

三波川変成帯の原岩堆積から変成岩の上昇まで — “Two way street model” による描像 —

宮下 敦*¹

The history of evolution of the Sanbagawa metamorphic belt from the sedimentation of protolith to the exhumation of metamorphic rock
- Description by “Two way street model” -

Atsushi MIYASHITA *¹

ABSTRACT : Owing to the detailed geological, petrological, and geochronological studies of the Ayukawa-Sanbagawa area (the type locality of the Sanbagawa metamorphic belt), Kanto Mountains, it is clarified that the Sanbagawa metamorphic belt consists of several geological units. The gap of the detrital zircon U-Pb ages and the phengite K-Ar ages of each unit of the metamorphic rocks indicate that these units have individually different sedimentation age and timing of exhumation. The Sanbagawa metamorphic belt has not coherent structure, and has a character of “diachronous-progressive metamorphism”. It is presumed that the formation mechanism of metamorphic mineral zoning of the Sanbagawa belt is formed by the “Two way street model” tectonics.

Keywords : Metamorphic mineral zoning, Sanbagawa, Zircon U-Pb age, Phengite K-Ar age, Two way street model

(Received May 13, 2019)

1. はじめに

変成岩は、地球表層でできた岩石が、地下深部に移動することによって温度圧力等の条件が変化し、再結晶した岩石である。逆に、変成岩が経た過程を解析することで、岩石を変化させた地球内部の活動の性質を調べることができる(都城, 1965)¹⁾。

地質学的な時間スケールでほぼ同一の年代に、ほぼ同一の作用によって形成された変成岩が、地表である範囲に分布しているとき、一連の変成岩岩体を総称して変成帯と呼んでいる。変成帯の調査は、まず地表に露出している岩石の岩種や変成鉱物の組み合わせ、組織および化学組成が、面的に、可能であれば三次元的に、どのように変化しているかを調べることから始まる。変成岩の分類は、変成される前の岩石(原岩)の種類が基本となり、これがどのような変成鉱物の組み合わせに変化しているかによって記載される。このような記載を行うと、変成帯の内部で、同じ原岩の変成鉱物の組み合わせが規則的に

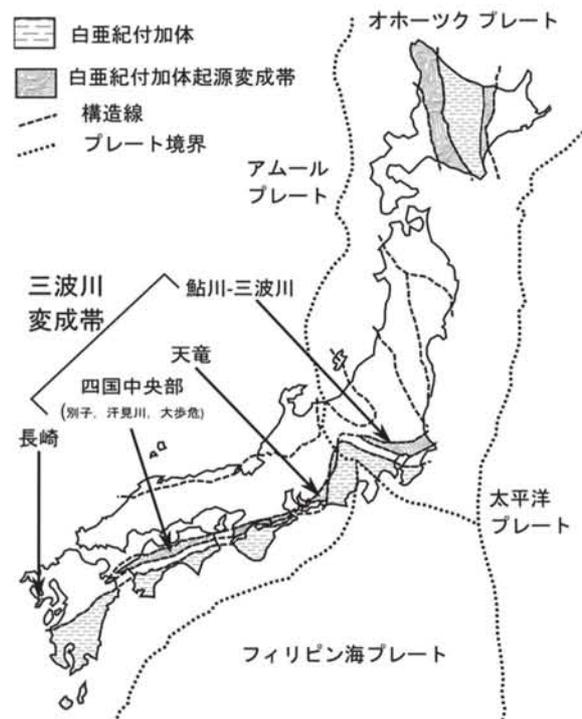


図1. 三波川変成帯の分布。西南日本では、白亜紀付加体起源の地質帯(太平洋側から順に、四万十帯と三波川変成帯)が、ジュラ紀付加体である秩父帯をはさんで2列併走している。

*¹ : 共通基礎教授 (miya@st.seikei.ac.jp)

変化することが多い。同じ鉱物組み合わせを持つ部分を1つの鉱物帯とし、変成帯の内部で鉱物帯がどのように分布しているかを調べる調査手法を変成分帯という。1980年代までの変成岩岩石学では、変成岩に記録されている再結晶の温度圧力条件は、変成岩が最も高い温度もしくは圧力に達したときのもので、それは変成岩が地表まで上昇する際には、あまり変化しないだろうと考えられていた。変成岩が受けた最も高い温度もしくは圧力のことを最高変成度と呼び、最高変成度の変化で示される変成分帯は、変成帯が地下深部にあったときの、場所による温度圧力条件の変化を記録したものとして扱われた(都城, 1965)¹⁾。

