

下仁田ジオパークのジオサイト「茂垣の枕状溶岩」露頭と 日本の変成岩研究史における意義

Geosite “pillow lavas at Mogaki” in the Shimonita Geopark,
and its significance on the science history of metamorphic petrology of Japan.

宮 下 敦*
Atsushi Miyashita

キーワード：下仁田ジオパーク，ジオサイト，枕状溶岩，ひすい輝石岩，三波川変成帯，低温高压型変成岩

Key words : Shimonita Geopark, geosite, pillow lava, jadeite rock, Sanbagawa metamorphic rocks, High *P/T* metamorphic rocks

はじめに

下仁田町の南方，稲含山北麓の茂垣付近には，「茂垣の枕状溶岩」という下仁田ジオパークのジオサイトがある（第1図）．この枕状溶岩にひすい輝石（jadeite，理想式は $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ）とアラゴナイト（aragonite，理想式は CaCO_3 ）が含まれることは，Tanabe et al., (1982) によって報告された．



第1図 茂垣の枕状溶岩．玄武岩溶岩が水中で球形に固まったもの．左上から右下にのびる「枕」の構造がよくわかる．

小論では，このひすい輝石を含む枕状溶岩（以下，ひすい輝石岩と呼ぶ）についての新しい研究（新井ほか 2011）の経緯と，変成岩岩石学の研究史における意義について述べ，この露頭が学術的な価値が高く，ジオサイトとして保存する必要があることを示す．

なお，このひすい輝石岩はいわゆる宝飾品となるものではないため，鉱物収集家にとっての価値は小さく，ジオサイトでは興味本位の標本採集で露頭を破壊するような行為は許されないことは強く付言しておきたい．

低温高压型変成岩類の提唱

地殻を作る岩石は，マグマが冷えて固まった火成岩，砂や泥などが積もって固まった堆積岩，およびそれらの岩石が地下で変化した変成岩に大別されている．20世紀半ばまでは，変成岩が形成された条件は，イギリスのダルラディアン地域のものが標準であって，その他のいろいろな地域の変成岩の個性は，その地域独特の地質作用，例えばナトリウムが地殻中で移動して集まるような「ソーダ交代作用」

2020年2月10日受付．2020年2月23日受理．

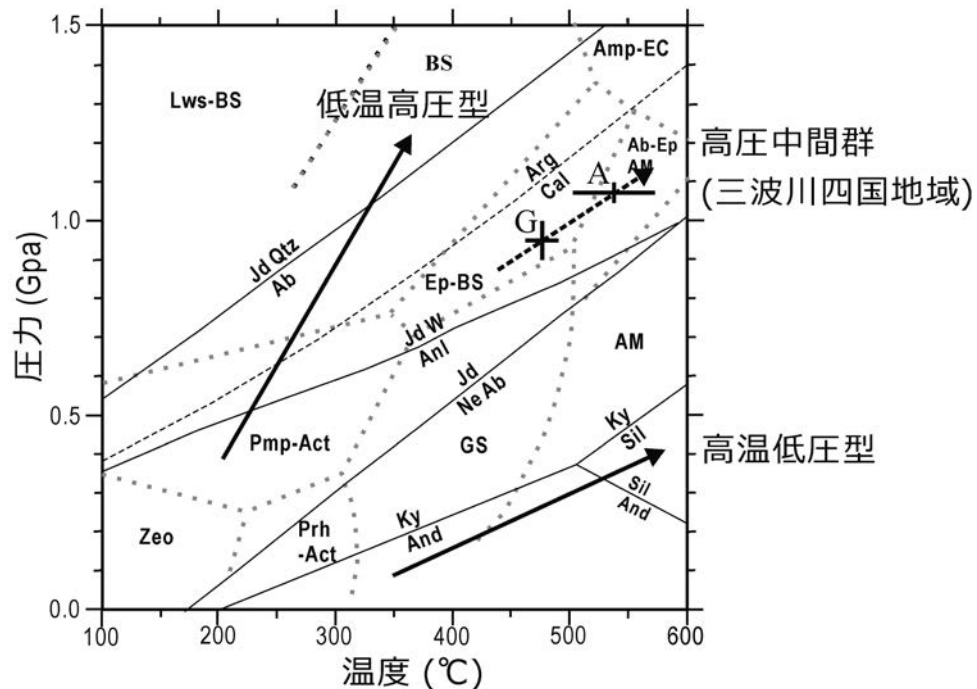
* 成蹊大学理工学部 〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

