変成作用の型とパンペリー石を含む鉱物組合せ

Pumpellyite-bearing mineral assemblages and type of metamorphism

関 陽 太 郎 (Yôtarô Seki)*

Abstract: On the basis of zonal distribution of some pumpellyite-bearing mineral associations, four types of metamorphism can be clearly recognized as shown in Figure 1. From petrochemical evidences it may be considered that the difference of the nature of zonal divisions between these four types of metamorphism is well explained assuming that solid pressure as well as water pressure decrease in order of Franciscan, Sanbagawa, New Zealand and Tanzawa type.

は じ め に

筆者は数年前、広域変成帯におけるパンペリー石の鉱物組合せと安定範囲を総括した (Seki, 1961a)。そのうちパンペリー石の産状、その他についての多くの重要な論文が内外で発表された。ここではこれらの最近の資料を参照しつつ、再びパンペリー石を含む鉱物組合せと変成作用のタイプとの間の関連について考察する。

三波川変成帯におけるパンペリー石の安定性

関東山地, (Seki, 1958), 渋川地方 (関 他, 1963), 天竜川地方 (Seki, 1961b), 四国東部 (Iwasaki, 1963), 四国中部 (Banno, 1964) での資料をまとめると、三波川変成帯は、パンペリー石の安定範囲を規準として次のように増進的に分帯される：

パンペリー石が安定で緑閃石が不安定な帯 (P 帯)。

パンペリー石、緑閃石が共に安定な帯 (P A 帯)。

パンペリー石は不安定で、緑閃石のみが安定な帯 (A 帯)。

P 帯における普通の緑色変成岩ではパンペリー石—緑泥石—(緑れん石)—曹長石—石英という鉱物組合せが一般的で、prehnite は出現しない。

P A zone で、同じくパンペリー石—緑閃石—緑泥石—緑れん石—曹長石—石英パンペリー石—緑閃石—緑泥石—曹長石—石英という鉱物組合せが普通である。

P, P A, A, 特に P A 帯の変成岩にはローソン石、ソーダー角閃石、硬玉質輝石がしばしば安定に存在する。

以上述べた特徴をもつた増進分帯 (P→P A→A) を、三波川型とよぼう。

P A 帯より A 帯への移化に際しては、次のような化学反応がおきたらしい (Banno, 1964)：

* 埼玉大学理工学部建設基礎工学教室

(昭和 40 年 11 月 1 日受理)

カムイコタン変成帯でも、上に述べた三波川帯でと全く同様な分帯ができる。(坂野・羽田野, 1963; 田崎, 1964)。

三波川変成帯の中でも、紀伊半島中央部では、分帯の様子が関東山地その他の諸地域と次の点で異っている(関他, 1964; Seki, 1965a): (1) 緑閃石の安定な部分より低変成度の地域ではパンベリー石と伴つて prehnite が変成岩中にごくふつうに発見され、パンベリー石-prehnite-緑れん石-緑泥石-曹長石-石英という組合せが一般的である(このようにパンベリー石と共に prehnite が発達する帯を PP 帯とよんで、三波川帯の他の諸地域での P 帯と区別する)。(2) PA 帯および A 帯の変成岩の中にローソン石、ソーダ角閃石硬玉質輝石が全く見られない。

紀伊半島中央部の三波川変成地域の上に述べたような特徴は、そのまま三郡変成帯および New Zealand の Alpine-Otago 変成帯の分帯の特徴でもある。

三郡変成帯と New Zealand 変成帯でのパンベリー石の安定性。

わが国の三郡変成帯と New Zealand の Alpine-Otago 変成帯は、パンベリー石を含む鉱物組合せが変成度の上昇にともないいかに変化するかという点で、ほとんど同じ性格をもっている(橋本, 1964; 関, 1964; Miyakawa, 1964; Turner, 1938; Hutton, 1937, 1938; Reed, 1950, 1957, 1958; Coombs, 1954, 1960, 1961; Coombs et. al., 1959)。