一方、1980年代以降、海溝下のプレート沈み込み帯で生じる低温高圧型と呼ばれる変成岩は、地下で非常に強い変形を受けていることが明らかになった。地表の岩石がプレート沈み込み帯を地下深部に移動する際に、パイ生地をこねるように流動変形し、変成岩特有の岩石構造や地質構造が形成されることが、定量的に示されるようになった(例えば、Toriumi, 1985)²⁾。また、ヨーロッパ・アルプスで発見されたコース石(coesite)を含む超高压変成岩の研究(Chopin, 1984)³⁾は、変成岩が最高変成度に達した後も、変成鉱物の組み合わせや化学組成が劇的に変化してしまうことを明らかにした。

ところで、従来の変成岩研究で得られていた変成分帯

は、詳細な調査に基づく事実である。変成岩体は強く変形し、変成作用の時期に応じて変成鉱物の性質が変化してしまうのに、変成帯全体において変成分帯で示される鉱物組み合わせの規則性が生まれるのは何故なのだろうか。従来の変成分帯で示される鉱物帯は、現在の変成岩岩石学でどのように説明できるかということについて、整合的な説明はまだなされていないのが現状である。本稿では、三波川変成帯を例に、変成分帯が可能となる原因についての仮説を提出する。

2. 三波川変成帯の変成分帯

三波川変成帯は、日本列島に沿ったプレート収束帯において、白亜紀に形成された付加体である四万十帯が、海溝に沿って地下深部に沈み込み、低温高圧型変成作用を受けて形成された変成帯である。三波川変成帯は、九州の長崎地域を西端とし、四国北部、紀伊半島中部、東海を経て、関東山地北部まで、延長約1000kmにわたって分布している(図1)。

三波川変成帯における変成分帯は、まず関東地方においてSeki (1958)⁴⁾が成功し、都城(1965)¹⁾によって低温高圧型変成相系列の分帯の標準地域として扱われた。続いて、四国中央部においてBanno (1964)⁵⁾が変成分帯を行い、その後、Higashino (1990)⁶⁾によって汗見川地域を中心に非

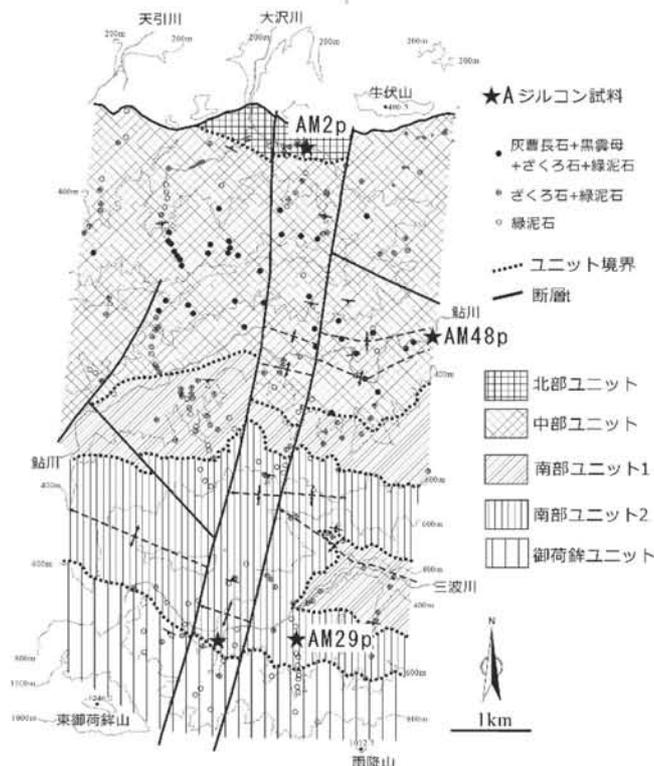


図2. 関東山地鮎川-三波川地域の三波川変成帯。泥質変成岩の変成鉱物組み合わせによって変成分帯を行った例。宮下 (1998)¹²⁾に加筆。

常に詳細な調査が行われ、高圧中間群変成相系列についての世界的なモードとなった。変成岩の鉱物組み合わせは、変成する前の原岩の全岩化学組成によって左右されるが、Higashino (1990)⁶⁾は、全岩化学組成が比較的一定になる泥質岩起源の変成岩(泥質片岩, meta-pelite)を選び、その鉱物組み合わせによって、変成度が低い方から順に、緑泥石(chlorite)帯 - ざくろ石(garnet)帯 - 黒雲母(曹長石-黒雲母帯: albite-biotite)帯 - 灰曹長石(灰曹長石-黒雲母帯: oligoclase-biotite)帯の4帯を識別した。最も高い変成度を示す灰曹長石帯は、より変成度の低い帯に両側をはさまれる形で三波川変成帯の分布の中央部にあり、これは横臥褶曲によって折りたたまれた結果と考えられていた(例えば、Banno and Sakai, 1989)⁷⁾。