によって、ナトリウムに富む曹長石、アルカリ輝石あるいはアルカリ角閃石が形成され则认为されていた（都城 1965）。

都城秋穂（1920-2008）は、日本の変成岩に含まれる鉱物の組み合わせについて、熱力学的な基礎を元に解析し、そうした地域毎の変成岩の個性は、その変成岩が経てきた温度圧力条件変化の履歴の違いによって生ずると考えた。ある時代にできた変成岩類からなる一連の地質体を「変成帯」と呼ぶ。下仁田町から埼玉県長瀬にかけて分布する白亜紀にできた変成岩類は、群馬県藤岡市鬼石西方を流れる三波川を模式地として「三波川変成帯」と呼ばれている。都城氏の考えに基づくと、変成岩類が経た温度圧力条件の履歴の違いは、変成帯中において、変成度の低い岩石から高い岩石の鉱物の組み合わせの変化によって表現される。例えば、アルミノ・ケイ酸塩（ Al_2SiO_5 ）には、同じ化学組成で結晶構造が異なる3つの同質異像の鉱物があり、紅柱石は低圧で、珪線石は高温で、藍晶石は高压で、それぞれ安

定であることが知られていた。そこで、地下で温度が上がっても圧力が低い条件の変成帯において、アルミニウムに富む岩石では、低温低圧の部分では岩石に紅柱石が生じ、高温低圧の変成岩中には珪線石が生じる。一方、温度が上がらないのに圧力が高くなる変成帯では、藍晶石が生じる。都城氏は、このような変成岩の特徴を「変成相系列」と呼び、前者は高温低圧型、後者を低温高压型と名づけた（第2図）。

地域による変成岩の鉱物組み合わせの違いは、「ソーダ交代作用」のような特殊な地質現象を想定しなくても、基本的に変成相系列の違いで説明ができる（Miyashiro 1961）。都城氏の変成岩についての著書（都城 1965, Miyashiro 1973）は、日本の岩石を使って世界中の変成岩の分類を可能にした成果で、海外の研究者が日本人の書いた教科書で勉強をするという稀有な事態を生んだ。都城氏の研究には、変成岩の変成相系列に代表されるように、自然の多様性を重視する態度が基本にある（Miyashita 2016）。筆者は、都城氏に直接このこ



第2図 変成相系列を示す図。変成作用を受けた際に、低い温度でも高い圧力を受けるのが低温高压型、圧力は上がらないが温度が高くなるのが高温低圧型の条件を示している。Ky は藍晶石、And は紅柱石、Sil は珪線石が、それぞれ安定な温度圧力領域を示す。また、Jd Qtz の線より上の温度圧力領域では、曹長石（Ab）が不安定になり、ひすい輝石（Jd）と石英（Qtz）が安定に存在する。

とを伺う機会があったが、氏はにっこり笑われて、「まことに、その通りです」と頷いたことが印象に残っている。

この成果を受けて、都城氏が所属していた東京大学岩石学講座では、都城氏の研究を詳細に検証する研究が進んだ。この研究は、都城氏の指導の元でなされたと思われがちであるが、実際には「都城スクール」のような組織があったわけではなく、都城氏の強い個性に影響された若手研究者たちが、それぞれ独自に研究活動を行ったものであった。三波川変成帯については、関東山地を中心に関陽太郎氏（1926-2019）が、四国地域を中心に坂野昇平氏（1933-2008）が研究を進めた。関氏は、関東山地の三波川変成帯で、変成岩に含まれる変成鉱物の組み合わせが、都城氏の見立てどおりに系統的に変化することを示した（Seki 1958）。その際、変成帯の中で、より高圧な条件でできた部分では、ひすい輝石と石英が同時に生じているとした（Seki 1960）。都城氏の教科書では、これが低温高圧型の典型として扱われた。

一方、坂野氏が詳細な調査を行なった四国地域の三波川変成帯（Banno 1964）では、変成帯のより高圧な部分でも、ひすい輝石と石英が同時にできたことが分かる変成岩は存在しなかった。

坂野氏は、その後、所属していた金沢大学で、若手研究者を養成して、他の研究者たちから「坂野スクール」と呼ばれる強力な研究組織を作り、四国地域の三波川変成帯について、非常に詳細な調査研究を行なった。その結果、四国地域の三波川変成帯は、変成相系列が典型的な低温高圧型ではなく、それよりもやや圧力が低い「高圧中間群」と呼ばれるタイプであることを示した（例えば、Banno and Sakai 1989）。この一連の研究によって、三波川変成帯は、世界の高圧中間群変成帯の標準となった。