三郡に比べると、New Zealand の変成帯は、分帯という点ではるかによく研究されている。New Zealand では変成度の最低の部分から最高の部分にむけて、沸石, prehnite-パンベリー石 greywacke, 緑色片岩, 緑れん石-角閃岩および角閃岩という 5 つの zone に分帯された (Coombs, 1960)。

Coombs の prehnite-パンベリー石 greywacke zone の低変成度の部分では、prehnite とパンベリー石とが安定に共存し緑閃石は晶出しない。しかしその高変成度の部分ではパンベリー石とともに緑閃石が普通の変成岩の中に見出され、その代りに prehnite は不安定である。Coombs の prehnite-パンベリー石 greywacke zone は、筆者のいう PP-帯(低変成度)と PA 帯(高変成度)より成るわけである。従つて、New Zealand の変成帯は筆者の区分によれば、Z 帯→PP 帯→PA 帯→A zone と増進的に分帯され、PP 帯から PA 帯にかけて次のような化学反応による prehnite の分解がおこなわれたであろう。

このような増進分帯を、New Zealand 型とよび、New Zealand 南島の Otago-Canterbury 地域を模式地とする。

わが国の三郡変成帯もやはり、PP 帯→PA 帯→A 帯と増進的に分帯されることは、ほぼ確実であるが、沸石の発達で特徴づけられる Z 帯はまだ確認されていない。

New Zealand 変成帯ではローソン石を含む低度変成岩は存在するが、ソーダ角閃石

を含む変成岩はきわめてまれである。硬玉質輝石は出現しない。三郡変成帯ではソーダー角閃石を含む変成岩は（三波川変成帯ほど一般的ではないが）見出されるけれども、ローソン石も硬玉質輝石も出現しない。

三波川変成帯の中で、紀伊半島中央地域は三波川帯の他の地域とはかなり異質的な分帯、即ち以上述べた New Zealand 型の分帯を示すことはすでに述べた。これと同じように New Zealand 変成帯の中にも、地域により、ここでいう New Zealand 型とはちがつた分帯のされる所がある。たとえば SE Nelson 地域では、パンベリー石は緑閃石の不安定である Chl 1 zone の変成岩の中でのみ（しばしば prehnite と共生して）見出され、緑閃石の安定な Chl 2, Chl 3 およびそれ以上の変成度の所では出現しない (Reed, 1958)。即ちこの SE Nelson 地域では、PP 帯から (PA zone を経ないで) 直接に A 帯にゆくという増進分帯であり、A 帯は更に高変成度の黒雲母帯に移化するのである。このような PP 帯→A 帯という過程は、次章で述べる日本のグリータフの変成帯で一般的である。

丹沢山地の変成帯でのパンベリー石の安定性

神奈川県丹沢山地南部には石英閃緑岩の貫入と密接な関係をもつて形成された変成岩が発達し、すでにかかなり多くの人々により研究された (Sugi, 1931 他)。

坂本ら (1964), Seki (1965·b), 関, 原村ら (1965), 関, 奥村ら (1965) の最近の研究によると、この地域では南より北にむけて変成度の上昇にともない、新第3紀の火山噴出岩、凝灰岩、凝灰質砂岩を主とする域地（御坂層、足柄層地域）に、沸石帯、パンベリー石—prehnite 帯、緑閃石（緑色片岩）帯、角閃石（角閃岩）帯の4つの帯ができたことが明らかになった。

パンベリー石—prehnite 帯では緑閃石は出現しない。緑閃石帯ではパンベリー石も prehnite も不安定である。即ちここでは、三波川、三郡、New Zealand の各変成帯で認められた PA 帯が全く欠けている。

赤石山地 (松田 他, 1965), Fiji 島 (Crook, 1963), 東 Australia (Crook, 1960, 1961a; Packam & Crook, 1960), New Guinea (Crook, 1960b), Laborador Trough (Baragar, 1960; Seki et. al., 1962) などの諸地域でも全く同じ分帯、即ち Z 帯→PP 帯→A 帯という分帯がはつきり認められる。

