

パンペリー石-アクチノ閃石相について

坂 野 昇 平*

On the pumpellyite-actinolite facies

Shohei BANNO*

Abstract The pumpellyite-actinolite facies, which was proposed by HASHIMOTO (1965) as an independent facies, is common in high-pressure intermediate, medium-pressure and in a part of low-pressure facies series, such as those observed in the Sanbagawa, Haarst, and Tanzawa complexes.

The mineral paragenesis of the pumpellyite-actinolite facies and its relations to the neighbouring facies are discussed in terms of 3-, 4- and 5-component systems. Analysis of paragenesis of 5-component system is possible only on the lower-grade of the Sanbagawa metamorphism which was described by AIBA (1982). However, 4-component system is usually sufficient to describe the phase relations of this facies.

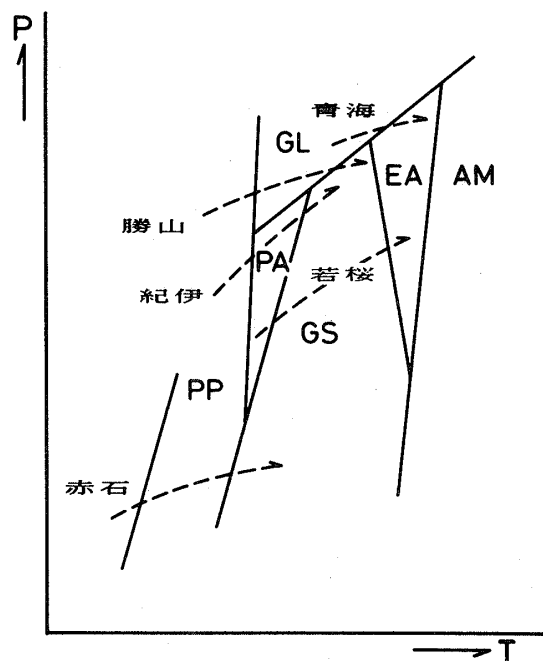
A new approach to treat partial systems of 5-component system is discussed in some detail.

はじめに

パンペリー石-アクチノ閃石相は橋本(1966)によって提案され、その後次第に広く採用されてきた。それは COOMBS (1960) によってぶどう石-パンペリー石変成グレイワッケ相 (PP 相) の高変成度亜相として導入されていたが、橋本は関ほか(1964)が研究した紀伊半島の三波川変成岩を典型とし、次のような特徴をもつとした。『…… 緑色片岩にぶどう石を欠き、パンペリー石、アクチノ閃石、スチルプノメレンを産することで特徴づけられる。また、藍閃石やローソン石などを欠くことも重要な特徴である (262頁)』(鉱物名の表記はこの論文の用法に改めた)。また、三郡変成帯の若桜地方もこの変成相をもつとされた(第1図)。

その後、この変成相は SEKI (1969), ZEN (1974), KAWACHI (1975) や COOMBS *et al.* (1976) によって支持され、次第に国際的にも採用されるようになってきた。現在、IUGS の岩石命名ワーキング・グループ

でも、この変成相の支持者は多い。日本から提案さ



第1図. 橋本(1966)によるPA相をめぐる変成相区分図。

矢印は各地の温度・圧力経路。変成相の略号は第1表参照。

* 京都大学理学部地質学鉱物学教室。Department of Geology and Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto, 606 Japan.

第1表. 鉱物と変成相の略号.

鉱 物			
石英	Qtz	アルバイト	Ab
カリ長石	Kfs	アノーサイト	An
緑簾石	Ep	ゾイサイト	Zo
パンベリー石	Pmp	ぶどう石	Prh
ローソン石	Lws	ローモン沸石	Lmt
ワイラケ沸石	Wrk*	ヒューランド沸石	Hul
アクチノ閃石	Act	藍閃石	Gln
クロス閃石	Crs*	ウインチ閃石	Wnc*
マグネシオ・リーベック閃石			Mrb
緑泥石	Chl	フログバイト	Phl
アナイト	Ann	黒雲母	Bt
スチルプノメレン	Stp	ざくろ石	Grt
珪線石	Sil	十字石	St
赤鉄鉱	Hem	水	W*

変成相			
緑色片岩相	GS	藍閃石片岩相	GL
緑簾石角閃岩相	EA	角閃岩相	AM
沸石相	ZL	ローモン沸石相	LM
パンベリー石-アクチノ閃石相			PA
ぶどう石-パンベリー石相			PP
ぶどう石-アクチノ閃石相			PrA

* : Kretz(1983)に示されていない略号.

れた変成相であり、国際的に広い支持を受けているものとして、また日本列島にこれに属する変成岩が多いという点でこの変成相は日本での詳しい研究に値する。

この論文で筆者はパンベリー石-アクチノ閃石相の内包と外延をできるだけきちんと考えてみたい。以下の論述で、鉱物名は文中では日本語を使うが、組合せを論ずるときは、おもに KRETZ (1983) の略号を用いる。第1表に、本論に使用する鉱物と変成相の略号をまとめた。

変 成 相

まず、変成相をどうとらえるかを確認しよう。ESKOLA (1920) の鉱物相の概念が20世紀中期の変成岩研究の指導理念であったということ、またわが国でそれが受入れられるのに長い時間がかかったなどという歴史的な考察は別にしても、それを現在どうとらえるかは改めて論議が必要であろう。まず、わかりにくいことで有名であった ESKOLA の鉱物相の概念を、再定義することが必要であろう。RAMBERG (1952) は『……組成の決まった特徴的な鉱物群の安

定関係によって決められる温度-圧力領域(136頁)』と鉱物相を定義し、THOMPSON (1955) は『ある全岩組成に対して単変反応曲線によって囲まれた温度・圧力領域』とした。ESKOLA は鉱物相と変成相を区別して用いているが、都城 (1965) が展開しているように、我々は鉱物相よりも変成相を初めから使っていくのがよいであろう。変成相概念の変遷は都城 (1965) が正確にまとめている。*

THOMPSON (1955) のように変成相を定義すると単変反応を組合せることによって、いくらでもというのは言いすぎとしても、多数の変成相ができるであろう (第13, 15 図の Schreinemakers の網参照)。これは実用的でないから、都城先生はゼミなどでは地質図で鉱物帯として識別できる広さに分布する (ある程度温度・圧力領域が広い) ことを目安にしたらどうかといっておられた (どこかに書いてあるはずと思っていたが、見つけれなかった)。また、広い範囲の全岩組成に対して共生関係が解明されているようなものだけを独立な変成相としようとする (都城, 1965)。これは通常塩基性変成岩と泥質変成岩に対して、共生関係がわかっていることが必要と理解してよいだろう。また記憶を要求する変成相がただ多数になるだけでは、地質学一般にとってはそれは細部にこだわり実用的でない概念とされよう。そうすると変成相はかえって学問の進歩を阻害するところであろう。したがって、とくに必要がなければ新しい変成相を提案すべきでないという要求もある。都城 (1965) は変成相としては ESKOLA (1939) が提案した8つの変成相を採用する (緑色片岩, 緑簾石角閃岩, 角閃岩, グラニュライト, 輝石ホルンフェルス, 藍閃石片岩, エクロジャイト, サニディナイト)。さらに COOMBS (1960) が提唱したように、沸石相の一部を変成相とし、それと彼が新しく提唱したぶどう石-パンベリー石変成グレイワッケ相を加えて、10の変成相を残せばよからうという。TURNER (1981) は ESKOLA と COOMBS が提案したものを中心に13の変成相を残している。しかし、彼の接触変成と広域変成とを区別する変成相の体系は、ESKOLA の精神に反する (幸いにしてこの体系は、日本では支持者は少ない)。

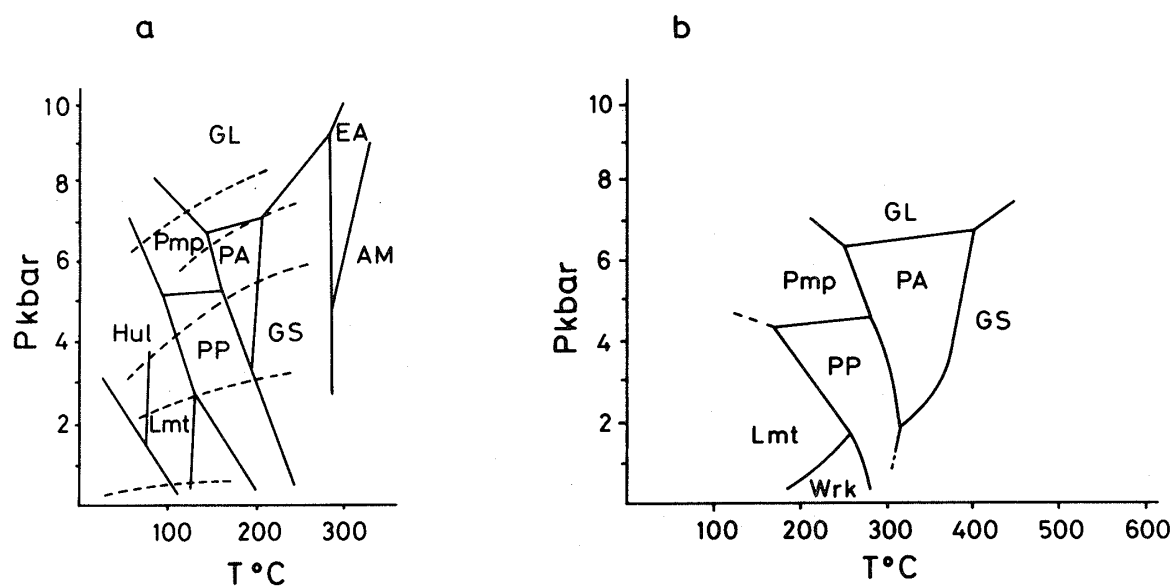
なるべく変成相を増やさないという総論には賛成

* 小島 (1979) は ESKOLA の経験的な鉱物相の表現は熱力学的な多相平衡論の言葉で置き換えるべきではないと主張するが、もちろん私は同意しない。

する人は多いとしても、すでに研究の進んでいる高温の変成岩はともかく、研究が最近になってやっと進んできた低温の変成作用の研究者には、もっと変成相を作りたいという要求があっても不思議ではない。ちょっと見てもアクチノ閃石-斜長石相、ぶどう石-アクチノ閃石相あるいは緑泥石-輝石相などがある。なお、変成相にそれに属する岩石名をつける ESKOLA の方法は、今から考えるとあまり適切ではなかった。これからは変成相に岩石名はつけず代表的な鉱物組合せを用いた方がよいだろう。すでに、COOMBS 自身も変成グレイワッケを落としてぶどう石-パンペリー石相と呼んでいる (COOMBS *et al.*, 1976)。また変成相を示す略号もしばしば使われる。パンペリー石-アクチノ閃石相 (PA 相) の周辺の変成相のおよそ習慣となつている略号を第 1 表に示してある。筆者は一般には略号をなるべく使わない方向に賛成だが、変成相を指定するには鉱物を最低限 2 種列記せねばならないうえ、関係する鉱物名がカタカナ表記で長くなるものが多いので、やむなく変成相の略号を以下に使用する。青色片岩相は用いず、ESKOLA (1929) を尊重して藍閃石片岩相 (GL 相) を用いる (坂野, 1988a, 参照)。ほかによく使われるのは、ぶどう石-パンペリー石相 (PP 相) と緑色片岩相 (GS 相) である。

変成相をあまり増やさないようにするため、亜相の概念が使われる。亜相の概念自身は 1939 年の ESKOLA の論文にすでにみえるが、TURNER (1981) は

これを局地的に確認できるものにしようとは提案している (特殊な化学組成に対して定義されるという意味ととってよかろう)。しかし、ホルンブレンド-グラニュライト亜相と輝石-グラニュライト亜相とはきちんと定義されうるもので、とても局地的とはいえない。また角閃岩相を藍晶石、珪線石と紅柱石の 3 つの亜相に分ける方針に抵抗は少ないだろう。しかし、ある地域の岩石群がそれらのいずれの安定領域にあるかを決定することはしばしばむずかしく、特殊な化学組成の岩石が分布していないと亜相を決められないということは、TURNER の亜相の意義と対応しているのかもしれない。亜相の概念はあまり遠慮せずに使ったらどうであろう。今までの変成相の体系では、予想されていなかった鉱物組合せで定義されるものでない限り、新しい変成相は定義せず、内容の修正は亜相でするのがこれからは望まれるだろう。藍閃石片岩相の細分は新しい変成相を提唱するよりも亜相の問題としたらよかろう。一方、新しい変成相を国際的な委員会で定義しようという提案が IUGS の岩石命名委員会でなされているが、私は反対している。それは委員会ではなく実際の研究論文や著書のなかで主張され、慣習として確立されていくべきであろう。有力な学者のなかにも私に近い考えをもつ人が何人もいるので (橋本光男氏も同じ考えをしている)、こんな馬鹿な提案が通らないことを祈っている。このように考えると、PA 相は広く認められる最後の変成相になるかもしれない。



第2図. SEKI (1969, 1972) による PA 相をめぐる変成相区分図. a : 1969, b : 1972.

