

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17823

研究課題名(和文)付加体緑色岩を用いた沈み込む海洋地殻の変成相 含水量図の高精度化

研究課題名(英文)Refinement of metamorphic facies-H<sub>2</sub>O content diagram for subducting oceanic crust by use of greenstones in accretionary complexes

研究代表者

遠藤 俊祐 (Endo, Shunsuke)

島根大学・総合理工学研究科・特任講師

研究者番号：60738326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：四国中央部の御荷鉾～秩父帯北帯にかけての詳細な地質構造、温度・圧力構造、付加年代を明らかにした。また、これら地質体の各ユニットに含まれる変成玄武岩(緑色岩)の変成鉱物組合せ、鉱物組成を分析した。アルカリ輝石固溶体の低温での熱力学的性質と地質圧力計としての有用性を示した。沈み込む玄武岩質海洋地殻のなかで最初にローソン石が形成される反応を明らかにし、プレート境界地震発生帯での新しい流体発生メカニズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：Structural and metamorphic architectures of the Mikabu-Northern Chichibu belt have been revealed as an example of deep accretionary wedge. Metabasalts (greenstones) in each unit of the belt have been examined to understand mineral reactions in shallow subduction zones as well as low-temperature thermodynamic mixing properties of key metamorphic minerals. Structural evolution of the belts can be explained by thickening of accretionary wedge by underplating and subsequent tectonic thinning and exhumation of deep seated rocks in the wedge. Alkali pyroxene is an important metamorphic mineral in low-grade metabasalt and its low-temperature mixing behavior in the diopside-aegirine-jadeite system is preliminary established by the natural data. Common occurrence of lawsonite veins formed via dehydration of pre-existed zeolite veins is discovered from the unmetamorphosed N. Chichibu accretionary complex, and this can be important source of fluid in seismogenic plate boundaries.

研究分野：地質学

キーワード：低温変成作用 付加体 秩父帯 緑色岩 玄武岩 アルカリ輝石 ローソン石

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯深部での水流体は、変成反応(脱水反応)の進行により発生し、温度構造や初期含水量を与えれば熱力学的に予測計算が可能である。こうした深部変成流体は、沈み込み帯上の火山活動・スラブ内地震など、多様なプロセスに深く関与していると考えられている。一方、沈み込み帯浅部の、地殻岩石の脆性-延性遷移領域以浅に相当する低温(300以下)での鉱物反応や流体発生機構は複雑でよく理解されていない。しかしこの領域はプレート境界地震発生帯に相当し、その場の反応と変形の相互作用とダイナミクスのリンクは重要である。また、こうした低温領域におけるプロセスは実験の時間スケールで再現することは不可能であるため、プレート境界で形成された付加体の構成岩石からいかに情報を読み取るかが重要になる。

2. 研究の目的

沈み込み帯浅部の低温条件(300前後)で起こっている岩石中の相変化やそれに伴うダイナミクスを理解するために、通常の変成岩の解析と同様に、定量的な熱力学解析を付加体の弱変成玄武岩(緑色岩)に導入したい。ここで最大の障壁は、低温変成鉱物の固溶体の熱力学モデル(組成 活動度関係)が未確立な点である。前述のとおり、この問題において反応速度論的に実験的アプローチは有効でない。そこで、地質構造と変成温度 圧力条件の明らかにされた地質体(御荷鉾 秩父帯)を「天然実験室」と見立て、変成鉱物の組成変化をもとに重要な鉱物の固溶体モデルを較正することを目指す。確立した固溶体モデルを用いて、特に水収支に大きく寄与する玄武岩の定量的な変成相 含水量図を熱力学計算で求め、沈み込み帯浅部での海洋地殻の相変化・吸水 脱水挙動を説明することを当初の目的とした。

3. 研究の方法

付加体の構造層序・地質構造と変成温度 圧力を関係づけ、緑色岩中の変成鉱物の組成と温度 圧力の関係を調べる。この時、ある特定の鉱物組み合わせ、温度 圧力のもとで、固溶体鉱物の組成 活動度関係に制約が与えられる場合がある。そのような鉱物組み合わせをもつ試料を御荷鉾 秩父帯の各層準(温度 圧力との対応がついている)からまんべんなく収集し、目的鉱物を EPMA で組成分析することで、その鉱物の固溶体の熱力学モデルを地質学的に検定・較正する(geo-experimental 法)。

4. 研究成果

(1) 秩父帯北帯の地質構造とテクトニクス：200 日余りの野外調査により、四国中央部・本山地域の御荷鉾-秩父帯北帯の地質構造を明らかにした。本山地域にはペルム系を除く秩父帯北帯の付加コンプレックスすべての