関氏と坂野氏の研究結果が、どちらも正しいとすれば、同じ時代にできた三波川変成帯の内部で、関東山地と四国地域では変成相系列が違ってくることになる。同じ変成帯中でも、場所によって変成相系列が異なる可能性はあるが、これを認めるためには、なぜ異なっているのかを解明する必要がある。

1970年代以降になって、電子線プローブ微小領域

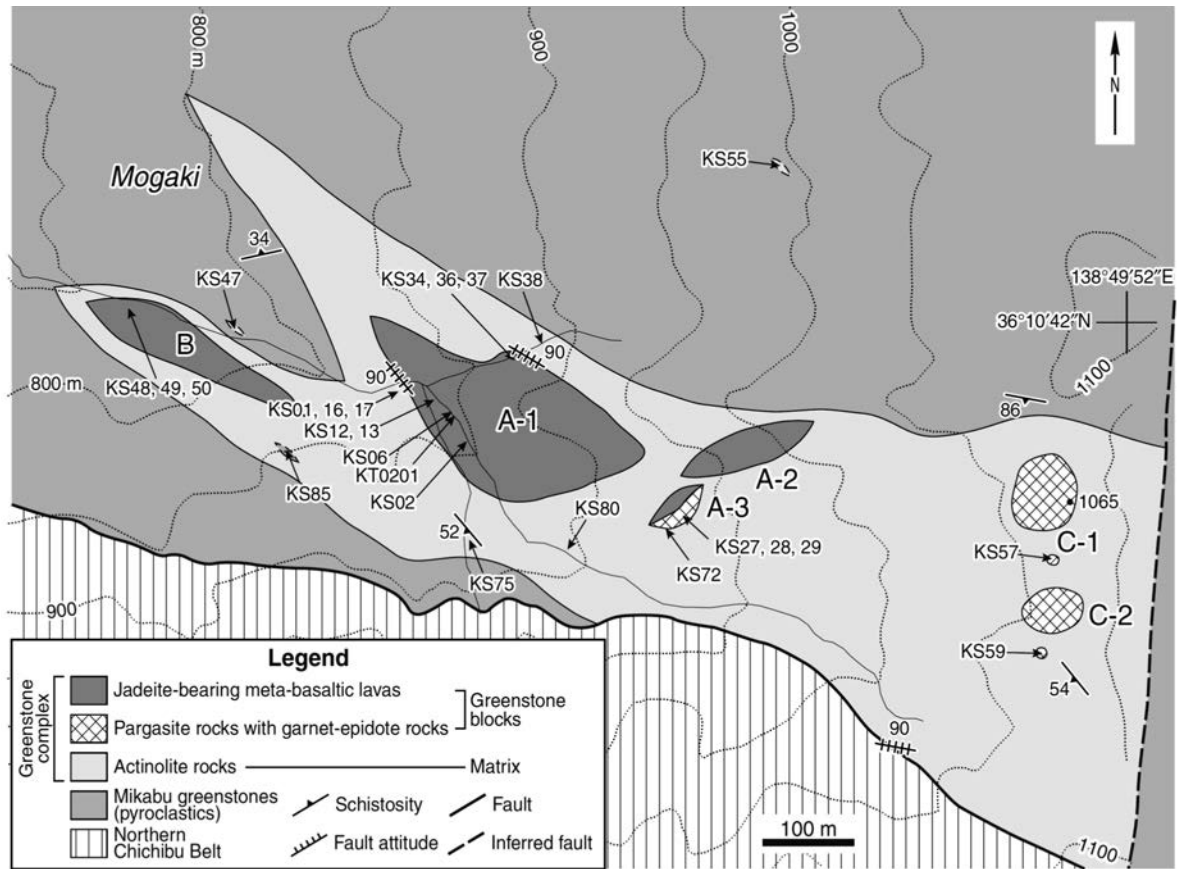
分析器（EPMA）が普及し、変成鉱物の化学組成が数マイクロメートル四方の狭い領域で定量できるようになったが、関東山地の三波川変成帯で、関氏が示したような同時に晶出したひすい輝石と石英を含む変成岩を見出すことができなかった。坂野スクールのメンバーであった京都大学の平島崇男氏は、成蹊高等学校の内田信夫氏（1920-2015）と共同で、関東山地三波川変成帯の岩石を詳細に調査し、四国地域と同様に高圧中間群の変成相系列を持ち、ひすい輝石と石英を同時に含む岩石は形成されないことを明らかにした（平島 1983）。これで、同じ三波川変成帯で関東山地と四国地域の変成相系列が違って見える謎が解明されたように見えた。