なお、GL は原論文ではパンペリー石-藍閃石相となっているが、簡単化のため GL 相としてある。

パンペリー石-アクチノ閃石相

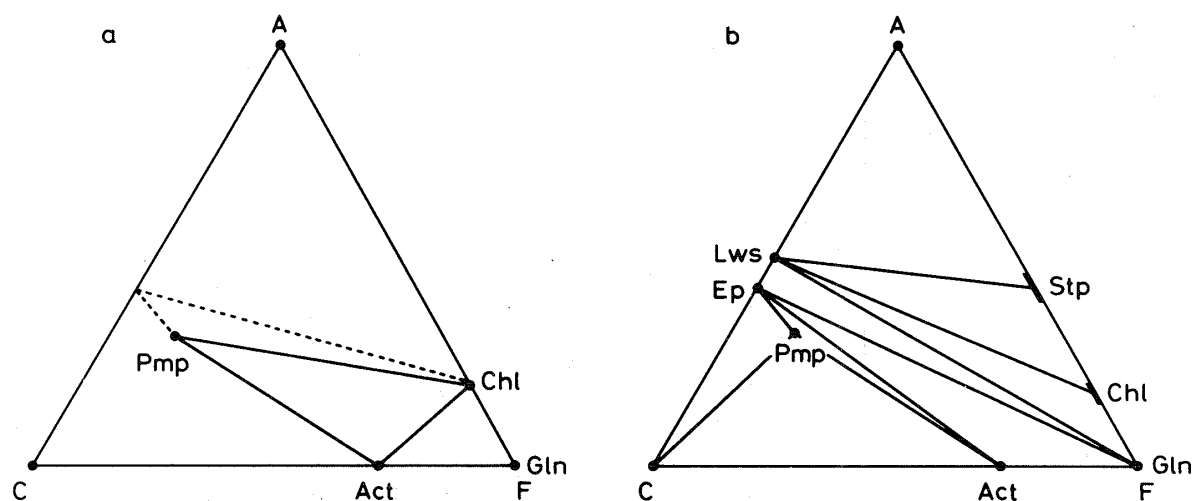
橋本(1966)はPA相を上述のように定義したのち、その代表的な地域として紀伊半島の三波川変成岩(関ほか, 1964)と若桜地域の三郡帯の変成岩をあげた。前者は当時古生層とされていた地域で、Chl-Ep-Pmp-Actの共生が特徴的である。なお以後とくに断らない限り、岩石の系には石英-アルバイト-白雲母とH₂Oを主とする流体相が過剰にあるとする。この変成相は明らかにぶどう石-パンペリー石相(PP相)と緑色片岩相(GS相)の間であるから、これをそれらのいずれかの亜相とみることもできる。SEKI(1969)はPA相の意義を早く見抜き、独立な変成相として扱った(第2図)。これはそれ以後の多くの研究者にPA相の意義を認めさせるのに大きく貢献したと思う。COOMBS(1960)などもPA相に相当するものを知らなかったわけではなく、それをPP相の高温部として取り扱ったのである。COOMBSのPA相に相当する帯では、ぶどう石は不安定である。彼にとってはぶどう石を作るような低温でも、ESKOLAの変成相の概念が適用できるということが重要であったのであろう。私自身はMIYASHIRO & SEKI(1958)にならって、初めPA相を藍閃石片岩相のパンペリー石亜相として取扱い(BANNO, 1964)、その後PP相の勉強不足を痛感しすぎて、日本変成相図では秩父帯の弱変成地域をPP相とした(HASHIMOTO *et al.*, 1970)。

PA相の特徴的な組合せが普通に産する地域とし

ては、ニュージーランドのHaast片岩類のWakatipu地域(KAWACHI, 1975)やアルプスの一部(COOMBS *et al.*, 1976)などが知られている。70年代後半にPA相であることが、はっきりしていた地域は案外少ない。

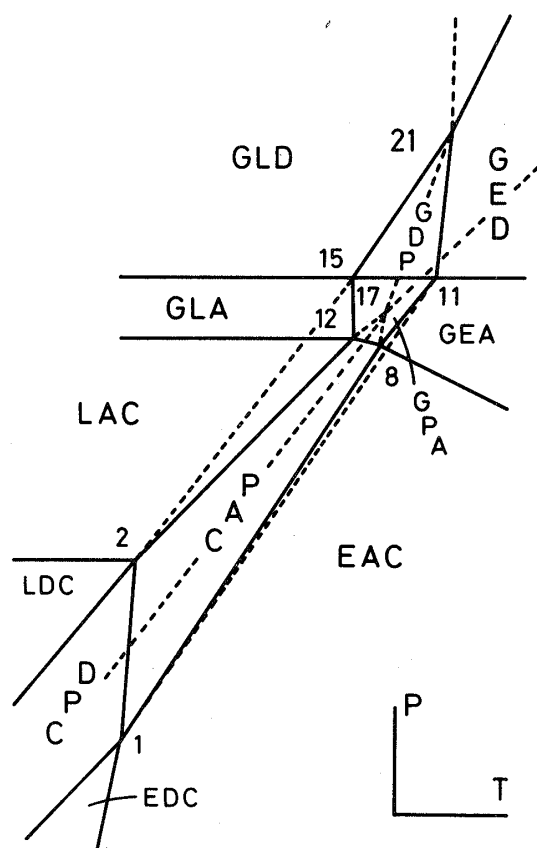
1. ACF系近似

橋本(1966)の定義したPA相はパンペリー石、アクチノ閃石、緑泥石、スチルプノメレンの存在で定義されているが、これら4相が共存するのがPA相の定義ではないから、まずACF系でPA相の共生関係を近似してみよう。そのためにPA相をPmp-Act-Chlの共存で定義して出発する。したがって、ACF図は第3図-aになる。かつてMIYASHIRO & SEKI(1958)は三波川帯の関東山地でパンペリー石の産する地域の共生関係を第3図-bのように表現したが、これは藍閃石(クロス閃石を含めて)の存在が普遍的でEp-Gln, Lws-Glnを代表的とみなしたためである。平島(1983)によると関東山地のローソン石の産状は、この地域をLws-Glnで特徴づけるようなものではないので、第3図は三波川帯に対しては成立しない。第4図は平島が導いたACF近似で形式的に可能な7枚のSchreinemakersの網に基づいた変成相区分図のなかで、筆者が一番もっともらしいと思う網、彼の変成相区分図7である。彼の網ではPA相は4つの可能な網に含まれている。近似が粗いため、それら4枚の区分図のどれが安定であるかは決められず、どれも本当らしくみえる。筆者が彼の網7を採用したのは、Lws-Act-Chlから



第3図. ACF系のPA相の共生関係。

a: 平島(1983), b: MIYASHIRO & SEKI(1958)の藍閃石片岩相のパンペリー石亜相。関東山地に対して提案されたもの。



第4図. 変成相区分図(平島, 1983, 第7図の網7). この図の略号: A=アクチノ閃石, C=緑泥石, D=ディオブサイド, E=緑簾石, G=藍閃石, L=ローソン石, P=パンペリー石. 実線は変成相の境界, 破線は変成相に関係しない単変曲線.

Ep-Act-Chl という累進変成作用は知られていないから, この境界の単変曲線はない方が自然とみたためである. 平島自身は区分図6と7との違いは少ないとしてあえて両者を区別しなかった. 彼が全ての区別可能な温度・圧力領域を変成相とはせず, 塩基性の岩石にみられる反応のみで変成相を定義したのは, 幾何学的に可能な全ての領域を変成相とはしないという前節で紹介したのと同じ精神にのっとったものである. 3成分近似でのPA相と他の変成相との関係は次節で論ずる. 平島(1983)の変成相区分図は, PA相が中圧あるいは高压中間群の変成相であることを, うまく示している.

2. 4成分近似

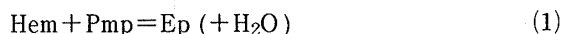
しかし, 当初の定義はともかく, 紀州の三波川帯でも四国の三波川帯(BANNO, 1964, A帯の高温部)でもChl-Ep-Act-Pmpの組合せはごく普通に産するから, 3成分近似はおおまかな特徴をつかむためにしか役に立たない. そのため, COOMBS *et al.* (1976),

NAKAJIMA *et al.* (1977)やBROWN(1977)はPA相を4成分系で記述しようと試みた. それらでは緑簾石とパンペリー石の $Y_{Fe}(Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al))$, スピネル研究の慣習に従う; $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)=X_{Fe}$ とする)が著しく異なることに注目して, ACF- Fe^{3+} を成分とする4成分系で扱っている.*

低温の変成相に属する岩石には緑泥石が大概含まれている. そのような場合には, BROWN(1977)が提唱した緑泥石から $Al-Fe^{3+}-Ca$ 面への投影がよく使われる. 第5図-aはCOOMBS *et al.* (1976)の4成分系の共存関係にアルカリ角閃石固溶体を加えたものである. この図に対応するBROWN投影は第7図の囲いに示されているが, 緑泥石の組成はBROWNと違い簡単な組成 $R_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$ を用いている($R=Fe^{2+}+Mg$).