構成要素(御荷鉾、柏木、上吉田、住居附、遊子川の各ユニット)が揃っており、またこれらが南傾斜の断層で累重する下位若化の付加体構造層序を保持することを明らかにした。しかしながら、ユニット境界断層の多くはもともとの衝上断層ではなく正断層となっている。また構造的上位ユニットは脆性変形、下位ユニットは延性変形構造が卓越し、大規模な横臥褶曲がみられる。後述の温度-圧力推定結果と併せると、秩父帯北帯は白亜紀の「三波川沈み込み帯」上盤の付加ウェッジ後背部断面とみなすことができ、底付けにより肥厚化したウェッジが大規模な構造的崩壊により著しく薄化したことを示す。またこのような伸長テクトニクスは、深部岩石の上昇に大きく寄与したと考えられる。

(2) 秩父帯北帯の付加体内部の温度-圧力推定：各ユニットの泥質岩に炭質物ラマン温度計を適用した結果、千枚岩質の柏木~上吉田ユニットにかけては連続的だが、住居附および遊子川ユニット(泥質メランジュ)との大規模正断層境界を挟んで、温度ギャップが認められた。また、各ユニットの緑色岩の変成鉱物の精査により、アルカリ角閃石、アルカリ輝石(ひすい輝石を含む)やローソン石などの高圧変成鉱物を多数見出し、各ユニットの圧力推定にも成功した。以上の結果から、構造的上位(南部)に向かって単調に低下する定量的な温度 圧力構造が明らかになった(図1)。また、秩父帯北帯は内帯の同時期付加体よりも、高圧条件を示し、より深部の付加体であることが明確になった。

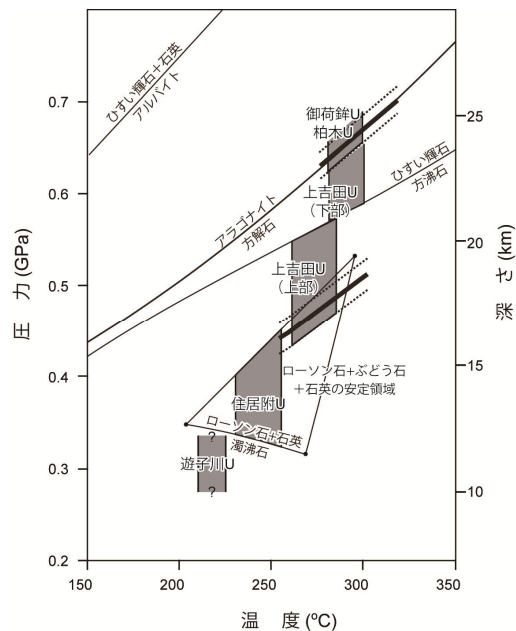


図1 秩父帯北帯のピーク温度-圧力条件

(3) アルカリ輝石固溶体の熱力学的性質：アルカリ輝石は低温変成作用を受けた玄武岩質岩中にみられる代表的な変成鉱物である。また、ひすい輝石圧力計はこういった低温変

成域の圧力推定可能性をもつ数少ない地質圧力計のひとつである。但し、300 程度の低温条件下でのアルカリ輝石の組成 活動度関係が確立していないため、ひすい輝石圧力計をこのような弱変成岩にそのまま適用することができない。そこで、すでに温度 圧力が制約されている秩父帯北帯の各ユニットにおいて、25 試料に及び緑色岩中のアルカリ輝石の反射電子像での組織観察と EPMA 組成分析を行った。そのデータを鉍物組合せ（石英の有無）とともに検討した。その結果、低温条件下でのアルカリ輝石固溶体の熱力学的性質について、温度 圧力一定では石英と共存するアルカリ輝石のひすい輝石固溶量はエジリン成分が高いほど増加し、またこのトレンドは圧力が高いほどひすい輝石固溶量が高い方へシフトする、ということが示された。こうした天然のデータをもとに、低温でのアルカリ輝石の組成 - 活動度関係について、予察的なモデルを構築した（図 2）。

