で限られる5共生(関係)の場を主として検討してみよう。いま石英を過剰鉱物成分にとると、想定不動成分は3の成分すなわち $Al_2O_3 - CaO - (Mg, Fe)O$ となる。5つの各共生場に対する含石英岩石の共生関係は第77図の対応場にそれぞれ記入されているこの種3成分の補足図で示すことができるであろう。

Iの場は、規準花崗岩類の場と呼ぶことができるであろう。この場は、斜長石と角閃石および黒雲母の共生関係が安定なことで特徴付けられ、規準アルカリ度を示す花崗岩に典型的にみられるものである。IIの場では、 $Bi + Pl$ 共生の代りに、 $Ort + Hor$ が安定な共生関係となり、アルカリ度の若干高い花崗岩状岩石に対して典型的である。III_{1,2}の場では、 $Pl + Hor$ 共生は不安定となり $Ort + Py$ 共生に変わる。このようなアルカリ度は閃長石に典型的なものである。IVの場では、 $Hor + Ort$ 共生の代りに $Py + Bi$ 共生が安定となる。角閃石は、このアルカリ度では長石が存在するので、不安定である。この種の共生的相関係は、モンゾニ岩型のカリ質岩石類に特徴的である。最後にVの共生場とVIの場とは、後者(VI)の共生場では $Py + Ort$ 共生関係の代りに、 $Bi + Pl$ 共生関係が安定となるので区別される。

石英を含まないような共生関係に留意するならば、第77図に示されてあるように、IIIの共生場をさらに2共生場、すなわち III₁, III₂の場に分かつ (Qu) 線を検討することが必要となる。

第77図の各共生場に安定な全共生関係——含石英および無石英——を考えてみよう。全共生関係を明確に表わすためには、 $Al_2O_3 - CaO - (Mg, Fe)O - SiO_2$ 四面体を検討することが必要となるであろう。しかしこのような空間像がつけられないために、次のような考え方が利用される。すなわちIの共生場に対して典型的な $Bi + Pl$ および $Hor + Pl$ 共生関係では $Al_2O_3 - CaO - (Mg, Fe)O$ の相関係をもつ本対象鉱物の他の全共生関係に比して、 SiO が著しく不足している。すべての他の可能な鉱物の組み合わせは、珪酸の吸収により $Bi + Pl$ と Hor

資 料



第 77 図 カリ・ナトリウムの化学的ポテンシャルに左右される花崗岩状岩石の共生関係図表

Би (Bi): 黒雲母 Гип (Гип): 紫輝輝石 Кв (Кв): 石英
 Мт (Мт): 磁鉄鉱 Орт (Орт): 正長石 Пп (Пп): 輝石(単斜)
 Пл (Пл): 斜長石 Пор (Пор): 角閃石

+Pl の共生関係から求められることは明らかである。このことは、I 共生場から V 共生場へ、さらに IV 場から III 場へと一方では I の共生場から II の場とさらに III 場への過渡反応が行なわれるからである。この種過渡反応は、石英の吸収によつて完成する。対象鉱物の他の共生関係では、Bi+Pl と Hor+Pl 共生への移行は、吸収を伴わなないが、珪酸の遊離は不可能である。このことから I 共生の場では、珪酸に不飽和の共生関係(対象鉱物)を欠くことが明らかとなる。したがつて I の共生の場では、(対象)の $Al_2O_3-CaO-(Mg, Fe)O-SiO_2$ 系の次のような共生関係のみが可能である。

- I 共生場
- 1) $Qu + Ort + Pl + Bi$
 - 2) $Qu + Pl + Bi + Hor$
 - 3) $Qu + Pl + Hor + Pi$

II 共生場の共生に対する過渡反応は次のようである。 $Bi + Pl + Qu + (K_2O) = Hor + Ort + Mt + (H_2O, Na_2O)$ 。

この反応は石英が不足するので最終段階にまで達しないで、珪酸に不飽和のII 共生場が与えられる。 $Bi + Pl + Hor + Ort$

第77図のIIの場の共生図に描かれている含石英共生関係と結合すると次のII場の共生関係(以前に掲げたと同一の共生関係は、括弧内の前の順序数字で示して繰り返えされている)が求められている。

- II 共生場
- 4) $Qu + Ort + Bi + Hor$
 - 5) $Qu + Ort + Pl + Hor$
 - 3) $Qu + Pl + Hor + Py$
 - 6) $Ort + Pl + Bi + Hor$