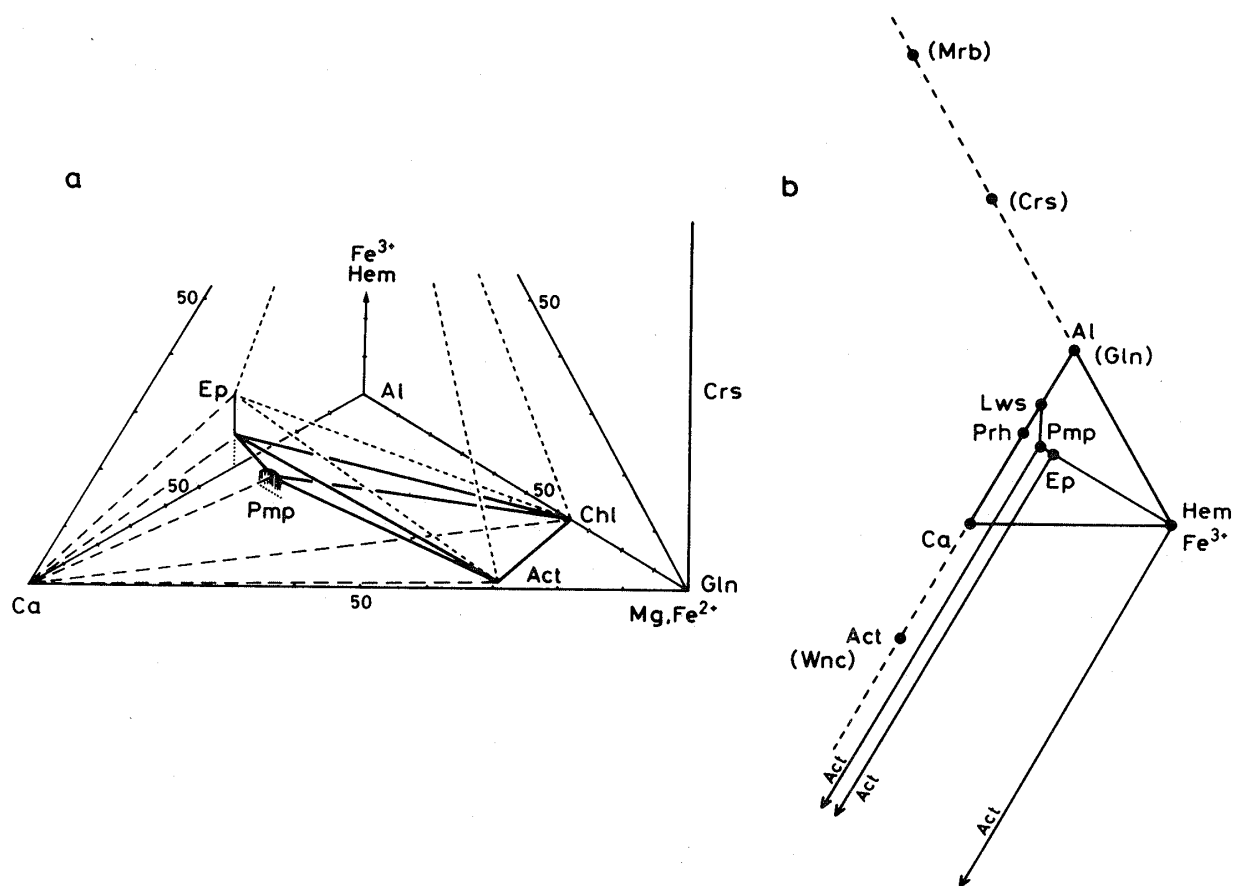
4成分近似では, Chl-Ep-Pmp-Actが広い温度・圧力範囲に存在することを容易に説明できるが, 系の成分の数をふやすと, ある組合せの安定な温度・圧力領域が広くなり, また全岩組成の影響が強くなり, 解析がしにくくなる. GL相をGln-Lwsで定義すると, PP相との中間にはAct-PmpとGln-Epが共存する温度・圧力範囲が生ずる. 橋本(1966)の定義を尊重すると, 藍閃石(またはクロス閃石, Crs)が産する(塩基性岩に)場合はGL相の一部としてよからう.

NAKAJIMA *et al.* (1977)は三波川帯を例にとりて, 4成分近似でPA相とGS相との関係を考察して第6図に示した擬2成分系の相図を提案した. この図はモデル系での関係鉱物に熱力学的モデルを作り, 計算したものである. モデルはもっと改良可能であるが, 緑簾石の組成変化などをなかなかうまく説明している(と筆者は思う). さらにこのモデルは, PA相の低温部では特徴的な4相共存がこわれて, 緑泥石+アクチノ閃石を過剰成分とすると, 次の反応が起こることを予想している(過剰成分であるアクチノ閃石と緑泥石とは示さない).



左辺の組合せはのちに饗場(1982)によって四国西部の秩父帯の弱変成部から記載された. 緑簾石を含

* 5成分系であっても, ある範囲の $Mg-Fe^{2+}$ と $Al-Fe^{3+}$ 置換の範囲では, 3相共存がありうる. それは全岩組成次第である. そのような場合には, ACF的な3成分近似が有効になる. そして, 共存鉱物間の分配係数が1に近い元素の対は, ACF系のFのように1成分として扱っても誤差は少ない. それは不連続反応の転移ループの幅が狭く, 4相あるいは5相共存の温度領域が狭いからである.

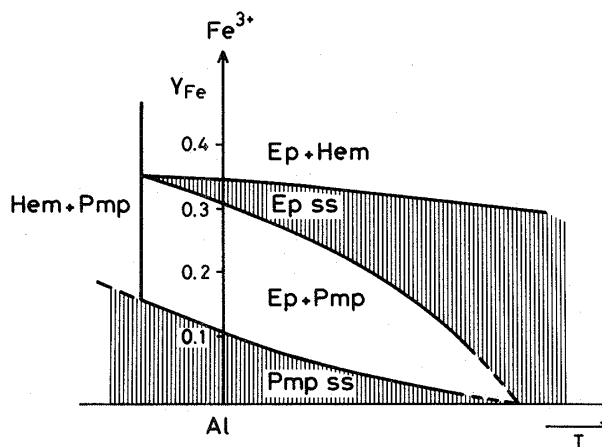


第5図. 4成分近似によるPA相の共生関係.

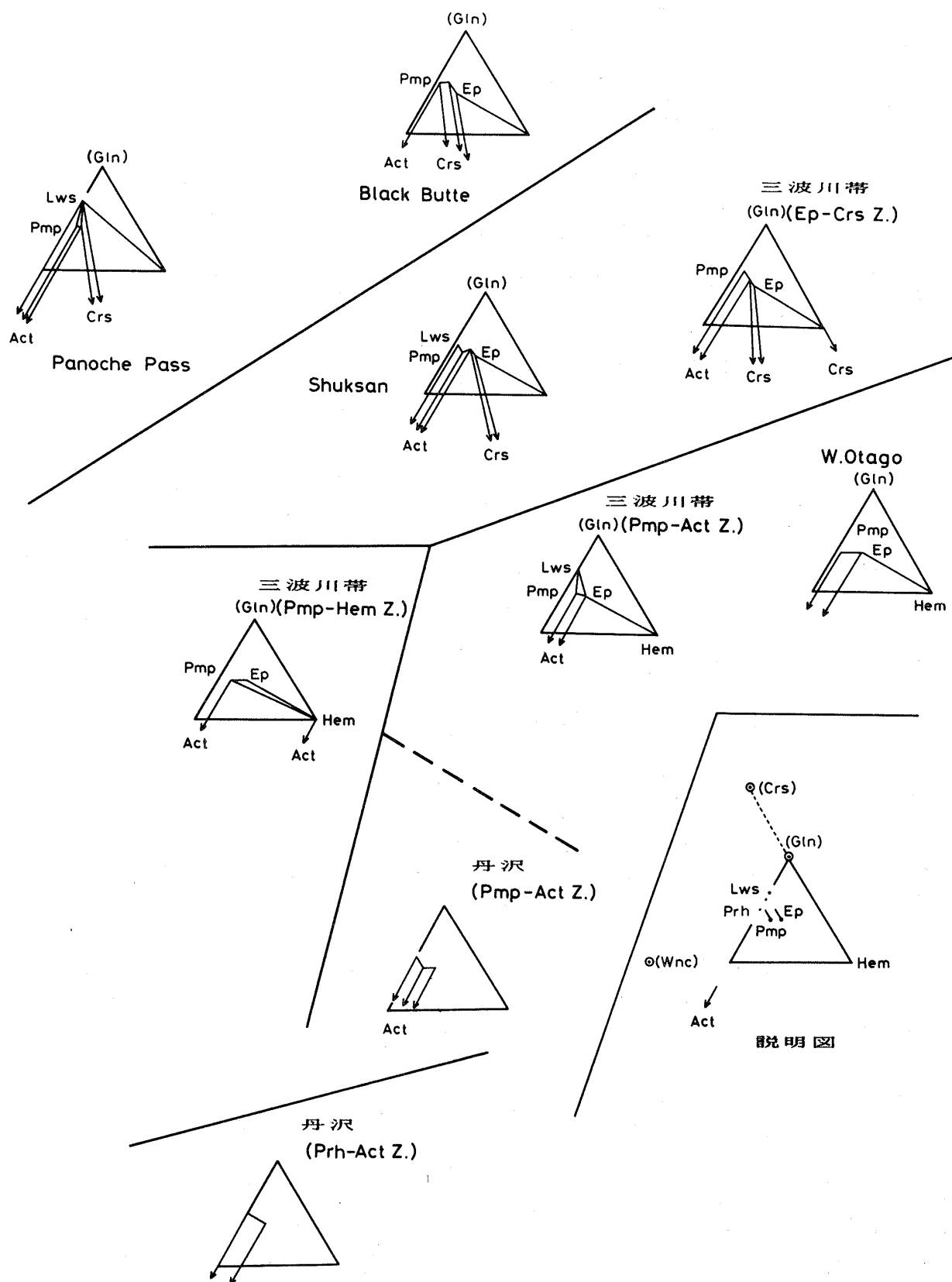
a : 四面体図 (COOMBS *et al.*, 1976), b : Brown 投影 (緑泥石から Al-Ca-Fe³⁺ 面への投影) によるいろいろな鉱物の座標.

まない Pmp-Act-Hem 組合せを PA 相の一部とするか、独立の変成相とするかは判断が分かれるが、饗場によるとこの組合せはあまり頻繁に産するものではないということ、橋本(1966)のPA相の提案とも矛盾しないから、PA相の低温亜相あるいは低温鉱物帯とするのが適当であろう。この亜相では、緑簾石はパンベリー石とアクチノ閃石とが共存しなければ存在しうる。第7図はBrown投影で三波川帯を初め各地の共生関係を示したものである。三波川帯については、彼の図をその後のデータで修正してある。三波川帯のPA相の最高温部ではウィンチ閃石あるいはクロス閃石が産するがそのような部分はごく狭い。三波川帯以外では、KAWACHI(1975)が研究した Wakatipu 地方のⅢ帯があげられる。彼のⅢ帯は藍閃石の産するⅢa帯と産しないⅢb帯に区分されている。彼はⅡa帯とⅡb帯の違いは結晶時期の前後関係を示している可能性を認めていたが、YARDLEY(1982)は藍閃石は変成作用の早期の産物で、PA相の鉱物ではないと結論した。

第7図にみられるように、Ep-Gln (Crs)とPmp-Actの共存する地域は少なくない。三波川帯以外のPmp-Actの組合せが産し、藍閃石も産する地域としては、BROWN(1977)があげている Francis-