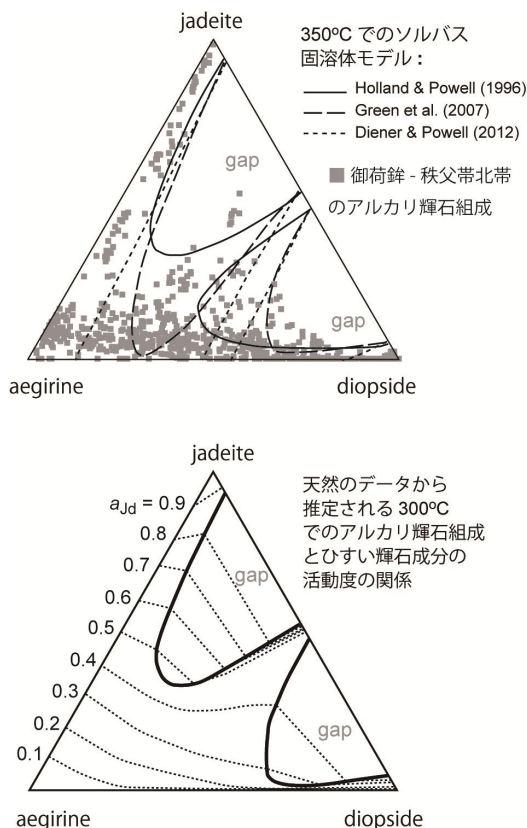


図 2 アルカリ輝石の組成 活動度モデル

(4) 沈み込む変質玄武岩中の脱水反応：沈み込む変質海洋地殻は 400 を越えると連続的な脱水反応の進行により水流体を発生する。一方、300 程度の低温では、多くの高含水量鉍物が安定化するため、海洋地殻は水のソースではなくシンクとして振舞うことが予測される。しかし、300 程度の低温では、反応進行度が低く、こうした玄武岩系（岩石全体が化学平衡）としての予測は現実的ではない。そのため、実際の岩石の観察により実

際起こった反応プロセスを読み取ることは重要である。本研究により、住居附ユニット（250 ）の変質玄武岩にローソン石 石英脈が極めて普遍的に存在することを初めて明らかにした。またその組織観察から、もともとはゼオライト（濁沸石）脈として形成され、それが沈み込みによる昇圧脱水分解でローソン石を形成したことが明らかになった。高含水量鉍物のローソン石は沈み込む海洋地殻の最も重要な水輸送相であり、その形成には海洋地殻が沈み込み帯深部で吸水するプロセスが必要と考えられる。しかし、本研究の結果は、250 程度では沈み込む玄武岩質海洋地殻は、玄武岩組成の系としての反応が起こるのではなく、局在化した単純系での反応が起こり、ローソン石初出反応は沸石脈の分解という脱水反応が重要であることを示す。このことは、当初の目的のような玄武岩系での相図でプレート境界地震発生帯の吸水脱水挙動を議論することはできないことを意味する。また、沈み込み帯浅部（12 km 前後）における新しい流体発生機構として、このようなゼオライト脱水分解がどの程度普遍性があるものか、さらなる調査が必要である。特に、住居附ユニットは反応物であるゼオライトが残存していないため、より低圧の付加体の緑色岩にゼオライトが形成されるプロセス（海洋底変成作用か、埋没変成作用か）を解明することが今後の課題である。

(5) 緑色岩に付随するマンガン鉍床の記載鉍物学的研究：住居附ユニットの緑色岩に胚胎される鉄マンガン鉍床やジャスパーの鉍物学的研究も行った。このユニットの緑色岩は中央海嶺玄武岩起源であり、これらは海嶺での熱水循環の産物と考えられる。しかし、その鉍物組合せは沈み込みに伴う低温変成作用により再結晶したものである。特に、珪灰鉄鉍（ilvaite）+ 赤鉄鉍 + 石英という鉍物組み合わせの安定領域を熱力学的に検討し、低温低圧～低温高圧に限定されることを示した。これまでの研究では、珪灰鉄鉍 + 石英の組み合わせはある程度の高圧を必要とするとされていたが、これは天然の産状とは調和しない。本研究ではこの組み合わせの低圧限界となる反応が地質学的な温度 圧力範囲には存在しないことを示した。また、本邦初産となるマンガン珪灰鉄鉍を見出し、その記載を行った。

5. 主な発表論文等  
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

- 〔雑誌論文〕(計 6 件)
- 青矢睦月・遠藤俊祐 (2017) 「初期」三波川変成作用の認識、及び後期白亜紀三波川沈み込み帯の描像。地質学雑誌, 123, 677-698. 10.5575/geosoc.2017.0008 (査読有)