関東山地においては、Sekki (1958)⁴⁾に続いて、田中・福田、(1974)⁸⁾、鈴木 (1977)⁹⁾および酒井 (1980)¹⁰⁾によって、泥質片岩中の鉱物組み合わせに基づいて緑泥石帯 - ざくろ石帯 - 黒雲母帯が識別され、平島 (1983)¹¹⁾は関東山地三波川変成帯の温度圧力条件は四国部汗見川地域と区別できないことを示した。その後、宮下 (1998)¹²⁾は、三波川変成帯のモード地を含む群馬県藤岡市の鮎川-三波川地域で調査を行い、調査地域北部の吉井町で、ごく狭い範囲ではあるが灰曹長石帯が分布することを明らかにし(図2)、関東山地においてもHigashino (1990)⁶⁾と同じように変成分帯ができることを示した。

一方、橋本ほか (1992)¹³⁾、矢野・田切 (1998)¹⁴⁾は、泥質片岩に含まれている炭質物の結晶化度(石墨化度)を用いて、鉱物組み合わせとは別の形で変成分帯を行った。石墨化度は、積層構造を持つ炭質物の底面反射間隔(d002)と、結晶子厚み(Lc002)から計算される値で、泥質変成岩をフッ酸処理して分離した炭質物の粉末X線回折分析によって決定され、それは変成作用の温度のみに依存するとされた。その結果、炭質物の石墨化度による分帯は、鉱物組み合わせによる分帯とほぼ整合的であるが、低変成度の岩石に挟まれる形で、局所的に高変成度の薄層が存在すると主張し、このような構造は変成岩が冷却する過程で、高変成度の薄い層が低変成度の部分に構造的に挟み込まれることによって生じるとした。Miyashiro (1994)¹⁵⁾は、このような変成岩の構造を、トランプのカードを切ってから積み重ねることに例えて、“Shuffled-cards structure”と呼ぶことを提案した。この考え方は、それまで連続的に変化するという考えに基づいて変成分帯が行われていた地域で、帯境界の変化が不連続であり、テクトニックに形成されるということを示した点で画期的だった。

しかし、テクトニックにスライスされた薄層が、どの

ような運動によって変成岩体中に挟み込まれるかというメカニズムについては未解明のまま残された。図3は、Miyashita (1997)¹⁶⁾が測定した関東山地三波川帯泥質片岩の炭質物の定方位粉末X線回折分析で得られたLc002を、同じ岩石の曹長石斑状変晶の平均粒径と比較した結果を示したものである。曹長石斑状変晶の成長は、変成岩の変形によって左右されることが分かっている(例えば、Toriumi, 1975)¹⁷⁾。泥質片岩の炭質物Lc002が、図3のように曹長石斑状変晶の粒径と相関することは、炭質物Lc002は、変成温度だけでなく、変成岩の変形の影響も受けることを示している。同じ物質に同じ大きさの力を加えても、温度が高いほうが強く変形するので、石墨化度の変化は変成温度に起因するよう見えるが、実際には変形度も関係していると考えられる。地質体中で変形が集中する部分(例えば、褶曲軸)で、石墨化度は局所的に高い値を示すことになる。従って、石墨化度は変成温度だけでなく、変形の強さによっても左右される指標として解析しなくてはならない。橋本ほか (1992)¹³⁾が示したように、薄くスライスされた変成岩が積層する構造は考えにくい。

以上が、20世紀後半に明らかになった関東山地三波川変成帯の特性であった。

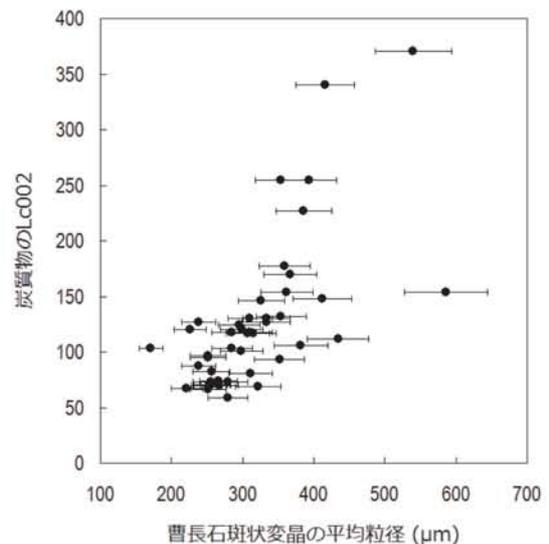


図3. 関東山地鮎川-三波川地域の曹長石斑状変晶の平均粒径と炭質物のLc002の相関。変形が強く斑状変晶が大きくなるほど、炭質物のLc002は大きい。

3. 年代学から示される三波川変成帯の構造

Miyashita and Itaya (2002)¹⁸⁾は、関東山地三波川変成帯の鮎川-三波川地域において、泥質変成岩中のフェンジャイト(phengite)についてK-Ar年代測定を系統的に行った。