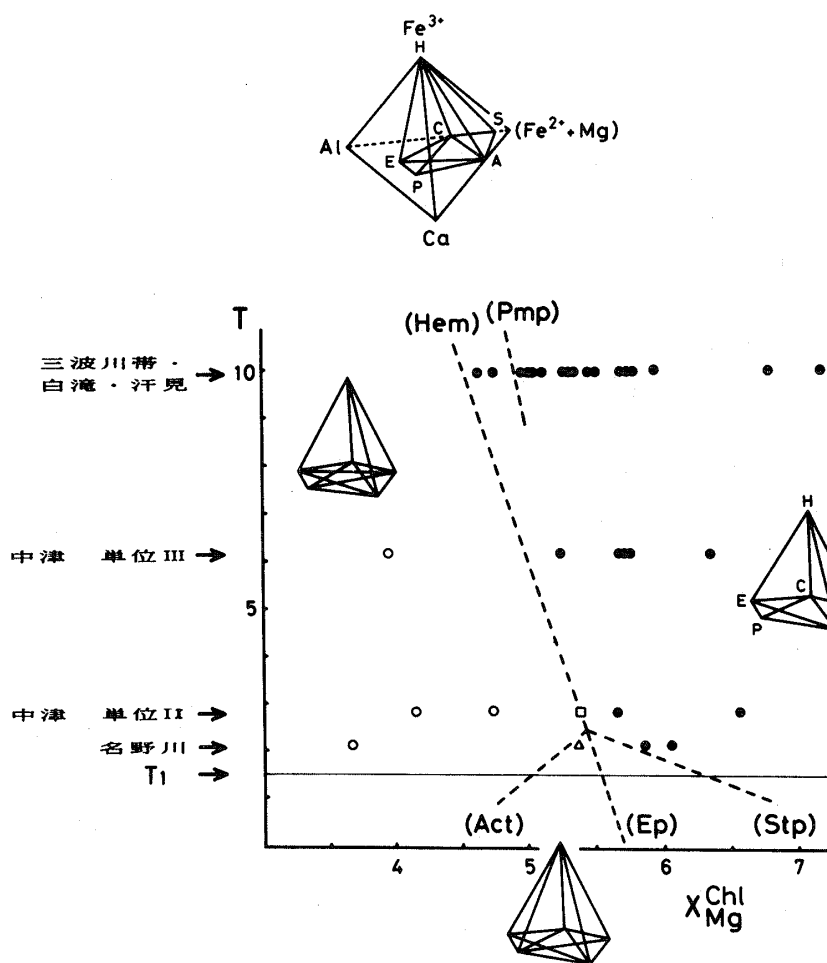


第6図. 4成分系近似でのPmp-Epの安定関係を擬2成分系で表示した図 (NAKAJIMA *et al.*, 1977). 緑泥石とアクチノ閃石は過剰としている。



第7図. Pmp-Act 共生の各地での安定関係を Brown 投影したもの.

Black Butte, Shuksan, Otago 西部は BROWN (1977), Panoche Pass は ERNST (1965), 三波川帯は NAKAJIMA *et al.* (1977) と 饗場 (1982), 丹沢は 荒井 (1987) による.



第8図. 三波川帯のPA相.

饗場(1982)の組成・共生関係図に共生関係を示す四面体図を重ねた。スチルプノメレンの産する領域は温度上昇に伴って減少する。5成分系の共生関係を四面体図で示す問題については本文参照。この図の略号：A = アクチノ閃石，C = 緑泥石，E = 緑簾石，H = 赤鉄鉱，P = パンベリー石，S = スチルプノメレン。

canの一部とWashington州のShuksan変成岩類以外にも，CORTESOGNO *et al.* (1984)が記載したイタリア各地があげられる。FranciscanのPanoche PassではPmp-Act組合せは産するが，緑簾石を産せず，またアラゴナイトが産するのでGL相の低圧部である(ERNST, 1965)。

三郡変成帯の錦町(NISHIMURA, 1971)，勝山(HASHIMOTO, 1968)，旭町(橋本, 1968)などもPA相とみなせよう。

3. 5成分系

4成分系の近似で三波川帯の塩基性片岩を扱っても滅多に不都合は生じないが，共存する鉱物のなかでパンベリー石は他のものよりも相対的にMgに富んでいるから，MgとFeの分別の影響があるに違いない。饗場(1982)は実際にPA相で緑泥石が Fe^{2+} に富んでいる場合には，スチルプノメレンが産することに気づいた。そこで彼はMg- Fe^{2+} 置換の影響を緑泥石のMg- Fe^{2+} 置換のそれに置き換え，5成分系での取扱を試みた。しかし，彼の方法には，ややあいまいな点があったので，この機会に少し厳

密に扱ってみる。

第8図は饗場による四国西部の秩父帯の共生関係と緑泥石の X_{Mg} との関係である。ある温度で緑泥石の X_{Mg} が低いとスチルプノメレンが，高いとアクチノ閃石が安定である4相共存がある。第8図には，饗場(1982)が彼の第4図に示した共生関係を示す四面体図を重ねてある。四面体図は Al_2O_3 - Fe_2O_3 - CaO -ROを頂点にとっている。彼の系は緑泥石の X_{Mg} を座標にしている以上，緑泥石の関係しない単変曲線は扱えないので，単変曲線(Chl)は省いてある。* 化学ポテンシャルを軸にしていなため，単変曲線は一般に直線でないことに留意する必要があるが，ここでは定性的に直線で示してある。

饗場(1982)が扱ったのは Fe_2O_3 - Al_2O_3 - FeO - MgO - CaO 系で，それが石英・アルバイト・白雲母と H_2O を過剰に含む場合にはざくろ石(Mnを濃集

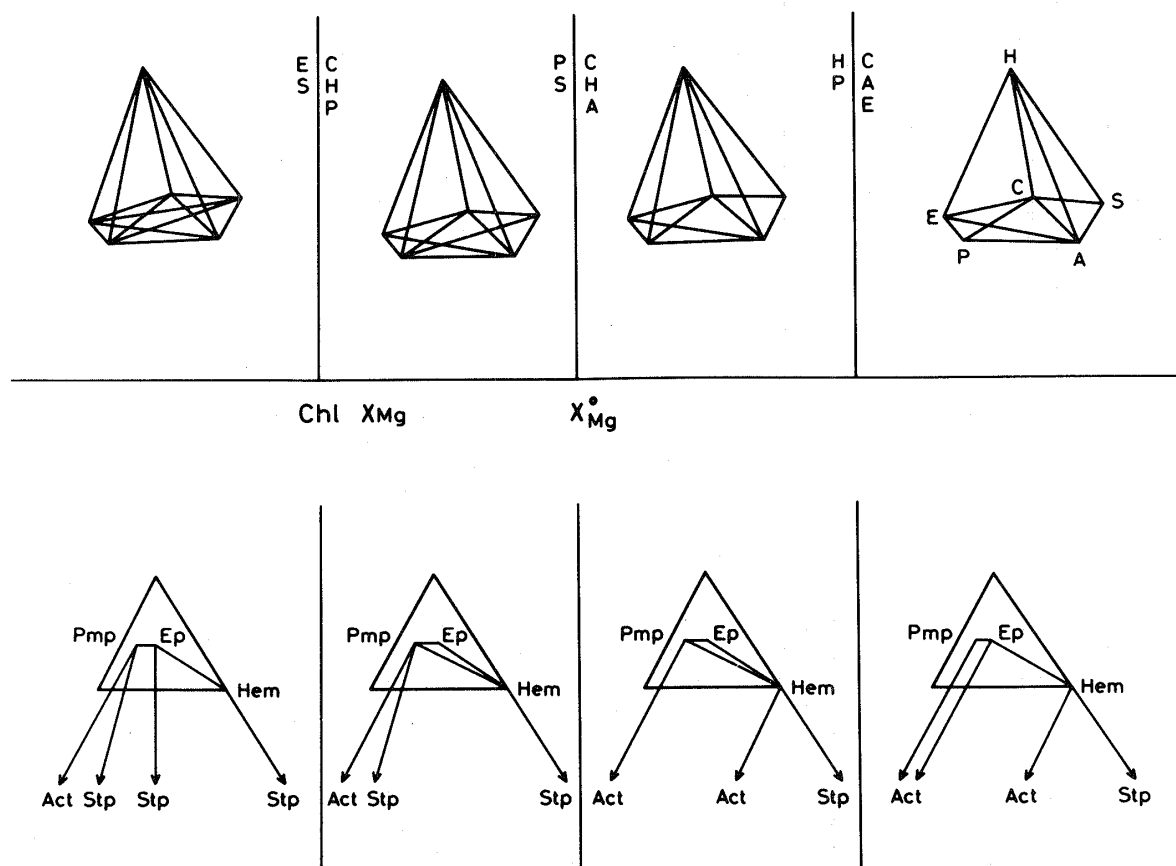
* 単変反応を関係していない相の種類で表す(ZEN, 1966)。(Chl)は緑泥石は関係しないので X_{Mg} とは関係なく， X_{Mg} 軸に平行になる。

する)が産しなければ、成分の数に仮定が含まれない。5成分系を正面からとりあげるのは容易でないから、緑泥石を含む部分系だけを考える。これは BROWN (1977) や NAKAJIMA *et al.* (1977) の近似での緑泥石を過剰に含む系とは違う。そこでは緑泥石をもつ岩石は緑泥石過剰として扱えるが、今の場合緑泥石の組成は一定ではないので、それを過剰成分とすることは熱力学的に許されない。そこで次のように扱ってみる。

5成分系は一般に最大5相からなる。5成分5相系は任意の温度・圧力のもとで共存鉱物は一定の組成をもつ。固溶体を含まない系では、この5相共存の(4次元の)体積のすぐ隣に、次の5相共存の体積がある。しかし固溶体を含む系では、5相共存の隣には一般には4相共存の体積がある。

5成分系で緑泥石が常に存在する系を考える場合、緑泥石の Al/Si は変わらないとしてもよいから、その組成は X_{Mg} で表せる。5相共存の緑泥石の組

成は一定であり、4相共存の緑泥石のそれはある範囲で変わりうる。第9図は第8図の共生関係にある温度 T_1 で、緑泥石の X_{Mg} を変数として示したものである。四面体図は第8図と同じ投影法である。ここにみられるように、緑泥石の X_{Mg} のある範囲では4相共存で、その共生関係は5相共存体積で終わる。5相共存では X_{Mg} は一定で (X_{Mg}^0)、それはさらに $X_{Mg} > X_{Mg}^0$ である4相共存に接する(そのような緑泥石がない場合には、緑泥石が常に存在するという仮定が成り立たない)。第9図には4相共存領域の境界の組合せを4成分系の反応の形で示してある。隣り合った2つの組合せの境界での5相共存は、もちろん模式的にも四面体図では表せない。この関係を簡略化して説明するため、第10図に角閃岩相での AFM 系の共生関係を示した。2相共存の境界が3相共存になっていることを黒雲母の X_{Mg} をパラメーターとし、共生関係を示したのが第10図-bである。黒雲母から上側(A頂点側)の黒雲母を含む共



第9図. 第8図の温度 T_1 での緑泥石の組成と共生関係。

図の上部は X_{Mg} の関数としての共生関係を四面体表示したもの。図の下部は図の上部と同じ共生関係を緑泥石過剰の Brown 投影。図上部の共生関係の境界での鉱物組合せの変化は第4・8図の略号で示してある。C-P-A-Sは四面体の底面。四面体図は第8図参照。

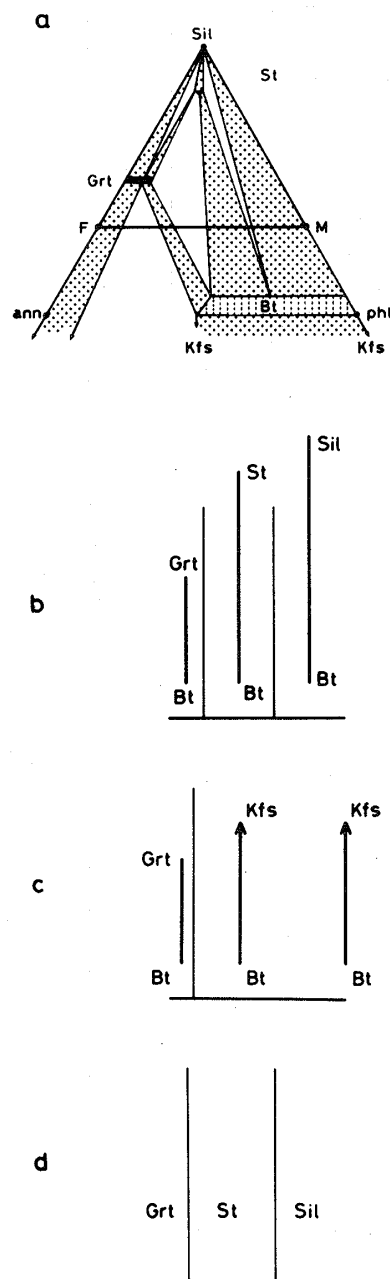
生関係は X_{Mg} の増加に従って, St (十字石)-Grt (ざくろ石)-Bt (黒雲母), St-Bt, Sil (珪線石)-St-Bt, Sil-Bt と変化する. ここでは一般の X_{Mg} に対しては, 黒雲母を含む 2 相共存が安定であるから, 2 成分系で表現され, 2 つの 2 相共存の境界が 3 相共存になる. この図では 4 次元の体積の役割を三角形が果たしているのである.

