藍晶石・珪線石・紅柱石の安定關係と變成岩の生成條件¹⁾

都 城 秋 穂*

(昭和 24 年 3 月 10 日受理)

I は し が き

筆者は「ストレス礦物」について」と題した論文において、變成岩の礦物組成もまた、火成岩の場合と同様に、溫度・壓力・化學組成によつて決定されるものであつて、ストレスの影響は無視しても差支えないことをのべた。本稿に於ては、この考え方をもう少し具體化して、珪酸アルミナ礦物：藍晶石・珪線石・紅柱石の安定關係を論じ、それが變成岩の生成條件、殊に壓力の指示者として使用することを示し、最後にそれに關係ある「ストレス礦物」と「アンチ・ストレス礦物」の共生の問題についてのべよう。

藍晶石・珪線石・紅柱石の安定關係については、昔、Neumann²⁾ が熱力學的に研究したことがある。これは誠に尊敬すべき研究ではあるが、1 氣壓の場合しか調べられていない。また彼の使つた試料、殊に紅柱石の純粹さについてかなり疑いがあるから、その結果は必ずしも信ぜられない。したがつてここでは、Neumann の研究から離れて、まず經驗的にこれらの礦物の安定關係を求めてみよう。

II Al_2SiO_5 の安定關係

藍晶石・珪線石・紅柱石はいずれもほぼ Al_2SiO_5 で表わされる化學組成をもっている。したがつて、これらの相互の安定關係は、1 成分系の問題として取扱える。しかし實際は、ある特殊な條件の下では、これらの何れよりもムル石 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ の方が安定になることはよく確められている。この場合に反應が、式：

のような形で起り、 SiO_2 が獨立した固相をなすならば、この兩邊が平衡を保つ系は 2 成分 3 相系であるから、溫度が與えられると壓力が決定する。即ち、 Al_2SiO_5 の安定な溫度・壓力領域とムル石の安定な溫度・壓力領域とは、1 本の線で境される。これとは何等か異なる事情が起るならば、それに應じてムル石の安定な領域の境界も變化する。しかしそのようなことは、大體の問題を論ずるには、重要でない。

ある岩石のなかに Al_2SiO_5 なる組成の礦物が現われるか否かは、その岩石の化學組成にも關係し、複雑な多成分系の問題である。しかし一たんそれが現われる以上は、岩石の化學組成の問題から切り離して、それだけを 1 成分系として扱えるのである。

極めて高い壓力の下でできたことに大體意見が一致している岩石の例として、エクロジャイトをとれば、それを特徴づける珪酸アルミナ礦物は藍晶石である。しかし稀には珪線石も現われる。廣域變成作用に於て、變成度の低い方に藍晶石、高い方に珪線石の現われることはよく知られている。熱變成作用では、ふつうに現われるのは紅柱石であるが、特に變成度が高くなると珪線石が現われることがある。1 氣壓の下で安定なのは少くとも高溫に於てはムル石である。以上のようなよく知られている事實から安定關係を推定すると、藍晶石は高壓と低温の領域で安定、珪線石は高溫の領域で安定、

* 東京大學理學部地質學教室

1) 本稿の内容の一部は 1948 年 9 月 25 日の日本地質學會例會に於いて講演した。

2) Neumann, F.: Z. Anorg. Chem., Bd. 145 (1925), s. 193—238; N. Jb. Min. usw., B. B. 53 (1926), A, s. 1—58.

紅柱石はやや低温の領域で安定、ムル石は低圧の領域で安定らしいことがわかる。

われわれはこの外に、次にのべるようないろいろな事実を知っている。これらのすべてをうまく説明できるように各礦物の安定領域を決定すると、ほぼ圖のようになる。この圖には、便宜上、いろいろな礦物ファシースの物理條件の大體の位置をも記入して置いた。ファシースの境界が直線になるべき理由はないが、便宜上直線で示す。變成作用の温度の上限は、ほぼ珪灰石と擬珪灰石との間の轉移點、即ち約 1200°C である。壓力の上限は明らかでない。