その結果、この地域では、変成度の低い南部で約 80 Ma(1 Ma = 100 万年)の変成年代を示し、そこから北部に向かうにしたがって変成年代が若くなって変成度の最も高い北部で約 60 Maの変成年代となることが分かった。低温高压型変成岩に含まれるフェンジャイト K-Ar年代は、変成岩が上昇することによって冷却され、変成作用に伴う岩石の流動変形が止まった時点の年代を示すと解釈されている(Itaya and Tsujimori, 2015)¹⁹⁾。このフェンジャイト K-Ar年代を上昇近似年代と呼ぶことにする。フェンジャイトの上昇近似年代を、四国地域の同様の研究結果(Itaya and Takasugi, 1988)²⁰⁾と比較すると、四国地域は関東山地よりもずっと広い地域に分布する厚い地質体であるのに、年代の幅はほぼ同じであった。

一方、同じ地域のフェンジャイト K-Ar年代が測定されている泥質片岩試料について、Tsutsumi et al., (2009)²¹⁾は碎屑性ジルコン(zircon)のU-Pb年代測定を行った。ジルコンのU-Pb系の閉止温度は約 900℃(Lee, 1997²²⁾, Chermiak and Watson, 2000²³⁾)とされ、三波川変成帯の灰曹長石帯でも、この温度には達しないため、碎屑性ジルコンのU-Pb年代は、変成作用によって変化せず、そのジルコンを供給した花こう岩などの地質体の形成年代を示している。三波川変成帯の泥質片岩が堆積した白亜紀には、東アジア東縁で珪長質火成活動が活発で、そこで形成されたジルコンが連続的に三波川変成帯の泥質片岩が堆積している場にもたらされていた。そこで、泥質片岩中の碎屑性ジルコンのU-Pb年代のうち最も若いものが、その原岩となる泥質岩が堆積した年代に近い値を与える

ことになる(Tsutsumi et al., 2009)²¹⁾。以下、この年代を碎屑性ジルコンU-Pb年代による堆積近似年代と呼ぶことにする。三波川変成帯の低変成度部分は、その南側に並走するジュラ紀付加体である秩父帯北帯と接しており、秩父帯北帯の岩石自体が弱い低温高压型変成作用を受けていたために、両者は連続していると考えられていた(Hirajima and Banno, 1989)²⁴⁾。そこで、三波川変成帯の泥質岩も、従来はジュラ紀に堆積したものとされてきた。しかし、Tsutsumi et al., (2009)²¹⁾や四国地域で同様の研究を行ったAoki et al., (2007)²⁵⁾によって、堆積年代は白亜紀で、秩父帯のさらに南側にある四万十帯と同時期であることが明らかになった。これは、秩父帯が、三波川変成帯および四万十帯に衝上するナップであることを意味しており、日本列島の地体構造形成理論の上で重要な発見であった(宮下, 2019)²⁶⁾。

ところで、Tsutsumi et al., (2009)²¹⁾で得られた碎屑性ジルコンの堆積近似年代と、その岩石のフェンジャイトの上昇近似年代を調べると、この2つの年代が、帯毎に平行してずれていることが分かる(図4)。例えば、南部ざくろ石帯ユニットに属するAM29p試料の堆積近似年代は約 95Ma, 上昇近似年代は約 80Ma であるのに対し、中部黒雲母帯ユニットに属するAM48p試料の堆積近似年代は約 80Ma, 上昇近似年代は約 65Maであり、それぞれの年代の差は測定誤差よりも有意に大きくなっている。AM29pが属する南部ざくろ石帯ユニットが変成作用を受けた後に既に上昇中であるのに、AM48pが属する中部黒雲母帯ユニットはまだ海溝で堆積中ということになる。