第 10 図は第 9 図では気がつきにくい問題が図示できる. 第 10 図-c は黒雲母と AFM 図の下側の共生関係を示している. ここでは広い範囲の X_{Mg} で Kfs (カリ長石)-Bt の組合せが安定である. したがって, X_{Mg} が同じだというだけでは, 異なった共生関係が存在しうる. 5 成分系のように共生関係が図示できないものでは, 第 10 図の b と c とを混同することがありうる.*

第 9 図では緑泥石が常に存在しているから, これを緑泥石から Hem-Ep-Act 面に Brown 投影をすれば, さらに共生関係を三角図で表現できる. しかし, 四面体での表現もすでに定量的ではないから, このように単純化するにつれて図はさらに定量性を失った模式的なものになる. 第 10 図の c と d はそれぞれの系でのもっとも単純化した共生関係の表現であるが, これらは単に模式的な意味しかない.

5 成分系の 5 相・4 相の共存関係を第 9 図のように配置するとき, 5 相共存の両側にある 2 つの 4 相共存の構成鉱物の総計は 5 である. 同じ X_{Mg} の緑泥石を含んでも異なった共生関係が存在しうることは, 第 10 図-a に示した AFM 系のモデルで示した (もっとも 3 成分系ではどの 2 つの共生関係をとっても, 鉱物種の数の和は 3 であり, この方法は適用できない). したがって, 同じ X_{Mg} であっても, 共生関係図では矛盾する組合せがありうる. 例えば, Sil-Bt 組合せと Kfs-Bt 組合せは共存できない. 第

10 図-a に示されているように, 黒雲母の $(Fe^{2+} + Mg)/Al$ は珪線石と共存する場合とカリ長石と共存する場合は違うので, 黒雲母は厳密には X_{Mg} だけでは記述できない. もっとも黒雲母の $(Fe^{2+} + Mg)/Al$ 比から鉱物組合せを分類することは, 理屈では



第 10 図. 多成分系の共生関係を簡略化して表現するためのモデル AFM 系.

a : 角閃岩相の AFM 図 (TURNER, 1981, の図を簡略化したもの). b : 黒雲母の X_{Mg} を変数とした表現. ある領域の X_{Mg} に対しては擬 2 成分系になる. c : 同じ X_{Mg} に対して別の共生関係が可能なことを示す図. 図-a の黒雲母の下側の共生関係. d : 図-b で黒雲母をはぶいて 1 成分としての表現.

* 第 9 図の 5 成分系の 4 相共存の各鉱物の組成は固定されていないので, 1 点では表せないが, 共生関係だけならば, 固溶体組成があまり意地悪でないかぎり, 四面体図で表せる. しかし, 固溶体の組成は緑泥石の X_{Mg} の変化により, Al/Mg 比などが変わりうるから, 定量的な投影は原理的にできない. また, 緑泥石を含む 4 相の擬 4 成分系としての共生関係には, 真の 4 成分系にはない性質がある. つまりある組成の緑泥石を含む 4 相共存に縮退があってはならない. Al_2O_3 - Fe_2O_3 - CaO - RO 四面体で 4 相が四面体をなしていれば, その共存関係は縮退を含まない. 4 相がその四面体内で平面をなす場合が問題である. 各点を表す点でつくる四角形の対角線間の化学反応が不可能ならば, 四面体内では面になっていてもかまわない. 2 つの相が R を含みその X_{Mg} が等しければ, 対角線間に反応が生じるから, これは許されない. したがって縮退しているか否かは, 図を見ただけではわからない.

できるが、グループ間のその比の差は少ないことが多く、実際には黒雲母の組成だけで、どのグループの鉱物組合せかを判断するのは困難である。*

4. X-Y 軸への拡張

上の表現法はさらに次のように拡張できる。我々の系は緑泥石に加えて、さらに例えばパンペリー石を含むとする。緑泥石の X_{Mg} に直交してパンペリー石の Y_{Fe} を縦軸にとる。もちろん、温度・圧力は一定とする。5 相共存では共生鉱物の X_{Mg} も Y_{Fe} も決まっているから、その共生関係は図の 1 点上でのみ可能である。また、4 相共存は単変系であるから Y_{Fe} と X_{Mg} とは関数関係にあり、X-Y 面上の線で表される。これは MIYASHIRO & SHIDO (1985) が雲母で、HOSOTANI & BANNO (1986) がアルカリ角閃石で成功した固溶体の組成-共生関係図の Schreinemakers 的取扱と原理的に同じである。SHIBAKUSA (印刷中) が同じ方法をパンペリー石にも適用したように、緑泥石とパンペリー石の Fe^{2+} -Mg 分配を考慮すれば、この考察と同じことはパンペリー石だけを使ってもできるが、原理の説明のためここでは 2 つの鉱物を使っている。またパンペリー石の X_{Mg} は直接測るのでなく、構造式を仮定して計算するので誤差が多い (Y_{Fe} も同じだが) ので緑泥石を選んだ。第 11 図はこの方法の一例として、饗場 (1982) のデータによって作った 5 成分系の共生関係である。

$$\mu (\text{Mg 緑泥石端成分}) = \mu^0 + RT \ln X_{Mg} \quad (2)$$

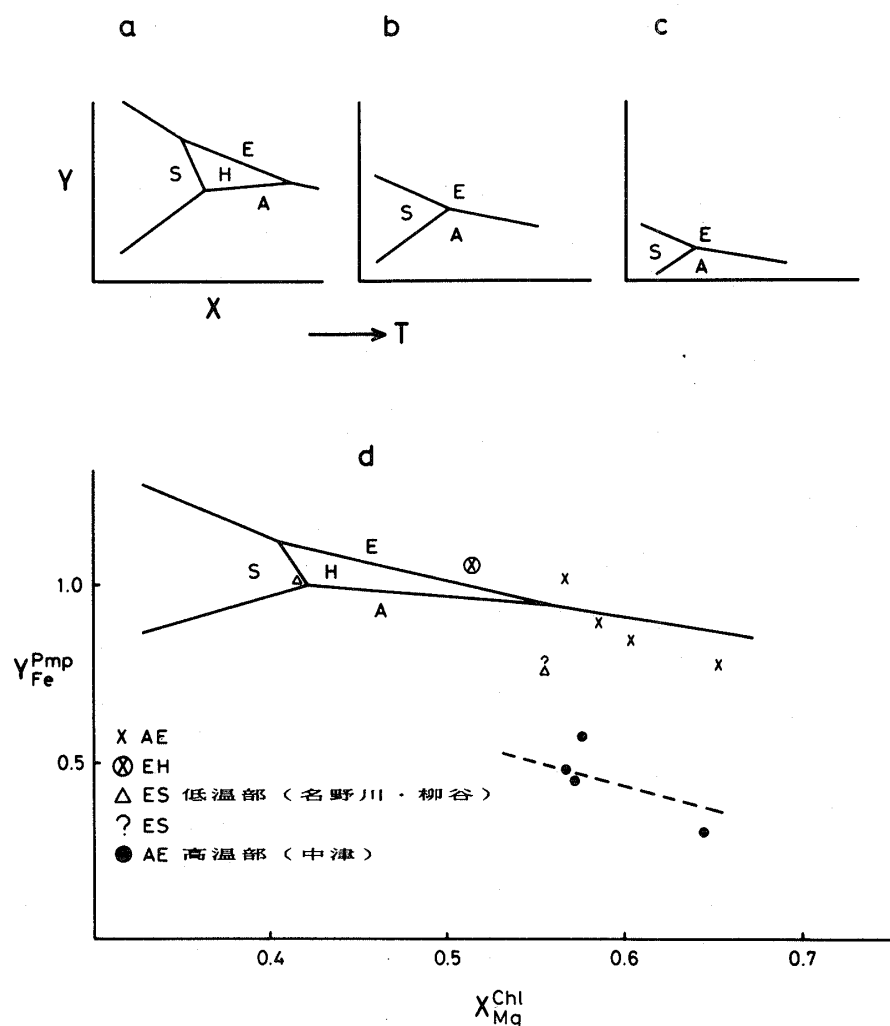
の関係から、理想溶液を仮定すれば、等温の条件では μ と X は簡単に変換される。したがって、この図は温度・圧力一定で X_{Mg} と Y_{Fe} とを軸にした化学ポテンシャル図における Schreinemakers 的取扱である。5 相共存は不変点で、5 つの単変曲線が不変点から放出される。この図である面積に対応するのは自由度 2 の緑泥石とパンペリー石を含む 3 相共存であるから、1 つの相を指定すると双変領域が定義される。その共生関係は $Al-Fe^{3+}$ 置換を無視した形で表現できる。それは緑泥石とパンペリー石が存在する ACF 図になる。このような表現では、 Y_{Fe} (Pmp) の代わりにどんな示強変数をとることもできるから、温度 T をとってもよい。それは饗場 (1982) が彼

の第 4 図で行ったことである。饗場の場合は系の組成変化を μ (MgO) で指定している点が適切ではなかった。それは一般的には緑泥石の X_{Mg} と簡単には結びつけられない。したがって、彼の図のただ 1 つ修正を要するのは横軸を μ (MgO) でなく μ (Mg 緑泥石) あるいは X_{Mg} で表現することである。その結果は単変曲線の第 1 近似が直線にはならないということが不便であるが、その程度の修正でよい。

第 11 図-a $\rightarrow$ c には第 8・9 図から期待される共生関係の温度変化を示し、同図-d には中津単位 II の共生関係を示した。Pmp-Hem 亜相に対応する柳谷・名野川地域の共生関係は図-c のように、赤鉄鉱の領域がごく狭くできているとすれば説明できる。図-d にみられるように、実測が予想と違うのは? で示した Ep-Stp (スチルブノメレン) の組合せのみである。他の点には期待される組成と実際のその多少のずれはある (例えば ES) が、おおよそは期待に近い組成をもっている。多少の難点はあるにしても、饗場 (1982) のデータは PA 相でこのような解析にたえる唯一の例である。他のデータ例えば KAWACHI (1975) や NAKAJIMA (1982) のデータは 4 成分系近似で解析できる。

このようにある条件を満足すると、5 成分系の共生関係の解析はいろいろ可能である。しかし、そのためにはいくつかの情報を棄てざるをえないので、注意しないと奇妙なことが起こりうる。例えば、第 11 図は緑泥石とパンペリー石を軸にした共生関係図として唯一 (unique) ではない。5 成分系のどの断面をとるかによって、同じ軸をとっても複数個の図が存在しうる (第 10 図の AFM 系参照)。第 2 には、当たり前であるが、この系には緑泥石もパンペリー石も存在しない共生関係もたくさんあり、それらについてはこの図では全くわからない。これは別に緑泥石と緑簾石を含む部分系についての図を作れば、多少は解決する。緑簾石を含む系と緑泥石を含む系は Chl-Ep-Pmp の 3 相共存領域で接するから、そのようにして取り扱う部分を増やしていくことができる。第 3 の、そして最も重要な欠陥は全岩化学組成を表現できないことである。第 11 図-b の各領域は ACF 図で特徴づけられる。例えば、単変曲線 Act-Ep の上下の ACF 図はパンペリー石と緑泥石と共存する鉱物を表すが、曲線の上下の共生関係は等化学的でない。単変曲線上では共存できない組合せが表現されるのではなく、4 相体積が表現される。

* 4 次元の幾何学を代数的に扱うことはもちろんできる。関心のある方は SPEAR *et al.* (1982) を参照してください。しかし天然物や実験系を扱うには、誤差のある問題を扱えるようにしなければならない。5 成分系を正面から扱うのは、筆者には今のところできない。しかし、誤差を考慮して 5 成分系の共生関係を扱うプログラムを作ることは原理的に可能であり、誰が成功するかの問題にすぎない。



第11図. 5成分系の共生関係の組成図, X-Y 図, での表現. 図の座標のとりかたは図-d 参照.