スコットランド高地の正規の廣域變成作用は圖 h のような壓力の現象で、低温の側は藍晶石が、高温の側に珪線石が現われる。その境（即ち珪線石等變成度線）はアンフィボライト・ファシースのなかにある。アメリカの Dutchess County に見られるような變成岩は、圖 d のような壓力の下でできたもので、低温の側に藍晶石、高温の側に珪線石の現われることは同じであるが、その境は、綠簾石アンフィボライト・ファシースのなかにある。

スコットランド高地東北部の廣域變成岩や朝鮮の漣川變成岩類はもつと低い壓力、即ち圖の s くらいの壓力の下で生じた岩石であつて、前者には珪線石と紅柱石が、後者には紅柱石と藍晶石が現われる。筑波の變成岩は圖の r くらいの壓力の下でできたもので、低温の方に紅柱石、高温の方に珪線石があらわれる。

ふつうの熱變成作用では紅柱石を生ずるが、また、珪線石を生ずることもある。ファシースからいえば、概ねアンフィボライト・ファシース又は輝石ホルンフェルス・ファシースである。

火山岩にともなうパイロ變成作用はもつと低壓の現象で、Mull 島のブツフ岩(buchite)のようにムル石を生ずる。

變成作用の壓力條件を決定する因子の一つが地下の深さであることはいうまでもない。そして、ふつうの熱變成作用やパイロ變成作用の場合には、これが支配的な因子であろうと想像される。しかし、廣域變成作用のような場合に、造山運動を起す力などというようなものがどのように関係してくるかは、わからない。

變成作用の起る地域が相當に廣い場合には、部分によつて壓力は著しく異なるかも知れない。また、温度の時間的な變化と、それにともなう再結晶の進みかた如何によつては、最後の生成物は甚しく複雑な多種の殘留礦物の集合となつて、解析を困難にするかも知れない。ここではそのような問題には入らないで、一般的な大すじだけをのべたのである。前掲の圖はもちろん最終的のものではなく、將來の研究によつて補正さるべきものである。

第1圖 藍晶石・珪線石・紅柱石及びムル石の安定關係。
g. f. = green schist facies; e. a. f. = epidote-amphibolite facies; a. f. = amphibolite facies; p. h. f. = pyroxene-hornfels facies; s. f. = sanidinite facies

III 地質學的壓力計

このように天然の礦物の產出狀態から經驗的に求めた珪酸アルミナの安定關係（上圖）が、礦物の

熱力學的性質と如何なる關係になるかを考えてみよう。しかし、その安定關係が熱力學的にはどのようなべきかということは、高温・高壓に於ける問題の諸礦物の性質についていろいろ知らない限り、知り得ない。いまわれわれにできる事は、ある程度までの推測にすぎない。

(1) ムル石と珪酸礦物の分子容の和は、それに對應する量の紅柱石や珪線石の容積よりも常温・常壓ではずっと大きい。もし高温でもそうならば、ムル石の安定な領域と紅柱石や珪線石の安定な領域の境は、前圖に示すように右上りになるはずである。

(2) 紅柱石と珪線石とは、常温・常壓に於ける比重が近いので、高温・高壓に於てどうなるかは不明である。圖のようになっていなければ、紅柱石の方が比重が小さい。これは常温・常壓に於ける關係と同じである。

(3) 藍晶石は、常温・常壓では紅柱石や珪線石よりも比重がずっと大きい。高温・高壓でもこの關係が成立てば、藍晶石の領域と紅柱石や珪線石の領域の境は圖のように右上りになる。

安定關係を熱力學的方法で推定するには、温度と壓力の變化にともなう各礦物の比熱と壓縮率の變化を知り、また或る温度壓力での轉移熱を知ればよい。或いはまた、直接に實驗を行つて決定できれば、それにこしたことはない。とにかく、いつかの日には、われわれは各礦物の生成條件を數値によつてのべることができるようになるであろう。

前掲の圖を見てすぐに氣のつくことは、たとえばアンフィボライト・ファシースや綠簾石アンフィボライト・ファシースに於て、壓力の増大にともなつて、紅柱石・珪線石・藍晶石の順序に出現することである。即ち、一般に珪酸アルミナ礦物は、壓力の指示者である。その意味に於て、變成作用の地質學的壓力計であるといふことができる。