反応がII場から III₁ 場へ移行する。

$Hor + Pl + Qu + (K_2O) = Py + Ort + Mt + (H_2O, Na_2O)$, 石英が不足するので、反応は最終段階まで進行しないで、珪酸に不飽和の第二次の共生関係の成立する III₁ の場 $Hor + Pl + Ort + Py$ が与えられる。

第77図のIII共生場を示す含石英共生関係とともに、次の共生関係を示す III₁ 場が求められる。

- III₁ 共生場
- (4) $Qu + Ort + Bi + Hor$
 - 7) $Qu + Ort + Hor + Py$
 - 8) $Qu + Ort + Pl + Py$
 - 9) $Ort + Pl + Hor + Py$
 - (6) $Ort + Pl + Bi + Hor$

石英の不足の下で、Iの共生場からIIの共生場へ移行する場合には、類似の過渡反応が起こると、次のような珪酸に不飽和な共生関係が求められる。含石英共生関係とともに、V共生場では、次の共生関係が成立する。

- V 共生場
- (1) $Qu + Ort + Pl + Bi$
 - 10) $Qu + Pl + Bi + Py$
 - 11) $Qu + Bi + Hor + Py$
 - 12) $Pl + Bi + Hor + Py$

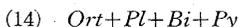
石英不足下のV場からIV場への過渡反応では、次のような珪酸に不飽和な新共生関係が求められる。 $Bi + Pl + Py + Ort$, したがって含石英共生関係とともに、IV共生場では、次の共生関係が与えられる。

- IV 共生場
- 13) $Qu + Ort + Bi + Py$
 - (8) $Qu + Ort + Pl + Py$
 - (11) $Qu + Bi + Hor + Py$
 - 14) $Ort + Pl + Bi + Py$
 - (12) $Pl + Bi + Hor + Py$

最後に、石英不足下でIV場から III₂ 場へ移行すると、 $Bi + Py + Hor + Ort$ 反応が与えられる。III場の含石英共生関係とともに III₂ の場では、次の共生関係が求められる。

- III₂ 共生場
- (4) $Qu + Ort + Bi + Hor$
 - (7) $Qu + Ort + Hor + Py$
 - (8) $Qu + Ort + Pl + Py$

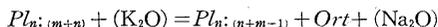
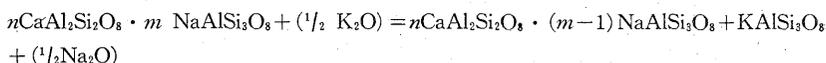
資 料



このように、 $Al_2O_3 - CaO - (Mg, Fe)O - SiO_2$ 系では、6共生場(普通の花崗岩状岩石のアルカリ度条件を有する)の過剰磁鉄鉱の存在の下で、上述の15種の異なる4化学的共生関係(4鉱物の6つの組合せ数に相等する)が可能であつて、この種共生関係の大部分は、Iの場(共生)におけるよりも多くの場で安定である。

図の各場の限界内におけるカリおよびナトリウムの化学的ポテンシャルの変化(第77図)は、共生関係の型の変化を伴わずに、移動鉱物組成の変化を誘導する。岩石化学的研究の中でとくに重要な意味をもつものは、特徴的な共生関係における斜長石の組成変化である。これは、曹長石および灰長石分子比に対する斜長石組成が光学的方法で容易に決定されるからである。したがつて特徴的な共生関係の斜長石組成から出発して、花崗岩状岩石の共生関係図(第77図)の主要な場をさらに細分する方法は、注目に値する。

とくに大きな意味をもつものは、次の反応である。



質量作用の法則により温度 T 、圧 p が一定の場合には、この反応が平衡するためには、次の条件が必要となる。

$$d\mu_{K_2O} - d\mu_{Na_2O} = 0 \quad \text{または} \quad d\mu_{Na_2O} : d\mu_{K_2O} = 1$$