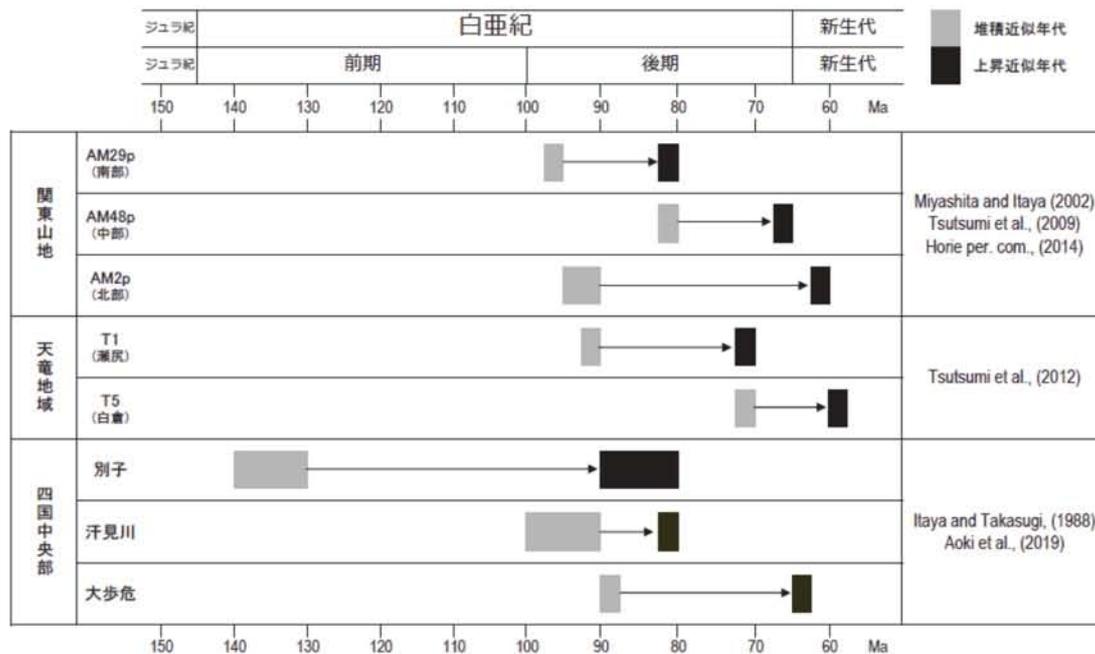


図4. 三波川変成帯の堆積近似年代と上昇近似年代の関係図。図の右ほど新しいことを示している。

このことは南部ざくろ石帯ユニットと中部黒雲母帯ユニットは全く別の地質体として堆積し、別の時期に変成作用を受けていることを意味している。堀江(2014, 私信)によれば、地域最北部の北部灰曹長石帯ユニットに属するAM2p試料では堆積近似年代が約 90Ma, 上昇近似年代は約 60Maを示しており、南部ざくろ石帯ユニットおよび中部黒雲母帯ユニットとも異なった年代を示している。特に、前2者の堆積近似年代から上昇近似年代までの差が約 15Maであるのに対し、北部灰曹長石帯ユニットの差は 30Maと大きく、より高い変成度の岩石ほど堆積から上昇までに時間がかかっていることを意味している。AM2pのざくろ石は複雑な組成累帯を持っており、変成帯の中でヨーヨーのように変成度が繰り返し変化するような運動(Rubatto et al, 2011)²⁷⁾をしたために、その分、上昇までに時間がかかっている可能性がある。

同様のユニット間の年代差の関係は、中部地域天竜川流域(Tsutsumi et al., 2012)²⁸⁾でも見出されている(図4)。天竜川地域では、Seki(1961)²⁹⁾によって、変成岩分布地域中央部を南北に走る低角度断層を境に、東西で変成岩の線構造等の性質が不連続に変化することが報告されていた。Nuong et al., (2010)³⁰⁾は、東西のユニットで、白雲母K-Ar年代と変成度の変化の傾向が逆であることを示し、西側のユニット(図4の試料T1)を瀬尻ユニット、東側のユニット(図4の試料T5)を白倉ユニットと呼んだ。Tsutsumi et al., (2012)²⁸⁾は、関東山地と同様に瀬尻ユニット(T1)の上昇近似年代と、白倉ユニット(T5)の堆積近似年代は、どちらも約 70Maで重複していることを示し、白倉ユニットが海溝で堆積中に、瀬尻ユニットはすでに変成を受けて上昇中であることを示している。

さらに、四国中央部では、複合地質年代学の手法を用いたAoki et al., (2019)³¹⁾が、堆積と上昇の時期が異なる3つのユニット(別子, 汗見川, 大歩危)を識別している。3つのユニットのうち、東赤石岩体や五良津岩体などのエクロジャイトを含む別子ユニットは、古い原岩形成年代と高い変成度を持ち、関東山地や天竜地域には見られないユニットである。ただし、別子ユニットの原岩形成年代は、碎屑性ジルコンの最も若い年代ではなく、むしろエクロジャイトとなった岩石が形成された年代と考えられるものであり、年代に関して関東山地や天竜地域と同じ扱いはできない。汗見川ユニットと大歩危ユニットの関係が、関東山地と天竜川地域と同様のユニット構造と考えられ、やはり堆積近似年代とItaya and Takasugi(1988)²⁰⁾が示した上昇近似年代のずれが両者の間で見られる。四国地域と関東山地で、フェンジャイト上昇近似年代の幅が同じで変成帯の幅が大幅に異なる原因は、スタック