ひすい輝石岩の発見と緑色岩メランジュの提唱

下仁田町南方の茂垣付近一帯は、三波川変成帯の一部である御荷鉾緑色岩類が分布する。この地域を調査していた早稲田大学の富岡典夫氏と早稲田大学卒業後に千葉大学に所属していた田辺克幸氏は、茂垣付近の枕状溶岩が非常に硬いことに気がついた。

ひすい輝石を含む岩石は、露頭で非常に硬いのが特徴である。採集した標本を千葉大学のEPMAで分析したところ、ほぼ純粋なひすい輝石が含まれることが分かった。この岩石を詳しく調べると、石英は含まれないが、代わりに変成作用でできたアラゴナイトが存在し、低温高圧型の条件でできたことが明らかになった。関東山地三波川変成帯が高圧中間群の変成相系列を持つことを、平島崇男氏が地質学会年会で発表した同じセッションで、田辺氏らが同じ地域における低温高圧型の特徴をもつひすい輝石岩の発見を報告した。

その後、平島氏も、同じ関東山地の寄居地域の御荷鉾緑色岩類中に、ひすい輝石と石英の両方を含む岩石を自ら発見した（Hirajima 1983）。この岩石の変成条件は、関東山地の三波川変成帯の変成相系列には一致しないため、平島氏は、この岩石は別の変成帯のものであると考えた。茂垣の枕状溶岩の周辺の御荷鉾緑色岩類は、他の地域の御荷鉾緑色岩類と違って、岩石中にアクチノ閃石が非常に多く含ま



第3図 茂垣付近の岩相分布図（新井ほか 2011の Fig. 2）. 中央部のグレーの部分アクチノ閃石岩（マトリクス）の分布を、その中のレンズ状の部分ブロックの岩体を表しており、ブロック・イン・マトリクス構造を持っていることが読み取れる。

れ、「アクチノ閃石岩」と呼べるような鉱物組み合わせを持っている。アクチノ閃石は繊維状で、これが集合したアクチノ閃石岩は風化に弱く脆弱な岩石になっている。また、アクチノ閃石岩が分布しているエリアには、ひすい輝石を含む枕状溶岩の他にも、変成した斑れい岩や角閃石に富む角閃石岩など、アクチノ閃石岩よりも硬い岩石でできたブロックが、数十～数百 m の大きさで点在している（第3図）。前者が後者を包み込んでいる構造になっているため、このような地質体のつくりを「ブロック・イン・マトリクス構造」と呼ぶ。寄居地域の石英を含むひすい輝石岩も、基本的に同様の構造を持っている。このようなブロック・イン・マトリクス構造を持つ地質体としては、黒瀬川帯の岩石が知られている（例えば、Maruyama 1981）。狭義の黒瀬川帯では、島弧地殻を構成する様々な岩石が、蛇紋岩

のマトリクス中に包まれているブロック・イン・マトリクス構造を持っている。このような構造を「蛇紋岩メランジュ」と呼ぶ。メランジュ（Mélange）というのは、フランス語で「混合」を示す言葉である。地質学におけるメランジュは、さまざまな地質体がよくかき混ぜられて存在している様子を表したものである。黒瀬川帯の蛇紋岩メランジュでは、島弧地殻のいろいろな部分を集めて混ぜる運動によって生じ、この運動に伴って、地下深部を構成している超苦鉄質岩が強く変形し、かつ加水されてすべりやすい蛇紋岩に変わり、これが潤滑剤のような働きをして構造帯を形成するとされた。黒瀬川帯では、茂垣と同様に、ひすい輝石を含む枕状溶岩が知られていた（Maruyama 1981）。そこで、平島（1984）は、茂垣や寄居の岩石は、アクチノ閃石岩をマトリクスとする「緑色岩メランジュ」であるとし、黒瀬

川帯の蛇紋岩メランジュに相当すると考えた。アクチノ閃石岩は、蛇紋岩と玄武岩質の岩石が変成作用によって反応することで生じることがあるので、緑色岩メランジュのマトリクスも、元々は蛇紋岩で、それが玄武岩質の御荷鉾緑色岩類と反応したために、アクチノ閃石岩に変わっているものと想像された。