地質學的過程を支配する温度・壓力條件のうちで、温度を知る手段は昔からたくさん知られていた。ところが、壓力を知る手段は、ほとんど知られていない。そこで Eskola も、礦物ファシースの原理の第1の困難として、壓力を知り得ないことをあげている。しかしこの困難も、以上のようにして次第に除かれてゆくであろう。

4 ホルンフェルスの中の藍晶石

藍晶石の最もふつうのでかたは結晶片岩のなかであり、紅柱石のそれはホルンフェルスのなかであることはいうまでもない。しかしこのような一般的な現象にだけ注目して、例外を見ないのは危険である。例外といえども、物理法則の外ではない。實際、紅柱石が結晶片岩にでる場合は世界的に極めて多い。それは例外とはいえないくらい、ふつうの現象である。ところが逆に、藍晶石がホルンフェルスに現われる場合は、極めて稀なように見える。しかしそのような例も、幾つか知られている。

ところが、藍晶石はストレスの作用でできるとか、廣域變成作用でのみできるとかというような前提の下に説明を試みるために、ホルンフェルスの中の藍晶石をも熱變成作用以外の何か他の作用に歸せしめようとする傾向がある。實際、たとえば熱變成作用の後で廣域變成作用があつて、その時に藍晶石ができるというようなことは、充分ありうることはある。しかし筆者には、ホルンフェルスの中の藍晶石の少くとも或るものは、熱變成作用でできたように思われる。

古く H. Eisele³⁾は Schwarzwald のかこう岩の接觸變成帶で藍晶石と紅柱石の共存を記載し、最初に熱變成作用で紅柱石ができ、その後の他の變成作用で藍晶石を生じたと説明した。しかし Klemm⁴⁾はそれに反對して、どちらも熱變成作用でできたと主張している。近ごろ詳細に記載せられた例は、

3) Eisele, H.: Z. Deutsch. Geol. Ges., 59, 131-214, 1907.

4) Klemm, G.: Z. Deutsch. Geol. Ges., 68, 86-92, 1916.

スコットランドの Carn Chuinneag のかこう岩の接觸變成帶である。その記載者 Tilley⁵⁾は、熱變成作用よりもずっと後で廣域變成作用があつて、その時にホルンフェルスのなかに藍晶石を生じたのであると説明している。しかし筆者には、この場合にも熱變成作用で藍晶石ができたと考えられることも充分可能のように思われる。その理由を説明しよう。

この接觸變成帶のまわりは、變成度の低い廣域變成岩にとりまかれている。ところが、接觸變成帶には藍晶石があるが、まわりの廣域變成岩には藍晶石が含まれていないのである。そこで Tilley は、熱變成作用でホルンフェルスのなかに紅柱石や堇青石が生じたが、その後を受けたこの地方全体の廣域變成作用によつて紅柱石や堇青石が藍晶石に變化し、更に廣域變成作用の影響が強くなると、藍晶石は消滅してしまつて、まわりの廣域變成岩（ざくろ石・雲母片岩）のようになるのであるといつてゐる。しかし實際は、Tilley の記載を讀んでみると、藍晶石のなかに、紅柱石や堇青石から變化したものばかりではなくて、紅柱石も堇青石もなしにできたものもある。又ホルンフェルスの中を走る石英脈の中に現われるものもある。したがつて、前にあつた紅柱石や堇青石の役割りばかりを強調するのは好ましくない。そのうえ、まわりの廣域變成岩は藍晶石を含まないのであるから、この藍晶石は熱變成作用でできたと考えた方がよいのではあるまいか。前掲の圖からわかるように、最初に紅柱石を生じ、後で藍晶石を生ずるのは、溫度の低下にともなう1種の下降變成作用にすぎない。(都城著“ストレス礦物について”(本誌)の表に示すように、この Carn Chuinneag の接觸變成帶のホルンフェルスの中のざくろ石は、スペッサルティン分子の極めて少い、アルマンディンに近いものである。これは壓力の高かつたことを示すのかもしれない)。