図-a → 図-b → 図-c は温度上昇に伴う共生関係の変化. 図-d の●は中津地域高温部の Ep-Act 共生. 破線は高温部での Ep-Act 単変曲線. 他の記号は柳谷・名野川地域での実測した組成. 実線は図-a に基づいた単変曲線. ? は予想される場所からずれてプロットされている. もう一つの三角は ES 境界にあるべきで, 少し期待からずれている. 他の組成は期待された位置にプロットされている. 鉱物の略号は第4・8・9図と同じ. データは Aiba *et al.* (1984) による.

したがって, そのような図を通常の ACF 図と混同しないことが必要である. 例えば, 第11図の Ep-Act 単変曲線は全岩組成としてはある範囲に対応しているので, 全岩組成は1次元ではない.

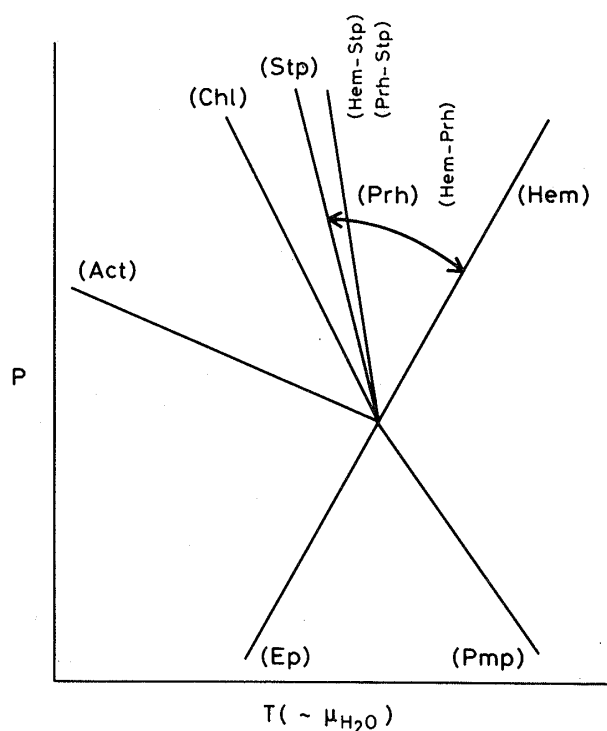
5. Schreinemakers の束

ZEN (1974) は Appalachia 変成帯の Taconic 地塊のぶどう石やパンペリー石をもつ組合せを記載し, 5成分系の Schreinemakers の束を作った. 彼の考察は例によって固溶体は一切扱っていないので饗場 (1982) の取扱とのよい対照になる. 彼の論文の常として, 厳密だがわかりにくい. そこで図を解読して彼の5成分系の Schreinemakers の束 (ZEN の第15図) に Act-Pmp-Chl-Ep の共生関係のありうる領域

を示したのが第12図である. この組み合わせは Act-Pmp-Chl-Ep-Hem-Stp-Prh (ぶどう石) の7相の組合せから, Hem-Stp-Prh を除いたものである. 彼の図には7相のうち存在しない2相によって5相組合せを表現しているから Hem-Stp, Stp-Prh, Prh-Hem が不在の領域を加えれば, 上記の4相の安定でありうる領域が得られる. ZEN の扱った地域では, 彼が NM, TM と HM とした地域が PA 相となる.

他の変成相との境界

饗場 (1982) の研究によって, ある程度の範囲の全岩組成に対しての PA 相の共生関係の特徴がつかま



第12図. ZEN (1974) の5成分系の Schreinemaker の束.

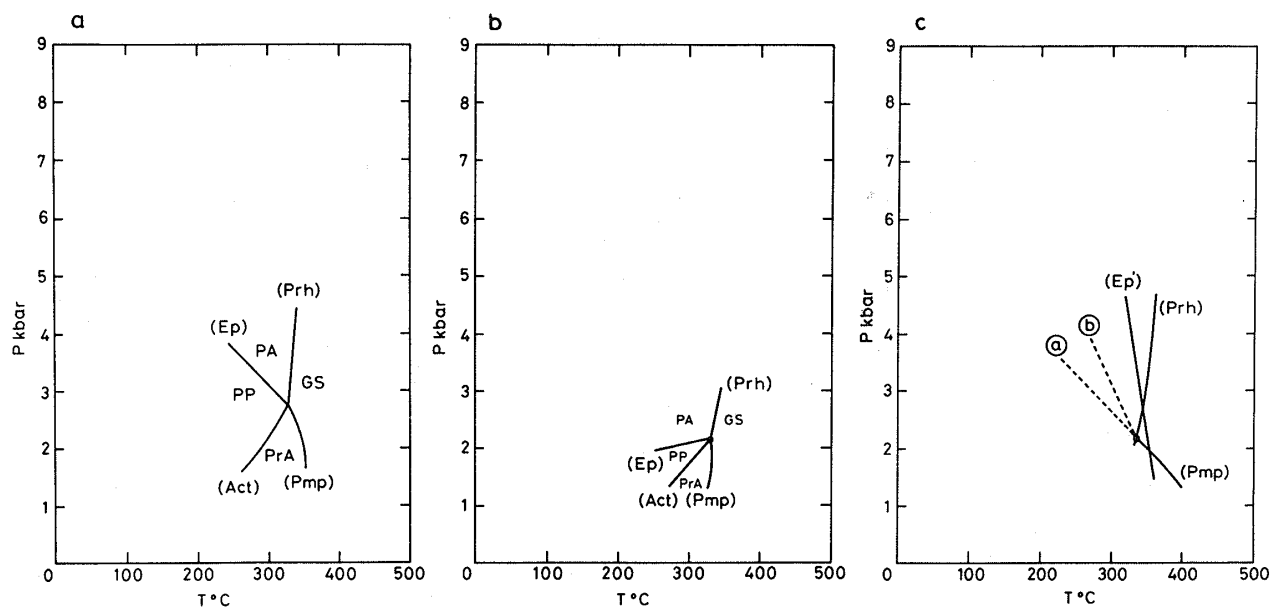
矢印で囲んだ弧は Pmp-Act-Chl の可能な領域.

れた. 次に PA 相と他の変成相との関係を調べてみる.

1. 3成分近似

平島(1983)の3成分近似(第4図)によるPA相の低温側は、緑泥石-輝石相に接する. それは Schreinemaker 解析による予想としては新しい提案を含んでいるが、三波川変成帯には緑泥石-輝石相は存在しないか、少なくともその存在は証明されていないということは、別の機会にややくわしく言及した(BANNO & SAKAI, 印刷中). 平島によるとPA相の高温・低圧側はGS相である. 三波川帯ではPA相は藍閃石片岩相のEp-Crs 垂相とでもいえるべき共生関係に接続する. この変成相の Fe_2O_3 に乏しい岩石の共生関係は Ep-Act-Chl の緑色片岩型なので、平島の予想は3成分近似としては正しいといえよう. PA相の高圧側は平島の予想では Act-Lws-Chl の組合せがあることになるが、3成分近似ではこのように表すべき変成相はまだ実例が知られていない.

平島(1983)の Schreinemaker の網は緑泥石-輝石相の温度・圧力平面での位置を明らかにする点にあったため、ぶどう石の入った系は扱っていない. しかし、PA相はもともとPP相の垂相として提案された以上、PP相との関係の考察をさけることはできない. しかし、筆者はPP相についての経験も勉強も圧倒的に不足しているので、以下の考察では



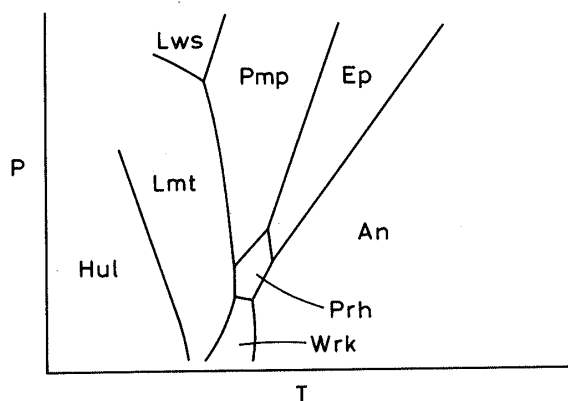
第13図. PP相とPA相との関係. 3成分近似.

a : LIU *et al.* (1985) が合成実験に基づいて想像したPP相の安定領域. b : この論文での安定関係. c : LIU *et al.* (1985) の実験と計算値との関係. (Ep') は (Ep) 単変反応の緑泥石にアンチゴライト端成分を用いた実験. (a) は通常の脱水反応のエントロピーで反応のエントロピーを近似した場合. (b) はぶどう石のエントロピーを低めに見積ったもの. (Prh) は NITSCH (1971) の実験, (Pmp) は LIU *et al.* (1985) の結果.

大きな誤りを含んでいるかも知れない。

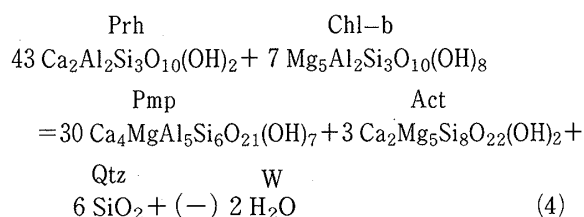
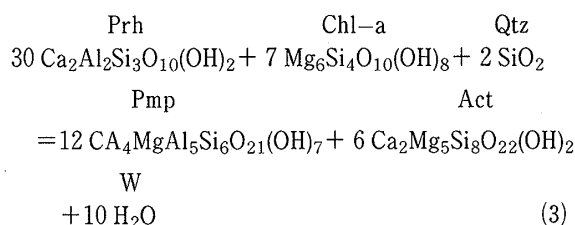
ぶどう石をもつ変成相が藍閃石片岩相に連続することはないだろう。したがって、我々はまず Prh-Ep-Pmp-Act-Chl の 5 相の関係を調べればよいだろう (ぶどう石が GL 相に単独に存在することもあるかもしれない)。FeO と Fe₂O₃ を含まず、石英と流体を過剰にもつモデル系を考えると、それは Al₂O₃-CaO-MgO の 3 成分系である。低温では一般に緑泥石は存在するとしてよいから緑泥石も過剰とみなして、3 成分系を (Chl) の単変曲線をはぶいて 2 成分 4 相系と扱える。この系の Schreinemakers の束を Liou *et al.* (1985) のものと、平島 (1983) の近似法で計算したものとを第 13 図-a と b として示した。両者は (Ep), つまり, Prh=Pmp+Act …… (3) 式, の勾配が著しく違う。これは PA 相の安定領域, その天然での産状に大きな違いをもたらすので、以下に少し詳しく考察してみる。