茂垣の地質構造の再調査

筆者は鬼石町西方の三波川変成帯の調査に長く従事していたが、茂垣のひすい輝石岩の発見者である富岡氏と田辺氏に何度か現地を案内してもらって、以前から、その成因に興味を持っていた。富岡氏と田辺氏のひすい輝石岩の論文は、通称ファインディング・レポートと呼ばれ、発見についての速報をするもので、枕状溶岩の産状などについての詳しい地質状況が公表されていなかった。そこで、筆者は、茂垣の枕状溶岩を中心とした地域で詳細な岩相分布図を作ることから再調査してみることにした。その過程で、2002年の調査時に、大雨のために枕状溶岩周辺の沢が深く侵食され、溶岩のブロックとアクチノ閃石岩のマトリクスの境界が露出していることに気がついた（第4図）。このころは、筆者も茂垣の地質体は緑色岩メランジュであると思っていた。そこ

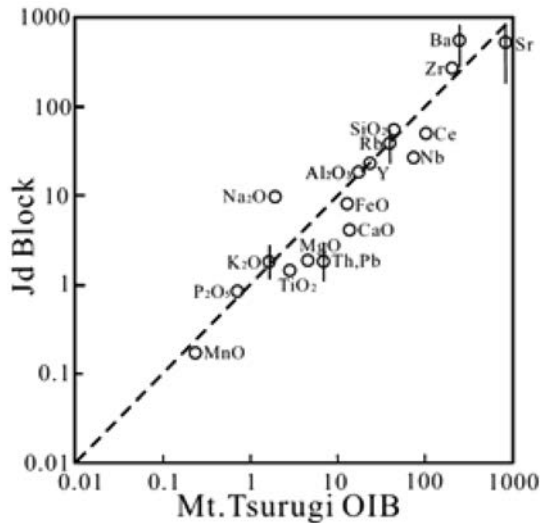


第4図 ひすい輝石岩（左側の白い部分）とアクチノ閃石岩（ハンマーで指している部分）の境界部分。人物は、ひすい輝石岩の発見者の1人である故・田辺克幸氏。

で、境界部の構造を詳しく調べれば、緑色岩メランジュ形成のしくみが詳しく分析できるのではないかと考え、以前から下仁田地域の跡倉ナップの地質構造（新井・高木 1998）を詳しく調査していた早稲田大学の新井宏嘉氏に協力をお願いした。新井氏は、岩石組織から、どのような力が働いて地質構造ができたかを読み取ることができる専門家である。新井氏に詳しく調査してもらった結果は意外なものであった。ブロックとマトリクスの境界や、マトリクス本体には、メランジュを特徴づける強く変形を受けた構造は見られないというのである。つまり、枕状溶岩を含む地質体は、変成を受けた場所から大きく移動していなくて、御荷鉾緑色岩類そのものであるということになる。

このことを確認するために、ブロックを含む岩石について、岩石自体の全岩化学組成や鉱物の化学組成などを詳しく分析して、御荷鉾緑色岩類の一般的な特徴と比較してみることにした。御荷鉾緑色岩類の全岩化学組成は緑色岩の中で特徴的なものがあるため、全岩化学組成が一致すればブロックの岩石が御荷鉾緑色岩類に対比できる証拠が増えるからである。全岩化学組成測定に関しては、御荷鉾緑色岩類を数多く分析されている鳴門教育大学の村田守教授が引き受けてくださった。村田氏から知らされた全岩化学組成の分析結果も意外なものであった。枕状溶岩は、玄武岩溶岩が水中に噴出して表面張力で風船のように丸くなって形成される。しかし、茂垣の枕状溶岩は、基本的には玄武岩の化学組成を持つものの、異常にナトリウムが多い特徴を持っていたのである（第5図）。変成岩の変成相系列は、変成岩の元になった岩石の化学組成を測定して解析されるが、玄武岩や泥岩は特殊な化学組成ではないことが多い。茂垣の枕状溶岩は、異常にナトリウムを多く含む特殊な化学組成であるため、普通の玄武岩組成の岩石よりもナトリウムを主成分の1つとするひすい輝石ができやすい化学組成を持っていたのである。

このような茂垣の鉱物形成についての筆者らの仮説は次のようなものである。御荷鉾緑色岩類は、大洋底に噴出した火成岩体である。火成岩体の生じる場としては、太平洋で現在みられるハワイ天皇