されるユニットの厚みが異なることで説明が可能である。また、汗見川ユニットは、堆積近似年代の幅が他地域よりも広く、さらに鉱物帯ごとの薄いユニットに分かれる可能性がある。

従って、ユニット間で堆積近似年代と上昇近似年代がずれる現象は、三波川変成帯全域にわたって普遍的に起こっている現象と考えられる。

4. Two Way Street Modelによる鉱物帯形成の説明

三波川変成帯と同じタイプの低温高圧型変成帯である北アメリカ大陸西端のフランシスカン帯では、1970年代から微化石による「真の」堆積年代と白雲母(muscovite) K-Ar年代による上昇近似年代が知られていた。Suppe and Armstrong(1972)³²⁾は、三波川変成帯と同様に、フランシスカン帯内部で、一方の地質体に変成を受けている際に、別の地質体は海底に堆積中であることを報告した。Ernst(1975)³³⁾は、この現象を自動車の対面通行になぞらえて、“Two way street model”と呼ばれるプレートテクトニクスの枠組みで説明した。

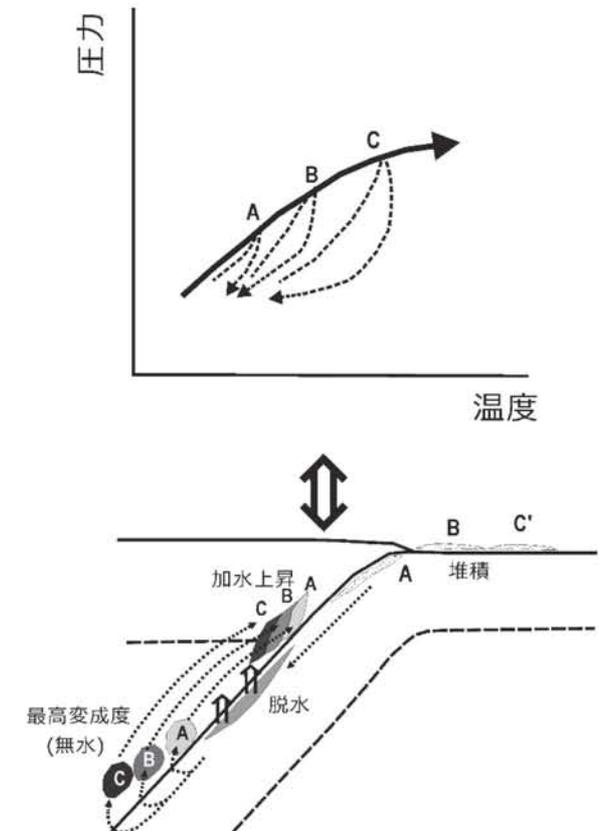


図5. "Two way street model"に基づく、三波川変成帯の堆積から上昇までのプロセス。温度-圧力の経路は模式的なもの。この図では、古いユニットの方がより温度圧力が低い場合を示す。

三波川変成帯の堆積から上昇までのプロセスも、同様にTwo way street modelで説明できる。三波川変成帯の原岩は、四万十帯北帯と一連の堆積物であり、日本列島下に約 10Ma~30Maごとにユニットとなって沈みこむ(図5)。沈み込んだ深さによって、ユニット毎の変成作用の履歴は異なっている。そこで、ユニットが受けた変成作用の履歴を反映して、最終的に岩石中に残る変成鉱物組み合わせは異なることになる。

図5において、先に沈みこんだユニットAは最高変成度に達したのち上昇するが、ユニットBはまだ海溝部分で、堆積中でこの後にプレートに動きによって沈み込む。続いて、ユニットCがユニットBに遅れて堆積して沈み込み、その後上昇する。この際に変成作用でできる鉱物組み合わせはABCでそれぞれ異なり、これが鉱物帯として識別される。ABCのユニットの上昇は、ある程度の深さのところまで一旦止まる。ここで一連の沈み込みによって形成された変成岩ユニットは、スタックされて接合する。一体となった変成岩ユニット群は、最終的には一連の変成帯として地表に露出するようになると考えられる。そこで地表調査をすると、この変成帯ではABCの変成分帯ができることになる。こうして形成された履歴の異なるユニットで作られた地質構造が、三波川変成帯で変成分帯が可能な理由と考えられる。