平島型のモデルで計算した単変曲線の勾配は (Prh), Pmp=Act+Ep, および (Pmp), Prh=Ep+Act, に対しては、それぞれ NITSCH (1971) と Liou *et al.* (1985) によって実験で決められたものとよく一致する。したがって、単変反応 (Ep) についての計算と実験の違いが問題となる。第 13 図-c には (Ep) について Liou *et al.* (1985) による勾配, 実線, といういろいろな反応のモデルについて計算したそれら, 破線, を比較してある。図中で ① および ② は緑泥石をアンチゴライト端成分で近似したもの (① と ② とは採用した熱力学データが違う) である。これらは従来, PP 相と PA 相の境界として描かれていたものに近い (橋本, 1966; SEKI, 1969)。これに対し,



第 14 図. COOMBS (1960) の各変成相の安定領域。
Wrk=ワイラケ沸石, Lmt=ローモン沸石,
Hul=ヒューランド沸石。

実際の低温変成岩の緑泥石は Mg : Al = 5 : 2 となるとよい近似が得られる (KAWACHI, 1975)。これら 2 種の緑泥石を使って反応 (Ep) を表すと、次の (3) 式と (4) 式をうる。図-c の (Ep') は (3) に対するものである。



したがって、アンチゴライト端成分とアメサイト端成分の比によって、ぶどう石と緑泥石の分解反応は脱水反応になったり、吸水反応になったりする。従来 PP 相と PA 相の境界の勾配を大きく考えたのは、(3) 式を採用しているためである。しかし、緑泥石の組成を (Mg, Fe) : Al = 5 : 2 とすると、吸水反応になるが、H₂O の放出量が非常に少ないので脱水反応のエントロピーだけを反応のエントロピーとする近似では反応曲線は水平に近くなる。これは PA 相と、PP 相の境界は圧力に敏感であるということである。Liou *et al.* (1985) の勾配は反応 (3), つまりアンチゴライト端成分を用いた反応に対するものである。また反応 (Ep) を実験のとおりとすると、不変点の周りでの Prh の安定領域は 180° より大きくなり Morey-Schreinemakers の定理に反する。したがって、Liou *et al.* (1985, 第 13 図-a) では単変反応 (Pmp) と矛盾しないように、しかしなるべく大きな勾配をうるようにしたと思われる。どうして (Ep) の勾配を高めに推定したのかは、彼らの (印刷中) とされていた実験データが結局発表されなかったため検討できなかったから、私の全くの想像である。

さて、反応 (Ep) に対して 2 つの見解のいずれが真実に近いかを検討するため、実験がなされている反応 (Pmp) と (Prh) と計算値を比較して第 13 図-c に示した。これらに対しては平島型の粗い近似 (FYFE & VERHOOGEN, 1958, に従って反応エントロピーを脱水反応のエントロピーに置き換え、流体の

体積を一定とする)が実験で得られた勾配をなかなかよく近似することがわかる。しかし反応(Ep') (は緑泥石をアンチゴライト端成分で近似していることを表す)に対して計算値、破線④, はあまりよい近似を与えない。そこで図-cには LIU (1971) の実験に基づいて HELGESSON *et al.* (1978) が修正したぶどう石のエントロピー (5 e. u. 通常の値より少ない) を使って計算したものを破線⑤として示した。後者は実験からのずれはやや少なくなるが、それでも実験と計算値の差は大きい。単変曲線の勾配は $dP/dT = \Delta S/\Delta V$ で求められるが、 ΔV の値は正確であるから、計算で大きい勾配が実際には小さいためには、構成鉱物に固体のエントロピーはその構成要素の固体としてのエントロピーの和に近いという Neumann-Kopf の通則に従わないものがあるはずである。しかし、反応に参加する鉱物の組合せが(Ep') と違っている(Pmp)と(Prh)に対しては、計算値はよい近似を与える。実際反応(Ep')の勾配の計算値を実験値に近づけるためPrhのエントロピーに小さな値を採用すると、反応(Pmp)の実験値と計算値の違いはかえって大きくなってしまう。したがって、ぶどう石を含む実験で決めたとされる反応曲線の勾配には内部的な整合性がない(もっとも NIRSCH, 1971の実験は有名であるが、元来単変反応ではないから計算値が一致しても、どこまでモデルの正しさを示すと援用できるかには、疑問が残らないわけではない)。したがって、反応(Ep')に対する実験値と計算値が一致しないのは多分実験が不完全なためと考える。そこで実験のない反応(4)は平島型のモデルを採用した勾配の計算を採用する。その結果は第13図-bに示されているように正の小さな勾配を与え、LIU *et al.* (1985) の結論である、図-aに示されるものとは著しく違う。COOMBS (1960) がぶどう石を伴う組合せの安定領域を第14図のように、温度軸に平行に近い境界で表したのは先見の明があったのであろう。

LIU *et al.* (1985) の考えは累進的にPP相からPA相に移行するという常識には合っているが、そのようなことは野外の事実としても本当なのであろうか。三波川変成帯にPP相があるか否かははっきりしない。BANNO (1964), 鈴木 (1975), MARUYAMA & YAMASAKI (1978) などは、秩父帯にぶどう石のある部分があることを認めた。秩父帯全域が三波川帯とは漸移するとみると、温度・圧力経路は高い正の勾配

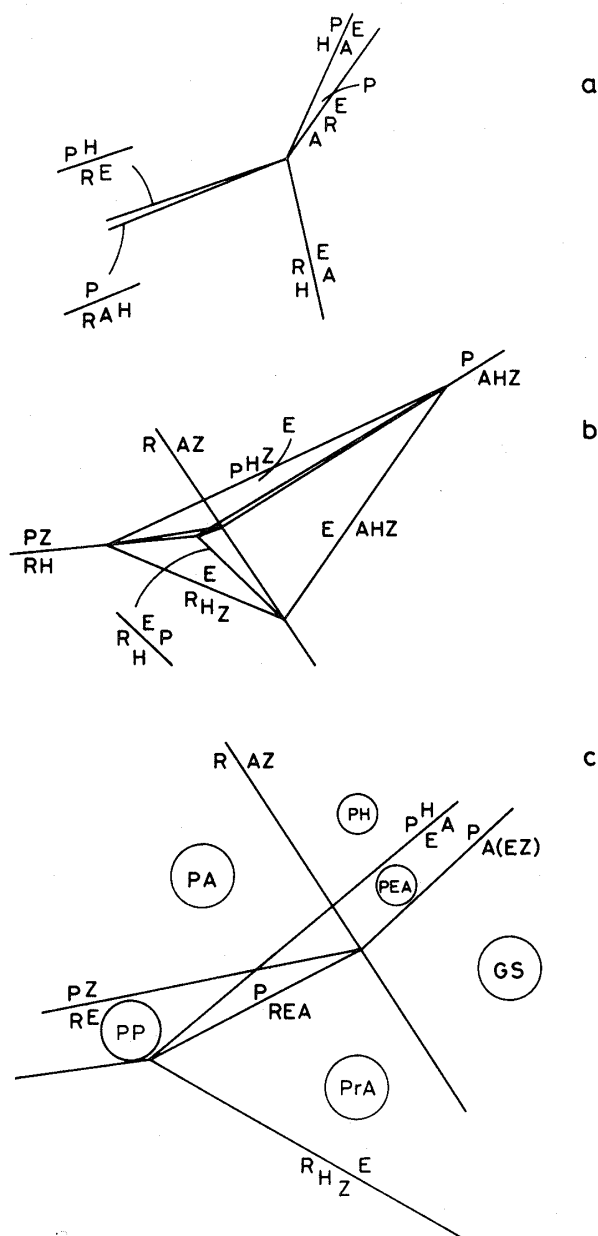
をもたねばならない。しかし、埋没変成作用の場合と異なり、広域変成作用では、温度と圧力がともに上昇していくかどうかは自明ではなく、個々の場合に決めていかねばならない。磯崎 (1988) が考えているように三波川帯と秩父帯、少なくともその一部、は別の変成帯と考えればその矛盾はなくなる。秩父帯と一括されているものには性質が大変違うものが含まれているという磯崎 (1986, 1988) の考えは検討に値する。私は全ての秩父帯北帯が三波川帯とは漸移すると主張はしないが、その一部は漸移すると依然考える。そのような地域、例えば柳谷地域(饗場, 1982)や上八川・池川構造線のすぐ南などではぶどう石は産しない。

2. 4 成分近似

4成分近似によるPA相と他の変成相との関係は、第7図に示されている。PA相より高温の変成相はもちろん緑色片岩相である。四国の三波川帯では NAKAJIMA *et al.* (1977) が示したように、塩基性片岩にパンベリー石が産しない変成度ではEp-Crsの組合せが安定であるが、PA相の最高変成度の部分ではEp-Hem-Chlと共存する角閃石はウインチ閃石あるいはマグネシオ・リーベック閃石である。三波川帯より低圧の相系列では、PA相の高温部は赤鉄鉱を含む岩石にもウインチ閃石やクロス閃石を産しない典型的な緑色片岩相であることが予想される。Haast 変成岩がそれに相当するだろう。PA相の低温側は3成分近似でもわからないので4成分近似ではとても手がでない。しかし平島 (1983) の図から読むと、Lws-Pmp-Chl-Actで特徴づけられる変成相があるに違いない。これに近いものは前にふれたFranciscanのPanoche Passの組合せである。

PP相からPA相への移行は意外によく知られていない。ニュージーランドでは以前からPP相からPA相への漸移が知られている(COOMBS, 1960)。最近の記載としては KAWACHI (1975) がよいが、ぶどう石が消滅してローソン石ができるということは可能ではあるが、もう少し詳しい記載がないと必ずしも納得できない。三波川変成帯では紀州で関ほか (1964) がPP相からPA相への漸移関係を報告しているが、この地域は地層の対比が最近大きく変わっており、新しい地層区分に対応した岩石学的総括はまだなされていないので、両者が漸移するか否かは改めて検討されねばならない。九州の四万十帯では今井ほか (1971) がPP相からPA相への漸移を報告

している。しかし最近の報告では、荒井(1987)の丹沢の研究が一番よいと思う。第7図の4成分系近似の低压部分は彼のデータによっている。丹沢の比較的高圧の部分はPA相と不連続反応で境界が定義されていない。PP相とPA相はこの部分で漸移的に



第15図. 4成分系近似によるPP相とPA相との関係。

a: Ep, Pmp, Prh, Act, Chl, Hem の6相系。b: 上記にZ(単斜ゾイサイト)を加えた系。c: 緑簾石を(単斜ゾイサイト-ピスタサイト)固溶体とした場合。図-bを参照して適当に単変曲線を描いた。直線の両側は単変反応の組合せを示す。鉱物の略号は以下のもの以外は第4, 8, 9, 11図と同じ: Z = ゾイサイト, R = ぶどう石。

移り変わるのであろう。広域変成帯では、温度上昇が圧力上昇を伴っているかどうか、個々の地域で確認しないで、一般的に想像するのは危険である。しかし、丹沢のようなところでは、変成帯の地質からみて温度・圧力は伴って上昇するであろうし、荒井(1987)の結果はそのことを示している。第15図は荒井のモデルに赤鉄鉱を加えた系の平島モデルによるSchreinemakers図である。PA相のAct-Ep垂相と、Pmp-Hem 垂相の安定領域が区別できる。しかし、このモデルのようにパンペリー石が高温でぶどう石を含む組合せに分解するのは現実的でなからう。これは系の構成鉱物のなかで、 Fe_2O_3 をもたないCa-Al珪酸塩としては、ぶどう石のみを採用したためである。この欠点を補うため、さらに単斜ゾイサイトを加えた系のSchreinemakersの束を第15図-bに示した。ここではぶどう石が高温型であるという非常識なことではないが、逆にPA相の主体であるEp-Act-Pmpが共存できる領域が極端に小さい。これは緑簾石でのピスタサイトと単斜ゾイサイトの固溶体のパンペリー石の分解に対する効果が無視されているからである。これは固溶体を扱わないSchreinemakers解析の限界をよく示しているといえよう。第15図-cは固溶体効果を考慮したSchreinemakersの束の一部である。もっとも境界は適当に(fitted by eyes)描いてある。