PP 帯から A 帯に直接移行し、PA 帯を全く欠けている増進分帯を丹沢型とよぼう。

Franciscan 変成帯におけるパンベリー石の安定性

パンベリー石は California の Franciscan 変成帯ではかなりふつうに見出される変成鉱物の一つである。

この Franciscan 変成帯では、増進変成作用の研究の基礎となる分帯について信頼にたる資料がいたつて乏しい。しかし最近のいくつかの研究によると、この地域は、(1) 西側にある laumontite の出現で特徴付けられる沸石帯と、(2) 東側の藍閃石片岩帯の2つの帯に大きく分けられるらしい (Coleman et. al., 1963; Bailey et. al., 1964)。

沸石帯にはパンベリー石は出現しない。

藍閃石片岩帯の変成岩では藍閃石、ローソン石、方解石、あられ石、白雲母、石英、曹長石、硬玉質輝石、ザクロ石などと組合つてパンベリー石がかなりふつうに見出される。この藍閃石片岩帯にある普通の変成岩、たとえば玄武岩質な熔岩又は凝灰岩から生じた変成

岩では、緑閃石は緑閃石—曹長石の組合せが出現しないか又はごくまれである。そして、三波川帯や New Zealand 変成帯でごくふつうなパンベリー石—緑閃石—曹長石という鉱物組合せがなくあるいはごくまれでその代りにパンベリー石—藍閃石という組合せが一般的なのである*。緑閃石は緑閃石岩のような特異な岩石でのみ見出され、その場合緑閃石—緑泥石 (±white mica) という鉱物組合せがごく普通である。

Franciscan 変成帯の藍閃石片岩帯の重要な特徴の一つはパンベリー石と 藍閃石との安定共存ということであるので、特にこの帯を PG 帯とよぶことにする。

関・大貫・Ernst (未発表) らの最近の研究によると、Franciscan 変成帯の Z 帯と PG 帯との間に、沸石も藍閃石、ローソン石、硬玉質輝石も出現せず、玄武岩質変成岩でパンベリー石—緑泥石—曹長石 (±石英、方解石) という鉱物組合せが一般的であるような帯、即ち P 帯が存在する可能性がある。

以上述べた如き、Z 帯から (P 帯を経て?) PG 帯に入り、さらに緑簾石角閃岩又はエクロジャイト帯 (又は相) に達するような増進変成分帯を、Franciscan 型と呼ぶことにする。

Franciscan 変成帯の中でもすべての地域で、このような型の分帯ができるわけではない。最近の Panoche Pass 地域における研究によると (Ernst, 1965) この地域では、最低変成度の部分に三波川変成帯での PA 帯にあたる帯がかなり広く発達し、それは変成度の上昇にともなつて、上に述べた PG 帯に移化する。即ち、この Panoche Pass 地域では典型的な Franciscan 型から多少 deviate して三波型の分帯に近いものがある。

なお、Cilebes 島、Borneo 島、New Caledonea, Corsica 島などにおけるパンベリー

Franciscan type	Z	P	PG	
Sanbagawa type	Z	P	PA	A
New Zealand type	Z	PP	PA	A
Tanzawa type	Z	PP		A

Progressive metamorphism→

Figure 1. Schematic representation of zonal divisions chiefly based on the pumpellyite-bearing mineral assemblages in some metamorphic areas.

Z : Zeolite zone

PP : Pumpellyite-prehnite zone (without actinolite)

P : Pumpellyite zone (without prehnite)

PA : Pumpellyite-actinolite zone (without prehnite)

PG : Pumpellyite-glaucophane zone (with neither actinolite nor prehnite)

A : Actinolite (green schist) zone (with neither pumpellyite nor prehnite)

* 筆者は先に Franciscan 変成帯では、パンベリー石は緑閃石、緑泥石、曹長石と安定に共生すると述べたが、これはまちがいである (Seki, 1961, P. 411))。