5. 今後の課題

Two way street modelで形成された変成分帯の境界はテクトニックに形成されるので、従来考えられていたような連続的なものではない。橋本ほか(1992)¹³⁾の関東山地三波川変成帯のShuffled cards modelで示された不連続な境界の一部は、筆者の提案しているユニット境界に相当すると考えられる。例えば、同じ関東山地三波川変成帯の荒川流域高砂橋付近では、矢島ほか(1993)³⁴⁾が蛇紋岩をはさんで緑泥石帯とざくろ石帯の変成岩が不連続に接する境界を発見していた。田切ほか(2003)³⁵⁾は、この境界の上下で石墨化度が有意に不連続に異なることを示した。また、高木ほか(2016)³⁶⁾は境界の上下でフェンジャイト K-Ar年代が約 11Ma異なることを報告した。種々の変成岩の特性が不連続に変化するので、この部分がユニット境界であることは明らかである。この境界部における構造運動像が解明できれば、ユニットが接合する際のテクトニクスや接合の時期が明らかになることが予想される。これまでは、どのような地質現象がユニット境界で観察されるかが明らかでなかったため、鉱物帯の境界を確定することが難しかったが、テクトニックな境界の

地質学的特徴が明らかになれば、今後は地質調査によるユニット境界の発見が容易になることが期待できる。

また、低温高压型とは異なる変成相系列でも、変成分帯は成り立つ。異なる変成相系列の変成帯は異なる形成過程を持っているので、低温高压型と同様にTwo way street modelが適用できるかどうかは実証する必要がある。このため、模式的な中圧型変成相系列の変成帯の1つであるアパラチア山地のタコニック変成帯において、三波川変成帯と同様の手法で調査中である。

謝辞

地球年代学ネットワークの板谷徹丸博士と茨城県自然博物館の横山一己博士は、三波川変成帯の研究を進める上で常にサポートして頂いた。東野外志男博士と国士館大学の乾睦子博士は本稿の粗稿をお読み頂き、有益なご意見を頂いた。本研究の一部には、成蹊大学理工学部2018年度特別研究費を使用した。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 都城秋穂, 「変成岩と変成帯学」, 岩波書店, 458 p., 1965.
- 2) M. Toriumi, Strain, stress and uplift, *Tectonics*, **1**, 57-76, 1985.
- 3) C. Chopin, Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences, *Contrib. Mineral. Petrol.* **86**, 107-118, 1984.
- 4) Y. Seki, Glaucophanitic regional metamorphism in the Kanto Mountains, central Japan, *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, **29**, 233-258, 1958.
- 5) S. Banno. Petrologic studies on the Sanbagawa crystalline schists in the Bessi-Ino district, central Sikoku, *Japanese Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. 2* **15**, 203-319, 1964.
- 6) T. Higashino, The higher grade metamorphic zonation of the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan, *Jour. Metamorphic Geol.* **8**, 413-423, 1990.
- 7) S. Banno and C. Sakai, Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa belt, Japan. In " Evolution of Metamorphic Belts", DALY, J. S. et al., eds.: Geol. Soc. Spec. Pub. (London), no. 43, 519-553, 1989.
- 8) 田中耕平, 福田正光, 関東山地の三波川変成帯北縁部の地質構造と変成分帯-とくに黒雲母の現出について-. *岩鉱*, **69**, 313-323, 1974.