- (2) 青矢睦月・水上知行・遠藤俊祐 (2017) 三波川帯トラバース：最浅部変成岩から最深部超苦鉄質岩まで．地質学雑誌，**123**，491-514. 10.5575/geosoc.2017.0038 ( 査読有 )
- (3) Endo, S. (2017) Ilvaite-manganilvaite series minerals in jasper and iron-manganese ore from the Northern Chichibu belt, central Shikoku, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **112**, 166-172. 10.2465/jmps.170408 ( 査読有 )
- (4) Endo, S. & Wallis, S.R. (2017) Structural architecture and low-grade metamorphism of the Mikabu-Northern Chichibu accretionary wedge, SW Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **35**, 695-716. 10.1111/jmg.12251 ( 査読有 )
- (5) Kim, D., Wallis, S., Endo, S. & Ree, J.-H. (2016) Seismic properties of lawsonite eclogites from the southern Motagua fault zone, Guatemala. *Tectonophysics*, **677-678**, 88-98. 10.1016/j.tecto.2016.04.012( 査読有 )
- (6) Kawahara, H., Endo, S., Wallis, S.R., Nagaya, T., Mori, H. & Asahara, Y. (2016) Brucite as an important phase of the shallow mantle wedge: evidence from the Sanbagawa subduction zone, SW Japan. *Lithos*, **254-256**, 53-66. 10.1016/j.lithos.2016.02.022 ( 査読有 )
- [ 学会発表 ] ( 計 14 件 )
- (1) 角野浩史・Simon R. Wallis・瀧藤佑衣・遠藤俊祐・水上知行・吉田健太・小林真大・平島崇男・Ray Burgess・Chris J. Ballentine (2017) 四国・三波川帯変成岩中のハロゲンと希ガスから制約される水の沈み込み過程．日本地球化学会第 64 回年会．東京工業大学・大岡山キャンパス
- (2) Kasymbekov, A., Takasu, A., Kabir, M.F., Endo, S., Bakirov, A., Hirajima, T., Yoshida, K., Orozbaev, R. & Sakiev, K. (2017) Metamorphic history of garnet amphibolite and pelitic schist from the Neldy Formation, Makbal district, Kyrgyz Northern Tian-Shan, Kyrgyzstan. 日本鉱物科学会年会．愛媛大学 ( 松山市 )
- (3) Kabir, M.F., Takasu, A. & Endo, S. (2017) Eclogitic metabasite as a block within the serpentinite body in the Gotsu area, Suo metamorphic belt, SW Japan. 日本鉱物科学会年会．愛媛大学 ( 松山市 )
- (4) 遠藤俊祐・宮崎一博・檀原 徹・岩野英樹・平田岳史 (2017) 四国中央部・本山地域の三波川帯白滝ユニットの岩相変化と碎屑性ジルコン年代．日本地質学会第 124 回学術大会．愛媛大学 ( 松山市 )
- (5) 遠藤俊祐・田中大海・高須 晃 (2017) 三波川帯・高越地域のローソン石を含むざくろ石藍閃石片岩の変成履歴．日本鉱物科学会年会．愛媛大学 ( 松山市 )
- (6) Sumino, H., Burgess, R., Kouketsu, Y., Mizukami, T., Endo, S., Yoshida, K., Hirajima, T., Wallis, S. & Ballentine, C.J. (2017) Water subduction processes constrained by halogens and noble gases in the Sanbagawa metamorphic rocks. Goldschmidt Conference, Paris
- (7) Endo, S. & Wallis, S. (2017) Field-based constraint on dehydration behavior of altered oceanic basalt at the seismogenic subduction boundary. JpGU-AGU Joint Meeting, Makuhari
- (8) Aoya, M., Endo, S., Mizukami, T. & Wallis, S. (2017) The Early-Cretaceous Sambagawa metamorphism and a cross-sectional view of the Late-Cretaceous Sambagawa subduction zone. JpGU-AGU Joint Meeting, Makuhari
- (9) Wallis, S., Endo, S., Nagaya, T., Mori, H., Asahara, Y. & Kawahara, H. (2017) Evidence for localized high fluid pressure along the paleo subduction boundary exposed in the Sanbagawa belt, SW Japan. JpGU-AGU Joint Meeting, Makuhari
- (10) Wallis, S., Endo, S., Kawahara, H., Nagaya, T., Mori, H. & Asahara, Y. (2016) Brucite as an important phase in the mantle wedge: evidence from the Sanbagawa belt, SW Japan. Japan Geoscience Union Meeting . 幕張メッセ国際会議場 ( 千葉市 )
- (11) 原田悠暉・ウォリス サイモン・永治方敬・遠藤俊祐 (2016) 四国中央部に分布する秩父帯北帯におけるメタチャートの延性変形．日本地質学会第 123 回学術大会．日本大学 ( 東京・桜上水 )
- (12) 遠藤俊祐 (2016) 四国中央部・三波川帯緑泥石帯低温部の苦鉄質片岩の起源とブログレード変成作用．日本地質学会第 123 回学術大会．日本大学 ( 東京・桜上水 )
- (13) 遠藤俊祐 (2016) 秩父帯北帯の弱変成塩基性岩中のアルカリ輝石組成とローソン石初出反応．日本鉱物科学会年会．金沢大学 ( 金沢市 )
- (14) Wallis, S.R., Endo, S., Nagaya, T., Kawahara, H., Mori, H. & Asahara, Y. (2016) Mineralogy of the mantle wedge at depths of deep slow slip: implications for fluid flow along the subduction boundary. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco ( アメリカ )
- 6 . 研究組織
- (1) 研究代表者  
遠藤 俊祐 ( Endo, Shunsuke )  
島根大学・総合理工学研究科・特任講師  
研究者番号：60738326