PA相とPP相の境界についての固溶体効果はCHO *et al.* (1986)が論じている。しかし彼らの実測した固溶体の組成と変成度との間には、期待される関係がないようにみえる。これは低温で固溶体の平衡論を無前提で、つまり岩石組織の検討あるいは非平衡結晶作用の影響などの考察なしに適用することに疑問をさしはさむものであろう。あるいは鉱物帯の内部の温度分布が連続的でないのかも知れない。

3. 5成分近似

低温・高圧の変成作用で5成分近似での解析がある程度正確にされているのは、四国三波川帯のPA相と神居古潭のSHIBAKUSA(印刷中)による研究だけであり、まだその精度で何かを云々できるだけの知識を我々は持ちあわせていない。

おわりに

この論文ではパンペリー石-アクチノ閃石相の鉱物組合せの特徴と他の変成相との関係を論じた。低温の変成相との関係は勉強不足で自分でもすっきり

するところまでいかなかった。しかし、PA 相が元来ぶどう石-パンペリー石相の亜相として提案されたこと、COOMBS はそれを PP 相の一部として取り扱ったように、PP 相の内容がもう少しわかってこないと PA 相の低温部の様相はよくわからない。このあたりの共生関係は平衡到達度が低いこともあって、まだまだ解明されねばならないことが多い。私はこの小論を書いて、両者の関係について随分勉強できた。中圧ないし高圧中間群の PA 相を含む累進変成作用の様子は、日本とニュージーランドでの最近の研究で随分わかってきたように思われる。

この稿を書いた基本的な視点は、筆者が金沢大学在職中に中島 隆・饗場清文両氏との討論で得られた。原稿の検討には橋本光男・平島崇男・新庄裕尚・中島 隆の諸氏の協力をえた。西村祐二郎氏は原稿の長さ・期限(!)についての筆者のわがまを聞き入れてくださった。これらの人々の協力がなければ、この原稿は完結することはなかったであろう。心からの感謝をここで述べさせていただきたい。

なお、Schreinemakers の方法についての簡単な解説は坂野(1988b)を参照されたい。また、平島型モデルによる Schreinemakers の網は田辺ほか(1988)のプログラムで計算した。

文 献

- 饗場清文, 1982: 四国中西部秩父累帯北帯, 中津・名野川地域の三波川変成作用. 地質雑, **88**, 875-885.
- AIBA, K., HIGASHINO, T., SAKAI, C. and BANNO, S., 1984: Electron micro-probe analysis of rock-forming minerals from the Sanbagawa metamorphic rocks, central Shikoku, Pt. III. Nakatsu-Nanokawa and Yanadani-Mikawa areas. *Sci. Rept. Kanazawa Univ.*, **29**, 65-90.
- 荒井 融, 1987: 丹沢山地のテクトニクス—変成岩類の相解析による考察—. 地質雑, **93**, 185-200.
- BANNO, S., 1964: Petrologic studies on Sanbagawa crystalline schists in the Bessi-Ino district, central Shikoku, Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, [II], **15**, 203-319.
- 坂野昇平, 1988a: 討論会『青色片岩の歴史』. 地質雑, **94**, 233-234.
- , 1988b: Schreinemakers の方法による共生関係の解析とその岩石学への応用. 北海道の構造帯—岩石学とテクトニクス, no. 3, 135-152.
- BANNO, S. and SAKAI, C., in press: Geological evolution of the Sanbagawa metamorphic rocks in central Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. (London), Spec. Publ.*
- BROWN, E. H., 1977: Phase equilibria among pumpellyite, lawsonite, epidote and associated minerals in low grade metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **64**, 124-136.
- CHAO, M., LIOU, J. G. and MARUYAMA, S., 1986: Transition from the zeolite to prehnite-pumpellyite facies in the Karmutsen metabasites, Vancouver Island, British Columbia. *Jour. Petrol.*, **27**, 467-494.
- COOMBS, D. S., 1960: Lower grade mineral facies in New Zealand. *Rept. Internat. Geol. Congr. 21st. Sess.*, Part 13, 339-351.
- , NAKAMURA, Y. and VUAGNAT, M., 1976: Pumpellyite-actinolite facies schists of the Taveyanne Formation near Loeche, Valais, Switzerland. *Jour. Petrol.*, **17**, 440-471.
- CORTESOGNO, L., LUCCHETTI, Gabrielle, and SPADEA, Piera, 1984: Pumpellyite in low-grade metamorphic rocks from Ligurian and Lucanian Apennines, Maritime and Alps, Calabria (Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **85**, 14-24.
- ERNST, W. G., 1965: Mineral paragenesis in Franciscan metamorphic rocks, Panoche Pass, California. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **76**, 879-914.
- ESKOLA, P., 1920: The mineral facies of rocks. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **6**, 143-194.
- , 1929: Om mineral facies. *Geol. Foren. Stockholm*, **51**, 157-172.
- , 1939: Die metamorphen Gesteine. In CORRENS, C. W., ed.: *Die Entstehung der Gesteine*, 263-407, Springer, Berlin.
- FYFE, W. S. and VERHOOGEN, J., 1958: Equilibrium in systems containing water. In FYFE, W. S., TURNER, F. J. and VERHOOGEN, J.: *Metamorphic Reactions and Metamorphic Facies*, 105-148, *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **73**.
- 橋本光男, 1966: ブドウ石パンペリー石変グレイワッケ相. 地質雑, **72**, 253-265.
- HASHIMOTO, M., 1968: Glaucophanitic metamorphism of the Katsuyama district, Okayama Prefecture, Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, [II], **17**, 99-162.
- 橋本光男, 1968: 岡山県旭町の三郡変成域. 地質雑, **74**, 433-437.
- HASHIMOTO, M., IGI, S., SEKI, Y., BANNO, S. and KOJIMA, G., 1970: *Metamorphic Facies Map of Japan (1:2,000,000)*. *Geol. Surv. Japan*.
- HELGESEN, H. G., DELANY, Joan, M., NESBITT, H. W. and BIRD, D. K., 1978: Summary and critique of thermodynamic properties of rock-forming minerals. *Amer. Jour. Sci.*, Spec. Vol., **278A**, 229p.
- 平島崇男, 1983: Schreinemakers の束の方法を用いた藍閃石変成作用の鉱物共生関係の解析. 地質雑, **89**, 679-691.
- HOSOTANI, H. and BANNO, S., 1986: Amphibole composition

- as an indicator of subtle grade variation in epidote-glaucophane schists. *Jour. Metam. Geol.*, **4**, 23-35.
- 今井 功・寺岡易司・奥村公男, 1971:九州四万十帯北東部の地質構造と変成分帯. 地質雑, **77**, 207-220.
- 磯崎行雄, 1986:秩父累帯北帯新改層とペルム系末の黒瀬川地塊北縁収束域, 地質雑, **92**, 497-516.
- , 1988:三波川変成作用と三宝山帯-四万十帯の形成. 月刊地球, **10**, 367-371.
- KAWACHI, Y., 1975: Pumpellyite-actinolite and contiguous facies metamorphism in part of Upper Wakatipu district, South Island, New Zealand. *N. Z. Jour. Geol. Geophys.*, **18**, 401-441.
- 小島丈兒, 1979:岩石学の論理構造—特に花崗岩問題に寄せて—. 広島大地研報, no. 22, 1-70.
- KRETZ, R., 1983: Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, **68**, 277-279.
- LIU, J. G., 1971: Synthesis and stability relations of prehnite, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. *Amer. Mineral.*, **56**, 507-531.
- , MARUYAMA, S. and CHO, M., 1985: Phase equilibria and mineral parageneses of metabasites in low-grade metamorphism. *Miner. Mag.*, **49**, 321-333.
- MARUYAMA, S. and YAMASAKI, M., 1978: Paleozoic submarine volcanoes in the high P/T metamorphosed Chichibu system of eastern Shikoku, Japan. *Jour. Volc. Geoth. Res.*, **4**, 199-216.
- 都城秋穂, 1965: 変成岩と変成帯. 458 p., 岩波書店, 東京.
- MIYASHIRO, A. and SEKI, Y., 1958: Mineral assemblages and subfacies of the glaucophane-schist facies. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, **29**, 199-208.
- and SHIDO, F., 1985: Tschermak's substitution in low-and middle-grade pelitic schists. *Jour. Petrol.*, **26**, 449-487.
- NAKAJIMA, T., 1982: Phase relations of pumpellyite-actinolite facies metabasites in the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku. *Lithos*, **15**, 267-280.
- , BANNO, S. and SUZUKI, T., 1977: Reactions leading to the disappearance of pumpellyite in low-grade metamorphic rocks of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Petrol.*, **18**, 263-284.
- NISHIMURA, Y., 1971: Regional metamorphism of the Nishiki-cho district, Southwest Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ.*, [C], **6**, 203-268.
- NITSCH, K. H., 1971: Stabilitätsbeziehungen von Prehnit- und Pumpellyit-haltigen Paragenesen. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **30**, 240-260.
- RAMBERG, H., 1952: *The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks*. 317p., Chicago Univ. Press, Chicago.
- SEKI, Y., 1969: Facies series in low-grade metamorphism. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **75**, 255-266.
- , 1972: Lower-grade stability limit of epidote in the light of natural occurrences. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **78**, 405-413.
- 関陽太郎・大場忠道・森 隆二・栗谷川幸子, 1964: 紀伊半島中央部の三波川変成作用. 岩鉱, **52**, 73-89.
- SHIBAKUSA, H., in press: Lawsonite-pumpellyite-epidote stabilities in glaucophane schists in the Horokanai-Kamietanbetsu area of Kamuikotan zone, Hokkaido, Japan. *Miner. Petrol.*
- SPEAR, F. S., RUMBLE, III, D. and FERRY, J. M., 1982: Linear algebraic manipulation of n-dimensional composition space. In RIBBE, P. H., ed.: *Characterization of Metamorphism through Mineral Equilibria*. 53-104, Miner. Soc. Amer., Short Course, 10.
- 鈴木堯士, 1975: 地向斜とプレートテクトニクス. 地団研専報, no. 19, 227-232.
- 田辺行雄・柴草英彦・平島崇男・坂野昇平, 1988: N+4系のSchreinemakers' netの計算機による作図(要旨), 岩鉱, **83**, 110-111.
- THOMPSON, J. B. JR., 1955: The thermodynamic basis for the mineral facies concept. *Amer. Jour. Sci.*, **253**, 65-193.
- TURNER, F. J., 1981: *Metamorphic Petrology*. Second ed., 524p., McGraw-Hill, New York.
- YARDLEY, B. W. D., 1982: The early metamorphic history of the Haast schists and related rocks of New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **81**, 317-327.
- ZEN, E.-AN, 1966: Construction of pressure-temperature diagrams from multi component systems after the methods of Schreinemakers: a geometric approach. *Bull. U. S. Geol. Surv.*, **1225**, 56p.
- , 1974: Prehnite- and pumpellyite-bearing mineral assemblages, west side of the Appalachian metamorphic belt, Pennsylvania to Newfoundland. *Jour. Petrol.*, **15**, 197-242.