平衡線は、斜長石の組成と無関係に横座標に対して常に 45° に傾き $\mu_{K_2O} - \mu_{Na_2O}$ 図表上に存在するであろう。反応が起こるまでの斜長石組成は、この式により $n : (n+m)$ の比で、反応後は $n : (n+m-1)$ の比で、それぞれ表わされる。 n 数と m 数とは、任意の大きさととられ、その上組成の変化は、任意の小さな値を示すので、各平衡線は、一定組成の正長石と斜長石との共生に対して、 μ_{Na_2O} と μ_{K_2O} との従属関係を表わすことになるであろう。すなわち K_2O のポテンシャルが増大するか、または Na_2O のポテンシャルが減少すると、上述の反応式により、正長石と共生する斜長石の塩基度の上昇が促進されるであろう。このようにしてさまざまな組成の斜長石と正長石との平衡は、 45° の角度で横軸に対して傾く平行直線系で第77図に表わされている。正長石と共生をなす斜長石の組成の塩基度が上昇すると、対応平衡線は、一層右方に、かつ下方にずれる。線束の中心からは $Ort + Pl_3$ の平衡線がでる。したがつてIVとVとの共生の場では、 An_{33} から始まり、かつ一層塩基性組成の斜長石と正長石との共生が安定であるが、I、II、IIIの共生の場では、 An 33%以下を含む酸性斜長石と正長石との共生が安定である。本質的には、石英はこの反応に関与しないから、斜長石と正長石との平衡は、シリカによる岩石の不飽和または飽和に左右されない(このことはあらゆる場合を通じて、第1近似である)。第77図の2カ所にみられる点線は、 $Ort + Pl_n$ 平衡線の方向を示すものである。

それ以外に、この図では、4鉱物共生関係における一定の斜長石組成の線系を表わすことが可能である。すでにみたように、6鉱物— Qu, Ort, Pl, Bi, Hor, Py —数中の各4鉱物の共生は、2変系(反応)である(たゞし外的条件(T, p, μ_{H_2O})が一定とする)。いまかりに斜長石中の灰長石成分と曹長石成分との一定比が与えられるものとするならば、反応系の変量は、1単位減少する。すなわち斜長石中における灰長石の含有量が一定の条件の下で成立する各4鉱物の共生関係は、1変系となり、第77図の一定の平衡線に対応するはずである。したがつて斜長石を含む各4鉱物の共生関係に対しては、線系で表わすことが可能となり、各線は、与えられた4鉱物共生における斜長石(塩基度一定)の安定度に対応するであろう。したがつて各線系は、そのなかで与えられた4鉱物共生が安定であるような場の領域でのみ実際の価値をもっている。

正長石と平衡をなす斜長石の一定組成線は、すでに検討した。したがってここでは斜長石のみが長石中からはいるような 4 共生関係のみを検討しよう。第 77 図の全共生場にみられる 4 安定共生関係の上述表から明らかなように、次の 4 共生関係が考えられる。

- 2) $Qu+Pl+Bi+Hor$ I 共生場
- 3) $Qu+Pl+Hor+Py$ I, II 共生場
- 10) $Qu+Pl+Bi+Py$ V 共生場
- 12) $Pl+Bi+Hor+Py$ V, IV, III₂ 共生場

この各共生関係に対して斜長石の塩基度の変化を示す反応方程式を求めることも容易である。したがってそれから、化学ポテンシャル図の平衡線をみいだすことができる。この種の反応では、曹長石成分と灰長石成分とは、相互に独立に反応するから、反応(方程式)に含まれる係数は、2 種の独立鉱物のように独立にみいだされるはずである。したがって問題は 4 種の想定不活動成分からなる 5 種鉱物間の反応方程式をみいだすことにある。行列式を利用してこの課題を解決することは、すでに述べた。この課題をとくのは次のようである。まず次の鉱物組成表、例えば $Qu+Pl+Bi+Hor$ の共生関係表をつくる。

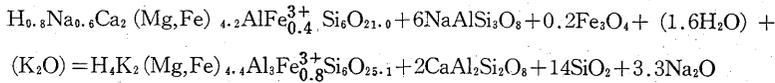
	SiO ₂	AlO ³ / ₂	(Mg,Fe)O	CaO
<i>Qu</i>	1	0	0	0
<i>An</i>	2	2	0	1
<i>Ab</i>	3	1	0	0
<i>Bi</i>	6	3	4	0
<i>Hor</i>	6	1	4	2

行列式として鉱物記号とともに求められた数字を吟味し、零に等しいものとする、

$$\begin{vmatrix} Qu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ An & 2 & 2 & 0 & 1 \\ Ab & 3 & 1 & 0 & 0 \\ Bi & 6 & 3 & 4 & 0 \\ Hor & 6 & 1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 0$$

始めに列、次いで行の減法または加法を行なつて、この行列式の階数を減少さす。このような手続を行なうと、上述のように、最後に $Hor+3Ab=Bi+2An+14Qu$ が求められる。

この方程式に鉱物式を代入し、全移動成分および過剰磁鉄鉱の含有量を釣合わすと、最後に次の鉱物式が求められる。



すなわち



温度 T および圧力 p が一定の場合には、反応の平衡に対しては、次の条件が必要である。

$$d\mu_{Na_2O} : d\mu_{K_2O} = -\frac{\Delta K_2O}{\Delta Na_2O} = \frac{1.0}{3.3} = 0.3$$