一石を含む鉱物組合せは、上に述べた如き Franciscan 型のものとほぼ同じであるらしいけれど、これらの地域における今までの研究は至つて粗末なもので、信用するに足る鉱物組合せの解析や分帯は全く行なわれていない (Seki, 1961)。

考 察

増進変成作用にともなうパンベリー石を含む鉱物組合せの変化にもとずいて、変成作用を、丹沢型、New Zealand 型、三波川型、Franciscan 型という4つのタイプに分けた (第1図)

丹沢型と New Zealand 型との違いは、パンベリー石と prehnite の両者が安定で緑閃石の不安定な PP 帯と緑閃石のみが安定でパンベリー石も prehnite も不安定な A 帯との中間に、パンベリー石と緑閃石とが安定に共存する帯が丹沢型では欠除しているのに、New Zealand 型では存在していることである。この差は次の化学反応の右辺が New Zealand 型、左辺が丹沢型を示すと考えるとうまく説明され得る。

この反応が右から左に進むと、脱水がおきて、固体容積が著しく増加する。従つて温度が一定であれば、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ および/又は P_{solid} が高いと反応は左から右に進むわけである。

New Zealand 型と三波川型の違いは、前者で広く発達する PP 帯が後者では欠除する。即ち、三波川型では prehnite を含む鉱物組合せがないことである。この New Zealand 型と三波川型との差は、前にあげた反応式 (3) の左辺と右辺が、それぞれ New Zealand 型、三波川型を示すと考える、即ち三波川型では prehnite が緑泥石と反応してパンベリー石になつてしまつていていると考えると、うまく説明ができる。この場合、水の出入と、両辺の固相全容積の著しい差から、温度は同じとすると、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ および/又は P_{solid} が高ければ反応は右に、低ければ左に向つて容易に進むと考えてよい。

三波川型と Franciscan 型との間の差は、前者にごく普通にある PA 帯が後者には全く、又はほとんど出現しないこと、三波川変成帯の一部ではパンベリー石—緑閃石—曹長石—緑泥石の鉱物組合せがごく普通にあるのに、ほぼ同じ温度条件であると考えられる Franciscan 変成帯ではこのような鉱物組合せが出現せず、そのかわりパンベリー石—藍閃石—ローソン石という鉱物組合せがごく一般的であるということである、この三波川型と Franciscan 型との違いは、Franciscan 変成帯では次の化学式が右に進んでいる、即ち緑閃石—曹長石—緑泥石が反応して、藍閃石—ローソン石ができていていると考えるとうまく説明できる。

この反応が温度一定の下で右に進むか、左に進むかということは主に P_{solid} によつてきまり、 P_{solid} が高いと右辺の鉱物組合せか、低いと左辺の鉱物組合せが安定であろう。

パンベリー石を含む鉱物組合せにもとずいた分帯の様式をしらべることにより、変成作用には少なくとも丹沢、New Zealand、三波川、Franciscan の4つの型があることがわかった。それらの型の生じた最も主要な原因は、変成作用時に働いた P_{H_2O} 及び/又は P_{solid} のちがいであり、丹沢型<New Zealand 型<三波川型<Franciscan 型の順に圧力条件が高かったと考えてよいであろう。

岩石中に Fe_2O_3 の乏しいことがパンベリー石が晶出するための条件として必要らしい (Banno, 1964)。しかし上に述べたような異つた変成帯の間の鉱物組合せの差が変成岩の化学組成の差に基くものであるということは大変考えにくいことである。

ここで扱つたような低変成度の部分では、各変成帯間で変成時の温度条件に大きな差があつたとは考えにくい。たとえば丹沢山地の PP 帯と New Zealand の PP 帯の間、又、三波川変成帯の PA 帯と New Zealand の PA 帯との間には、著しい温度差はなかつたであろう。

丹沢、New Zealand、三波川、Franciscan の各変成域の間に、 P_{H_2O} 及び P_{solid} の点でかなり系統的な差のあつたことを示す次のような有力な資料がある。