第5図 四国地方剣岳の御荷鉾緑色岩類溶岩の平均全岩化学組成（小澤ほか 1999）を横軸に、茂垣のひすい輝石岩（Jd Block）の平均全岩化学組成（新井ほか 2011）を縦軸にとったアイソコン図。化学組成が似ていると右上から左下の破線に近づく。Na₂Oの点が破線から上にずれ、茂垣のひすい輝石岩の全岩化学組成がナトリウムに富んでいることが分かる。バリウムも富化し、代わりにカルシウムなどが減少している。

海山列のような海底火山の連なりであるという説（Ozawa et al. 1997）と、大量の溶岩が噴出して生じたシャツキー海台のような1つの巨大な火成岩体であるという説があり、現在は後者であるという見方が強い（例えば、Sawada et al. 2019）。このような火成岩体が、プレートの動きによって海溝で沈み込むと、バラバラに壊れて混じってしまう。そこで、御荷鉾緑色岩類は、海底に噴出した枕状溶岩や火山灰、および火成岩体のやや深い部分でできた斑れい岩体が混じった、ブロック・イン・マトリクス構造を元々持っている（例えば、橋本 1989）。火成岩体が形成されてから海溝で沈み込んで変成作用を受けるまでの間のどこかで、地下の熱水の作用によって、火成岩体中の元素が広範に移動する熱水変質作用が起こり、枕状溶岩ではナトリウムが増え、アクチノ閃石岩の原岩からはナトリウムが減少してしまう。全岩化学組成が、普通の玄武岩から偏ることによって、三波川変成作用の働きにより、枕状溶

岩ではひすい輝石が、アクチノ閃石岩ではアクチノ閃石が、という特定の変成鉱物が非常に多い変成岩が形成されたと考えられる。ひすい輝石岩に伴っている灰ばんざくろ石・角閃石岩等も同様の成因が考えられる。つまり、緑色岩メランジュは、温泉地などで見られる熱水変質帯の特徴を持っており、大規模な構造運動による結果で形成されたものではないので、新井氏が観察したように、マトリクス部分が強い変形作用を被っていないのである（新井ほか 2011）。

しかし、御荷鉾緑色岩類中に変質帯が形成され、これが典型的な低温高压型を被ることでひすい輝石岩が形成されたという筆者らの考え方は、ソーダ交代作用の復活のような形であって、当時の日本の地質学では、非常識な考え方であった。このため、この結論を論文として出版・公表するのには、調査開始から10年以上という長い時間がかかってしまった。

変成岩岩石学と地質年代学の進歩

筆者らが成果の公表に苦闘している間に、変成岩岩石学では大きな変革が起こっていた。端緒は、スイス・アルプスでコース石を含む超高压変成岩類が発見されたことであった（Chopin et al. 1984）。

超高压変成岩は、それまで知られていた低温高压型変成岩のそれをはるかに超えた圧力条件で形成された変成岩である。この超高压変成岩の研究は急速に進展し、大陸の衝突によって地下 100 km 近くまで沈み込んでダイヤモンドができ、それが再度上昇して地表に露出しているものが見つかった（小笠原 2009）。こうした超高压変成岩類では、コース石やダイヤモンドは、ざくろ石やジルコンといった鉱物の包有物として見出される。ざくろ石やジルコンのまわりの部分は、超高压変成岩類が上昇する際に再度、変成作用を受け、ずっと浅い場所の温度圧力でできた鉱物組み合わせに変わってしまっている。

ざくろ石やジルコンは、こうした変化から超高压でできた変成鉱物を守るカプセルの役割を果たしている。ざくろ石やジルコンの外側の鉱物の組み合わせは変成作用の終末に温度圧力条件が下降していく

ような条件を示しており、そのような変成作用を「後退変成作用」と呼ぶ。そこで、岩石全体で見ると、超高压変成岩類が形成される深さよりも、ずっと浅いところの温度圧力条件で形成された変成岩のように見えてしまうのである。

こうした後退変成作用は、超高压変成岩類だけでなく、他の温度圧力条件の変成岩でも起こりうる。三波川変成帯でも、ざくろ石に含まれている変成鉱物を調べた結果、従来よりもずっと高い圧力でできた鉱物の組み合わせが見つかるようになり（例えば、Aoki et al. 2009）、ひすい輝石と石英が同時にできた組み合わせも発見された（Taguchi and Enami 2014）。関東山地でも、低温高压型を示す変成鉱物であるローソン石が分解してできた鉱物組み合わせがざくろ石に含まれることが、筆者によって発見されている（Miyashita 2015）。