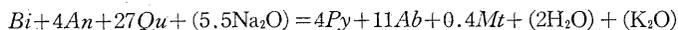
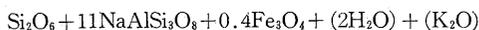
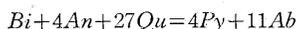
この式によれば、第 77 図の I 共生場における平衡線の方向が与えられる。いま第 1 近似値として、カリおよびナトリウムの化学ポテンシャルの変化に伴つて起こる他の鉱物(反応に関与する)組成の可能な変化を無視するならば、平衡線は、他の対象反応の平衡線のように直線となるであろう。現実には、花崗状岩石の有色鉱物組成は、マグマのアルカリ度に著しく左

資 料

右される。したがって第 77 図の有色鉱物の関与を伴う全平衡線は、曲線となるであろう。

同様に、共生 3) $Qu+Pl+Bi+Py$ における斜長石の塩基度の変化を伴う反応方程式を求めることができる。

	SiO ₂	AlO _{3/2}	(Mg,Fe)O	CaO
<i>Qu</i>	1	0	0	0
<i>An</i>	2	2	0	1
<i>Ab</i>	3	1	0	0
<i>Bi</i>	6	3	4	0
<i>Py</i>	2	0	1	1



$$d\mu_{Na_2O} : d\mu_{K_2O} = -\frac{\Delta K_2O}{\Delta Na_2O} = \frac{1}{5.5} = 0.18$$

3) $Qu+Pl+Hor+Py$ 共生関係に対しては、反応方程式の諸係数を計算する必要がない。これは、この反応ではカリ質鉱物が関与しないので、反応には、1個のナトリウムの吸収を伴うからである。したがって第 77 図の平衡曲線は直線となるであろう。第 77 図の I 共生場に入る含石英鉱物の共生図表から明らかのように、(*Hor*)+(*An*)の混合内包線は、*Py+Ab* の混合内包線と交わり、そのうえ第 2 の共生関係は、第 1 の共生関係よりもシリカに富んでいる。したがって $Qu+Hor+An+(Na_2O)=Py+Ab+Mt+(H_2O)$ の反応方程式が求められる。この場合には $d\mu_{Na_2O} : d\mu_{K_2O} = 0$ である。 $Qu+Pl+Hor+Py$ 共生関係中で斜長石の組成が一層酸性になると、第 77 図では、対応水平平衡線は一層上方に位している。 Pl_{33} では、この平衡線は、線束の中心を通る。

上述の方法は、行列式によって III₂, IV, V の共生場で安定な $Pl+Bi+Hor+Py$ (12) 共生関係に対して定塩基性の斜長石の平衡曲線の傾きを計算することができる。しかしここでは、含石英共生に限定する。I, II, III の場の領域内で 3 線系 (その傾きについてはすでに述べた) を引くと花崗岩状岩石における鉱物共生関係の一層詳しい解析の可能性をみいだすことができる。斜長石のさまざまな組成に対する線分間の距離は、化学ポテンシャル図の一般的距離のように、条件的なものにすぎないであろう。これは、化学的ポテンシャルの絶対値と鉱物組成に対するその差異が知られていないからである。しかしそれとともに、さまざまな線系間には、一定の共役関係が起こるはずである。例えば、斜長石の同一組成に対しては、1) $Qu+Pl+Hor+Py$, 2) $Qu+Pl+Bi+Hor$, 10) $Qu+Pl+Bi+Py$ の 3 線は、1 点を切りこの点は線束 (*Ort*) (第 77 図) 上にあるはずである。すなわちこの点は、ポテンシャル図の左下隅に示してあるように $Qu+Pl+Hor=Bi+Py+Mt$ 1 変系反応の平衡線上にある。したがって $Qu+Pl+Bi+Hor$ の平衡線 (*Ort*) の μ_{Na_2O} の与えられた各値、与えられた共生鉱物の 1 変系組成、とくに斜長石の一定組成に対応する。対象共生中における斜長石組成の線束の中心付近では μ_{Na_2O} の低下を伴ない、*An* 含量は 33% に近い。すなわち第 77 図の下方の斜長石組成 (所与の共生関係にみられる) は一層塩基性となる。次に斜長石組成が Pl_{33+n} となるような共生関係 (*Ort*) の平衡線の点を検討してみよう。この場合には点上に次の平衡が成立する。 $Qu+Pl_{33+n}+Bi+Hor+Py$ したがってこの点上では、次の共生関係が平衡を保つであろう。1) $Qu+Pl_{33+n}+Hor+Py$, 2) $Qu+Pl_{33+n}+Bi+Hor$, 3) $Qu+Pl_{33+n}+Bi+Py$, この種の平衡関係は (*Ort*) 共生 = $Qu+Pl_{33+n}+Bi+Hor+Py$ から 1 個の有色鉱物を削減して求められる。したが