(1) Franciscan 変成帯には藍閃石、ローソン石、硬玉質輝石 (石英と共生する)、アラレ石などを含む変成岩がかなり普遍的である。

(2) 三波川変成帯では Franciscan 帯における程藍閃石、ローソン石、硬玉質輝石、アラレ石を含む変成岩の産出は普通ではない。

(3) New Zealand 変成帯での岩石の中にはローソン石やソーダ角閃石はまれに産出するが、硬玉質輝石やアラレ石は見出されない。

(4) 丹沢変成地域では石英閃緑岩の貫入にともなう熱作用が重要な役割をはたしていて、硬玉+石英、アラレ石はおろかローソン石もソーダ角閃石も出現しない。PP 帯と Z 帯との中間にワイラケ沸石がかなり広く見出されることも、この変成作用では P_{H_2O} 、 P_{solid} 共にかなり低かつたことを示している (Seki, 1966)。

以上のことから、丹沢型→New Zealand 型→三波川型→Franciscan の順に変成時の P_{solid} 及び/又は P_{H_2O} が次第に高かつたと考えられ、この順序はパンベリー石を含む鉱物組合せの差から推定された順序とよく一致する。

即ち、一つの変成岩地域低変成度より高変成度の部分までの間における、パンベリー石を含む鉱物組合せの変化を詳しく調べると、変成作用の時に働いた P_{H_2O} 、 P_{solid} の高低をここで設定した“型”を一応の規準にして比較推定することが可能なのである。

お わ り に

この研究は、日米科学協力事業の一つとして行なわれたものであり、その遂行にあたり、文部省、財団法人日本学術振興会の協力と援助を得た。記して謝意を表する次第である。

引 用 文 献

- Bailey, E. H., Irwin, W. P. and Jones, D. L. (1964), Franciscan and related rocks and their significance in the geology of western California. Bull. 183, Calif. Div. Mines. Geol.
- Banno, S. (1964), Petrologic studies on Sanbagawa crystalline schists in the

- Bessi-Ino district, central Sikoku, Japan. Journ. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sc. 2, 15, 203~319.
- 坂野昇平・羽田野道春, (1963), 神居古潭変成帯幌加内地方の変成分帯. 地質, 69, 388~393.
- Baragar, W. R. A. (1960), Petrology of basaltic rocks in part of the Labrador Trough. Bull. Geol. Soc. America, 71, 1589~1644.
- Coleman, R. G. and Lee, D. E. (1963), Glaucophane-bearing metamorphic rock types of the Cazadero area, California. Journ. Petrology, 4, 260~301.
- Coombs, D. S. (1954), The nature and alteration of some Triassic sediments from Southland, New Zealand. Trans. Roy. Soc. New Zealand., 82, 65~109.
- (1960), Lower grade mineral facies in New Zealand. Rept. International Geol. Congr., 21 st Sess., Norden, 339~351.
- (1961), Some recent work on the lower grades of metamorphism. Austr. Journ. Sci., 24, 203~215.
- Ellis, A. J., Fyfe, W. S. and Tayler, A. M. (1959), The zeolite facies, with comments on the interpretation of hydrothermal synthesis. Geoch. Cosmoch. Acta, 17, 53~107.
- Crook, Keith, A. W. (1960a), Petrology of Tomworth Group, Lower and Middle Devonian, Tomworth-Nundle district, New South Wales. Journ. Sed. Petr., 30, 353~369.
- (1960b) : Diagenesis in the Wahgi Valley sequence, New Guinea. Proc. Roy. Soc. Victoria, 74, 77~81.
- (1961), Vein minerals from the Tamworth and Parry Group (Devonian and lower Carboniferous), New South Wales. Amer. Min., 46, 1017~1029.
- (1963), Burial metamorphic rocks from Fiji. New Zealand Journ. Geol. Geophysics, 6, 681-704.
- Ernst, W. G., (1965) Mineral parageneses in Franciscan metamorphic rocks, Panoche Pass, California, Geol. Soc. Am. Bull., 76, 879~914.
- Ghent, E. D. (1965), Glaucophane-schist facies metamorphism in the Black Butte area, northern Coast Ranges, California. Amer. Journ. Sci., 263, 385~400.
- 橋本光男 (1964), 三郡変成岩の岩石学の総括. 国立科博研報, 7, 323-337.
- Hutton, C. O. (1937), An occurrence of the mineral pumpellyite in the Lake Wakatipu region, western Otago, New Zealand. Min. Mag., 24, 529~533.
- (1940), Metamorphism in the Lake Wakatipu region, western Otago, New Zealand. New Zealand Dept. Sci. Indust. Res. Geol. Mem., no. 5.
- and Turner, F. J. (1936), Metamorphic zones in northwest Otago. Trans. Roy. Soc. New Zealand. 65, 405~406.
- Iwasaki, M. (1963), Metamorphic rocks of the Kotu-Bizan area, eastern