これらの結果から、従来、坂野氏らが示した三波川変成帯の標準的な変成相系列とされた高压中間群は、後退変成作用における温度圧力条件を示しており、三波川変成帯が形成された際の変成相系列は、関氏が示したような典型的な低温高压型の変成相系列を持っていたことが明らかになった。茂垣の枕状溶岩に含まれるひすい輝石とアラゴナイトの組み合わせも、Tanabe et al. (1982) が示唆したように、後者の典型的な低温高压型変成作用で生じたものと考えられる。

一方、超高压変成岩類の研究と並行する形で、変成岩の形成された年代を測る測定方法も進歩した。特に、ジルコン中のウラン（U）と鉛（Pb）の同位体比を測定して年代（ジルコン U-Pb 年代）を測るための、二次イオン質量分析器（SHRIMP）や、レーザーアブレーション・誘導結合プラズマ質量分析計（LA-ICPMS）の改良により、従来よりも微小な領域について迅速にジルコン U-Pb 年代測定が行えるようになった。この方法で、寄居地域のひすい輝石岩中のジルコンについて、ジルコン U-Pb 年代を測定した結果、この岩石が約1.5億年前（150Ma）のジュラ紀に形成されたものが、その後に熱水作用を受けたものであることが明らかになった（Fukuyama et al. 2013, Yui and Fukuyama 2015）。黒瀬川帯

のひすい輝石岩は古生代のジルコン U-Pb 年代を示す（Tsutsumi et al. 2010）ので、寄居のひすい輝石岩は、黒瀬川帯のものよりもずっと若い形成年代を持つ。1.5億年前の年代は、同じくジルコン U-Pb 年代で示される御荷鉾緑色岩類の元となった火成岩体が形成された年代とほぼ一致する（Sawada et al. 2019）。残念ながら、茂垣の枕状溶岩中のジルコンは数マイクロメートルの大きさで、現在の技術では、まだジルコン U-Pb 年代の測定ができないが、近い将来可能になると予想され、この仮説の検証ができると期待される。

結局、茂垣の枕状溶岩は、新井ほか（2011）が示したように、御荷鉾緑色岩類の一部であり、これが典型的な低温高压型変成作用を受けることによってひすい輝石とアラゴナイトができたと考えられるのである。筆者らの考えは、発表当時は非常識であったが、変成岩研究の進歩により、今日では妥当なものとなったと思われる。

おわりに

茂垣の枕状溶岩に含まれるひすい輝石の意義について、半世紀以上にわたる日本の変成岩研究の進歩に基づいて説明してみることを試みた。茂垣の枕状溶岩は、とても小さな露頭であるが、地質学者たちの長い研究の歴史を読み取ることができる存在ということができるだろう。

三波川変成帯が形成された温度圧力条件の見積もりについては、結果論ではあるが、関陽太郎氏の考えが正しかった。関氏は1970年代から変成岩研究からは遠ざかり、土木地質学の研究に転換したので、関氏の論文は、変成岩研究の歴史からは古典として扱われるようになってしまっていた。関氏は2019年1月に急逝されたが、その前に三波川変成帯についての氏の考え方が正しかったことを報告することができた。小論は、関陽太郎先生の追悼の意味も込めている。

謝 辞

鳴門教育大学の村田 守教授と早稲田大学本庄高等学院の新井宏嘉博士には、原稿を読んで頂き、有益なご指摘を頂いた。下仁田自然学校の保科 裕氏と力田正一氏の査読意見により、本稿は大きく改善された。