つて上述の3種の4共生関係の平衡線——与えられた組成の斜長石を伴なう——は、図表に示されてあるように、上述の点を通るはずである。したがってI共生場の側から線束(Ort)に近づくと、 $Qu+Pl+Hor$ 共生における斜長石組成領域の間隔は一層狭まるが、 $Qu+Pl+Bi+Hor$ および $Qu+Pl+Hor+Py$ の2共生における斜長石の両組成は、一層近接する。しかし角閃石は、1組成のみの斜長石と平衡を保つので、差当り線束(Ort)のある点では、両組成は一致しない。さらに図表を追跡し、Ort線束の交点でVの共生場に入ると、角閃石は、 $Qu+Pl+Hor=Bi+Py$ 反応によつて消滅する。こゝでは、外的条件の変化に伴なつて、組成-共生図の三角図表化に起こる変化に遂次性がみられる。2, 10共生関係における斜長石の等組成線は、Sovolevが指摘しているが、3共生関係に対する等斜長石線はすでに1948年に筆者が明らかにした。

第77図は、花崗岩状岩石の晶出温度間隔に対応する高温共生関係に対して作成されたものである。この図は、花崗岩状岩石の共生関係の諸特性をよく明らかにしている。すでにほかの箇所でも指摘したように、マグマ中のカリとナトリウムは、化学的ポテンシャルの変化とともに共融点およびマグマの晶出径路も規則的に変わってくる。そのためにアルカリ度の変化につれて共生関係の特性および晶出順序ばかりでなく、造成火成岩の組成も変わる。例えば、標準花崗岩状岩石に対してはI場の共生関係が典型的である。しかし一層酸性の斜長石が晶出するにたがつて、有色鉱物は、 $Py-Hor-Bi$ の順序で晶出し、Bowenの反応系列に対応して、有色鉱物間には反応関係が成立する。IIIとIV場の共生関係では、閃長石およびモンゾニ岩が典型的であるが、この共生場では、Bowenの反応系列は貫徹しない。第77図で代表される型の図表によつて火成岩を研究すると、さまざまな火成岩および1火成岩相(状態)におけるマグマのアルカリ度変化を詳細に解明できる。

第77図は温度変化によつて一連の変化を受ける。温度低下は、水の吸収反応に対して好都合である。そのために温度低下は、水の吸収によつて形成される共生関係のために、全平衡線の平行転移を誘導する。これは黒雲母および角閃石に一層富む共生関係が形成されるからである。それとともに、温度が低下すると、有色鉱物の組成変化が起こるので、鉱物間で考えられる反応の平衡線の勾配にも変化が当然起こってくる。最後に、温度低下は、反応平衡定数の変化とマグマにおけるアルカリの化学ポテンシャル変化とを誘導するはずである。しかし花崗岩状岩石の晶出、(接触変質)角閃石および高温片麻岩の変質作用が完成される温度間隔では、この種変化は、見掛上大きくない。これは第77図に示されてある共生関係の合法則性が、この種の岩石類ではきわめてよく貫徹されるからである。これと関連して、マグマの晶出は、温度低下ばかりでなく、水およびその他の揮発性成分——とくにほとんど等温条件に等しい状態の下で——の放出を誘起することに留意すべきである。したがつてマグマの晶出は、きわめて大きな温度低下領域(間隔)内で常に発生することは、確信できないであろう。温度低下は、僅かであろうこの問題に対しては、もちろん、研究をさらにすすめることが必要である。

花崗岩状岩石の共生関係に関する最初の論文(Korzhinskii, 1946年)において、筆者はカリおよびアルカリの化学ポテンシャル図で、全火成岩の共生関係に対する1変系線束網をつくることができることに留意した。この問題は、その後Sobolevが研究を行ない、その著書(1949)中には、アルカリ度で左右される火成岩の全共生関係図が記載されている。しかし現在のところ、計算データが依然として発表されていないので、この方向に研究を押し進めることが望ましい。