- Sikoku. Journ. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sc. 2, 15, 1~90.
- 松田 時彦・栗谷川幸子 (1965), 赤石山地東部の変成作用. 震研彙報, 43, 209~235.
- Miyakawa, K. (1961), General considerations on the Sangun metamorphic rocks on the basis of their petrological features observed in the San-in provinces, Japan. Journ. Earth Sci. Nagoya Univ., 19, 345~393.
- Packam, G. H. and Crook, Keith A. W. (1960), The principle of diagenetic facies and some of it implications. Journ. Geol., 58, 392~407.
- Reed, J. J. (1957), Petrology of the lower Triassic rocks of the Wellington district. Geol. Mem. New Zealand, no. 57.
- (1958), Regional metamorphism in southeast Nelson. Geol. Surv. New Zealand Bull., No. 60.
- 坂本 峻雄, 見山 敏三, 松田 時彦, 大木靖衛 (1964), 丹沢大山学術調査報告, 神奈川県.
- Seki, Y. (1958): Glaucophanitic regional metamorphism in the Kanto Mountains, central Japan. Jap. Journ. Geol. Geogr., 29, 233~258.
- (1961a), Pumpellyite in low-grade regional metamorphism. Journ. Petr., 2, 407~423.
- (1961b), Geology and metamorphism of Sanbagawa crystalline schists in the Tenryu district, central Japan. Sci. Rept. Saitama Univ., 4, 75~92.
- 関 陽太郎, (1964), 舞鶴地帯の古生層の輝緑凝灰岩と, 貫入岩変成岩のうけた低度変成作用. 岩鉱, 51, 158~161.
- Seki, Y. (1965a): Prehnite in low-grade metamorphism. Sci. Rept. Saitama Univ., 5, 29~43.
- (1965b): Wairakite in Japan. 岩鉱 (印刷中)
- 関 陽太郎, 相場 瑞夫, 加藤 千草 (1959), 渋川地方の三波川変成岩地域の変成分帯. 地質, 65, 618~623.
- 関 陽太郎, 原村 寛, 大貫 仁, 奥村 公男, 平賀 八郎 (1965), グリーンタフ中の wairakite の化学成分. 岩鉱 (印刷中).
- Seki, Y. and Kuriyagawa, S. (1962), Notes on rock-forming minerals (25). Optical properties of pumpellyite in metabasaltic and gabbroic rocks of the Labrador Trough, Canada. Journ. Geol. Soc. Japan, 68, 538~539.
- 関 陽太郎, 奥村 公男, 平賀 八郎, (1965), 神奈川県 丹沢山地 南部の低度変成作用 (未発表).
- 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.
- Sugi, K. (1930), On the metamorphic facies of the Misaka series in the vicinity of Nakagawa, Province Sagami. Jap. Journ. Geol. Geogr., 9, 87~142.
- 田崎 耕一 (1964), 神居古潭帯南部の変成岩類. 地球科学, 71, 8~17.

Turner, F. J. (1938), Progressive regional metamorphism in southern New Zealand. Geol. Mag., **75**, 160~174.