下仁田ジオパークの関係者の方々には、本稿執筆の機会を頂いた、記して感謝いたします。

文 献

- Aoki K., Kitajima K., Masago H., Nishizawa M., Terabayashi M., Omori S., Yokoyama T., Takahata N., Sano Y. and Maruyama S. (2009) Metamorphic *P-T*-time history of the Sanbagawa belt in central Shikoku, Japan and implications of retrograde metamorphism during exhumation, *Lithos*, 113, 393-407.
- 新井宏嘉・高木秀雄 (1998) 関東山地、跡倉ナツプの構造発達：押被せ褶曲の復元。地質雑，104，861-876.
- 新井宏嘉・宮下 敦・田辺克幸・村田 守 (2011) 群馬県下仁田地域に分布する御荷鉾緑色岩類中のひすい輝石とその岩石鉱物学的特徴，岩石鉱物科学，40，177-194.
- 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.
- Banno S. and Sakai C. (1989) 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.
- Chopin C. (1984) Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps : a first record and some consequences, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 107-118.
- Fukuyama Y., Ogasawara M., Horie K. and Lee D.C. (2013) Genesis of jadeite-quartz rocks in the Yorii area of the Kanto Mountains, Japan. *Jour. Asian Earth Sci.*, 63, 206-217.
- 橋本光男 (1989) 御荷鉾緑色岩について，地質雑，95，789-798.
- 平島崇男 (1983) 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.
- Hirajima T. (1983) Jadeite + quartz rock from the Kanto Mountains, *Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 78, 77-83.
- 平島崇男 (1984) 関東山地東部・寄居地域の緑色岩メランジュ。地質雑，84，629-642
- Maruyama S. (1981) The Kurosegawa melange zone in the Ino district to the north of Kochi city, central, Japan, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 87, 569-583.
- Miyashiro A. (1961) Evolution of metamorphic belts, *Jour. Petrol.*, 2, 277-311.
- 都城秋穂 (1965) 変成岩と変成帯，岩波書店，458p.
- Miyashiro A. (1973) Metamorphism and metamorphic belts. Springer Netherlands, 492p.
- Miyashita A. (2015) New finding of paragonite-clinozoisite association in garnet from the type locality of Sanbagawa belt (Kanto Mountains, Japan). *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, 110, 71-75.
- Miyashita A. (2016) A note on the basic scientific line of thought of Dr. Akiho Miyashiro, *Bull. Res. Inst. Nat. Sci., Okayama Univ. of Sci.*, 42, 27-30.
- 小笠原義秀 (2009) 超高压変成作用起源のダイヤモンド，早稲田大学出版部，112p.
- Ozawa H., Murata M. and Itaya T. (1997) Early Jurassic volcanism of the Mikabu belt : Evidence from K-Ar age of picritic basalt, Kurouchi ultramafic mass, Kanto Mountains, Japan, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 103, 1089-1092.
- 小澤大成・元山茂樹・井上宗弥・加藤泰浩・村田 守 (1999) 四国東部みかぶ緑色岩類の岩石学的特徴。地質学論集，52，217-228.
- Sawada H., Isozaki Y., Aoki S., Sakata S., Sawaki Y., Hasegawa R. and Nakamura Y. (2019) The late Jurassic magmatic protholiths of the Mikabu greenstones in SW Japan : A fragment of an oceanic plateau in the Paleo-Pacific Ocean, *Jour. Asian Earth Sci.*, 228-236.
- Seki Y. (1958) Glaucophanitic regional metamorphism in the Kanto Mountains, central Japan. *Jour. Geol. Geogr.*, 29, 233-258.
- Seki Y. (1960) Jadeite in Sanbagawa crystalline schists of central Japan. *Amer. Jour. Sci.*, 258, 705-715.
- Taguchi T. and Enami M. (2014) Coexistence of jadeite and quartz in garnet of the Sanbagawa metapelite from the Asemigawa region, central Shikoku, Japan, *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, 109, 169-176.
- Tanabe K., Tomioka N. and Kanehira K. (1982) Jadeite-Aragonite-bearing rocks from the Sanbagawa metamorphic terrane in the Kanto Mountains, *Proc. Japan Acad.*, 58, Ser. B, 199-203.
- Tsutsumi Y., Yokoyama K., Miyawaki R., Matsubara S., Terada K and Hidaka H. (2010) Ages of zircons in jadeitite and jadeite-bearing rocks of Japanese islands. *Bull. Natl. Mus. Nat. Sci.*, Ser. C, 36, 19-30.

Yui T. and Fukuyama M. (2015) A revisit to the Yorii
jadeite-quartz rock, the Kanto Mountains, central

Japan : Implication for petrogenesis, Jour. Asian
Earth Sci., 108, 56-67.

(要 旨)

宮下 敦（2020）下仁田ジオパークのジオサイト「茂垣の枕状溶岩」露頭と日本の変成岩研究史における意義。下仁田町自然史館研究報告，5，1-9.

下仁田ジオパークのジオサイトの一つである茂垣の枕状溶岩には，変成作用によって形成されたひすい輝石とアラゴナイトが含まれる．この岩石の成因を解明する研究について，半世紀以上にわたる日本の変成岩岩石学の歴史をふまえて解説し，ジオサイトとしての重要性を示す．