V 熱變成作用の性質

廣域變成作用では、藍晶石も珪線石も紅柱石も、しばしばできるが、熱變成作用では主として珪線石や紅柱石を生ずるだけであつて、藍晶石は前節にのべたように極めて稀に、例外的にしか現われない。これは何故かということが、一つの大きな問題である。そしてそれは、熱變成作用(單純なる熱變成作用)というものの性質を推定する一つの手がかりである。

前掲の圖に見られるように、ふつうの壓力のところでは藍晶石はずつと低い溫度で安定である。ホルンフェルスの生成する溫度は、それよりは高い。したがつて、ホルンフェルスのなかに藍晶石を生じない。それでは、接觸變成帶のずつと外の方の溫度の低い部分に何故藍晶石ができないかという問題が起る。そのできない理由の一つは、そのようなところでは、アルミナの過剰は藍晶石の形をとるよりも、雲母や粘土礦物の形をとつた方がもつと安定なためであろう。しかしまた、そのような部分は再結晶が不完全で平衡に達しないから、藍晶石の現われうる條件があつても實際上現われないかも知れない。また、時としては現われていても、あまり微粒のために顯微鏡で認められないのかも知れない⁶⁾。

次に、前掲の圖によれば、壓力が高いときには、藍晶石は高溫でも安定である。それなのにホルンフェルスに殆んど現われないのは何故かという問題が起る。これに對しては、たとえば次のようなことが考えられる。このような高溫高壓の下では、一般に火成岩の行う變成作用の種類が變つてきて、ホルンフェルスを作るような熱變成作用を起さないで、進入變成作用とか雲母片岩を作るような變成作用だけを起すのかも知れない。あるいはまた、ふつうに地表に露出する程度の深さまでの岩石の

5) Tilley, C. E.: Min. Mag., 24, 92—97, 1935.

6) Anderson などばスレートをX線粉末法でしらべて、そのなかにたくさんの超顯微鏡的な藍晶石の微粒があることを報告している。Anderson, H. V.: and Chesley, K. G., Am. J. Sci., 22, 103—112, 1931. 變成度の低い熱變成岩についても、この種の研究を行う必要がある。

重さによる圧力だけでは、そのような高い圧力に達しないのかも知れない。熱變成作用の圧力は主として岩石の重さによる圧力であろうが、廣域變成作用の時には造山運動の力による圧力などもきいてきて、もつと高い圧力になるということも、考えられないことではない。

VI 十字石と紅柱石との共存

「ストレス礦物」と「アンチ・ストレス礦物」との共存というものがしばしば興味をもつて記載されている。その代表的な例は、十字石と紅柱石との共生である。筆者のように「ストレス礦物」を認めない立場からいえば、この種の共存は少しも不思議ではない。この十字石と紅柱石とは異なる時期に、何かの異なる条件の下でできたのかも知れない。しかしまた、或る条件の範囲では、両者が安定に共存する場合もあつて差支えない。十字石の安定関係は、他の礦物から切り離して1成分系として取扱うことはできない。その安定領域は場合によつて變化しうる。

十字石と紅柱石との共存は、いまではアルプスの外にも朝鮮や滿洲からみつけられて、かなり一般的な現象であることがわかつた。幾つか記載されたことのある硬綠泥石 (chloritoid) と紅柱石との共存も、同じ性質のものであらう。

VII 藍晶石と紅柱石との共存

藍晶石と紅柱石との共存も、しばしば興味をもつて記載されている。「ストレス礦物」と「アンチ・ストレス礦物」との共存というような意味ではもはやそれは興味をひかないが、それが平衡な共存であるか否かに興味がある。實際、藍晶石と紅柱石との共存する場合の多くに於ては、紅柱石がしだいに藍晶石に變化しつつあるように見える。前掲の圖に示すように、藍晶石と紅柱石との安定領域は異り、両者は定まつた圧力の下ではある定まつた唯一つの溫度に於てしか平衡には共存しえない。したがつて、その共存は自然界に一般には實現しないわけである。紅柱石から藍晶石への變化は、一種の下降變成作用である。それと同じように、紅柱石が珪線石に變化しつつある場合も、あちこちから記載されている。