- 9) 鈴木盛久, 関東山地西部地域の三波川変成帯. 秀敬編「三波川帯」, 207-215, 1977.
- 10) 酒井千尋, 関東山地鬼石町東方の三波川変成帯の黒雲母帯, *地質雑*, **86**, 517-524, 1980
- 11) 平島崇男, Schreinemakers の東の方法を用いた藍閃変成作用の鉱物共生関係の解析, *地質雑*, **89**, 679-691, 1983.
- 12) 宮下 敦, 関東山地三波川変成岩類の「層状体の構造的累積による地質構造」の再検討, *地質雑*, **104**, 731-748, 1998.
- 13) 橋本光男, 田切美智雄, 日下部和宏, 増田一稔, 矢野徳也, 関東山地児玉-長瀬町三波川変成域における層状体の構造的累積による地質構造, *地質雑*, **98**, 953-965, 1992.
- 14) 矢野徳也, 田切美智雄, 関東山地三波川-鮎川地域, 三波川変成帯の地質構造と温度構造, *地質雑*, **104**, 442-453, 1998.
- 15) A. Miyashiro, *Metamorphic Petrology*, UCL Press, London, 1994.
- 16) A. Miyashita, Electron Microprobe Analysis of Rock-forming Minerals in the Sanbagawa Metamorphic Rocks from the Ayukawa-Sanbagawa Area, Kanto Mountains, Central Japan, *Bull. Nat. Sci. Mus.*, Ser. C, **23**, 1-25, 1997.
- 17) M. Toriumi, Petrological study of the Sambagawa metamorphic rocks in the Kanto Mountains, central Japan, *Bull. Univ. Mus. Univ. Tokyo*, **9**, 99 p., 1975.
- 18) A. Miyashita and T. Itaya, K-Ar Age and Chemistry of Phengite from the Sanbagawa schists in the Kanto Mountains, Central Japan, and their Implication for Exhumation Tectonics, *Gondwana Res.*, **5**, 837-848, 2002.
- 19) T. Itaya and T. Tsujimori, White mica K-Ar geochronology of Sanbagawa eclogites from Southwest Japan: implications for deformation-controlled K-Ar closure temperature, *Intern. Geol. Review*, **57**, 1014-1022, 2015.
- 20) T. Itaya and H. Takasugi, Muscovite K-Ar ages of the Sanbagawa schists, Japan, and argon depletion during cooling and deformation, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 281-290, 1988.
- 21) Y. Tsutsumi, A. Miyashita, K. Terada and H. Hidaka, SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from the Sanbagawa Belt, Kanto Mountains, Japan: need to revise the framework of the belt, *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 12-24, 2009.
- 22) J. K. W. Lee, I. S. Williams and D. J. Ellis, Pb, U and Th diffusion in natural zircon, *Nature*, **390**, 159-162, 1997.
- 23) D. J. Cherniak and E. B. Watson, Pb diffusion in zircon, *Chemical Geol.*, **172**, 5-24, 2000.
- 24) T. Hirajima and S. Banno, Records of high pressure metamorphism in the so-called "superficial nappe" in the Chichibu belt, Japan., *Bull. Soc. Géol. France*, **3**, 661-664, 1989.
- 25) K. Aoki, T. Iizuka, T. Hirata, S. Maruyama and M. Terabayashi, Tectonic boundary between the Sanbagawa belt and Shimanto belt in central Shikoku, Japan, *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 171-183, 2007.
- 26) 宮下 敦, 日本列島形成史を学校教育で, *理科教室*, **774**, 76-82, 2019.
- 27) D. Rubatto, D. Regis, J. Hermann, K. Boston, M. Engo, M. Beltrando and R. B. McAlpine, Yo-yo subduction recorded by accessory minerals in the Italian Western Alps, *Nature Geosci.*, **4**, 338-342, 2011.
- 28) Y. Tsutsumi, A. Miyashita, K. Horie and K. Shiraishi, Existence of multiple units with different accretionary and metamorphic ages in the Sanbagawa Belt, Sakuma-Tenryu area, central Japan, *Island Arc*, **21**, 317-326, 2012.
- 29) Y. Seki, Geology and metamorphism of Sanbagawa crystalline schists in the Tenryu district, central Japan. *Sci. Rep. Saitama Univ.*, Ser. B, **4**, 75-92, 1961.
- 30) N. D. Nuong, N. X. Xhanh, C. Gouzu and T. Itaya, Phengite geochronology of crystalline schists in the Sakuma-Tenryu, *Island Arc*, **20**, 401-410, 2011.
- 31) K. Aoki, Y. Seo, S. Sakata, H. Obayashi, Y. Tsuchiya, T. Imai, S. Yamamoto and T. Hirata, U-Pb zircon dating of the Sanbagawa metamorphic rocks in the Besshi - Asemi-gawa region, central Shikoku, Japan, and tectonostratigraphic consequences, *Jour. Geol. Soc. Japan*, **125**, 183-194, 2019.
- 32) J. Suppe and R. L. Armstrong, Potassium-Argon dating of Franciscan metamorphic rocks, *Amer. Jour. Sci*, **272**, 217-233, 1972.
- 33) W.G. Ernst, Systematics of large-scale tectonics and age progressions in Alpine and Circum-Pacific blueschist belts, *Tectonophysics*, **26**, 229-246, 1975.
- 34) 矢島敏彦, 丸山栄子, 橋詰雅明, 戸ヶ崎利夫, 竹森努, 富岡くみ, 原恵理, 長瀬町野上にみいだされた三波川変成岩中の構造境界, *埼玉大教育地球科学観測実験室研報*, **7**, 15-21, 1994.

- 35) 田切美智雄, 松本哲平, 谷本一樹, 関東山地三波川帯における石墨化度の測定精度の再検討と連続露頭でのシャッフルド・カード境界, *岩鉱*, **32**, 175-184, 2003.
- 36) 高木秀雄, 新井宏嘉, 宮下 敦, 関東山地北縁部の低角度構造境界, *地質雑*, **122**, 305-324, 2016.