しかしこんな説明が適用できないように見える場合もある。即ち、藍晶石と紅柱石との共存する場合については、両者が平衡に共存しているらしい例のあることを、Erdmannsdorffer⁷⁾ がのべている。Lacroix や Michel-Lévy と Termier などが記載したような紅柱石と珪線石との規則正しい連晶などにも、これに類する平衡な共存があるかも知れない。

藍晶石・珪線石・紅柱石などが純粹に Al_2SiO_5 で、1成分系であるならば、礦物學的相律から云つても、このなかの二つの礦物が平衡に共存するようなことは起らないはずである。しかし實際は自然界には平衡らしい共存が見られるということ、筆者は、これらの礦物は嚴密には Al_2SiO_5 ではなくて、もつと複雑な化學組成をもっているということによつて説明したい。實際、これらの礦物の分析を見ると、 Fe_2O_3 を 2% くらい含むのは少ない。特に紅柱石は、たくさんの Fe_2O_3 , Mn_2O_3 , TiO_2 などを含みうるようである。したがつて嚴密には、これらの間の變化は1成分系の現象ではない。そこで、これまでにのべてきたような理論は、大體は正しいのであるが、特殊な場合には多少それから外れる場合が起つてもよいのである。

したがつて、藍晶石と紅柱石、あるいは紅柱石と珪線石との平衡な共存は、ある溫度の範圍で起りうることであつて、必ずしも不合理ではない。

7) Erdmannsdorffer, O. H.: N. Jb., Ref. 1929, II, s. 341.

VIII 結 び

紙數の制限のためにやや不充分ではあるが、基本的な點は一應これで論じた。われわれのもつてゐるデータの不完全なために、こんごの決定にまたねばならない點も多い。

坪井誠太郎教授、及び井上タミ子氏に厚く感謝の意を表す。 (東京大學理學部地質學教室)

The stability relation of kyanite, sillimanite, and andalusite, and
the physical conditions of the metamorphic processes.

(Abstract)

Akiho Miyashiro

In this paper is given an inference as to the stability relation of kyanite, sillimanite, andalusite, and mullite. The Stability relation is represented in the figure, in which the ranges of conditions corresponding to various mineral facies are also roughly shown. This diagram was constructed chiefly on the basis of the following facts.

In such high-pressure rocks as eclogite, kyanite is commonly found but sillimanite is rare. In ordinary regional metamorphism under comparatively high pressures as shown by h, d or thereabouts in Fig. 1, kyanite is formed at lower temperatures, and sillimanite at higher. In some cases of regional metamorphism where the pressures prevailing are relatively low as shown by s or thereabouts in the diagram, andalusite also occurs. In thermal metamorphism under even low pressures s, r or still low in Fig. 1, andalusite is most commonly found, but in some highly metamorphosed rocks sillimanite also occurs. Under very low pressures mullite is formed, at least at high temperatures. The figure illustrating these facts is consistent with all these and other modes of occurrence of the aluminium-silicate minerals without exception, insofar as the writer is aware.

It may be seen from the figure that these minerals are useful as indicators of pressures of their formation. If we can determine quantitatively the stability relation in the future, the estimation of pressure in metamorphic processes may become possible.

It is quite usual that andalusite occurs in hornfelses, and kyanite in crystalline schists. The explanation of the absence of kyanite in the ordinary contact metamorphic aureole may be that the inner zone of the aureole was too intensely heated for kyanite to be stable, this mineral being stable only at low temperatures (as is seen in the figure) under moderate pressures, and in the outer zone recrystallization was not so complete as to form kyanite, or other low-temperature minerals, e. g. sericite, clay-minerals, etc., were formed instead of kyanite. In very exceptional cases, however, kyanite occurs as a product of thermal metamorphism.

In most cases where the association staurolite-andalusite or kyanite-andalusite occurs, one mineral of each of these pairs shows such features as to indicate earlier formation than the other, and then the association may be regarded as one of non-equilibrium. There seems to be some cases, however, where the association represents a stable one. The stable association of kyanite with andalusite does not conflict with the mineralogical phase rule, for they are not usually the pure compounds of the compositions Al_2SiO_5 , but contain some quantities of other compounds as solid solutions.