

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：87101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540524

研究課題名(和文) 変成 / 交代反応と変形の連結に関する速度論的研究

研究課題名(英文) Kinetics of the combination between metamorphic/metasomatic reactions and deformation

研究代表者

森 康 (Mori, Yasushi)

北九州市立自然史・歴史博物館・その他部局等・その他

研究者番号：20359475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、低温高压型変成帯の蛇紋岩メランジに見られる交代作用を主な対象として、反応と変形の連結現象を速度論的に記述することを目的とする。物質移動解析を応用して反応の進行に伴う流体相と固相の体積変化を推定し、間隙水圧変化が岩石の変形に与える影響を考察した。その結果、反応と変形の連結現象にはさまざまなタイプのものが認められ、それらは(A)流体相の体積増加が卓越して間隙水圧が上がる「水圧破碎タイプ」、(B)固相の体積減少が卓越して間隙水圧が下がる「反応促進型延性変形タイプ」、(C)固相の体積増加が卓越する「目詰まりタイプ」に大別された。

研究成果の概要(英文)：This study deals with the combination phenomena of reaction and deformation in rocks. The targets are metasomatism found in serpentinite melange intercalated to high-pressure low-temperature metamorphic belts. Mass balance analysis using the isocon method was applied to estimate the volume changes of fluid and solid phases and the changes of pore-fluid pressure during metasomatism. As a result, the combination phenomena of reaction and deformation were classified into three types: (A) hydraulic fracturing due to increasing pore fluid pressure, (B) reaction-enhanced ductility due to decreasing pore fluid pressure, and (C) decrease of permeability due to increasing solid volume.

研究分野：変成岩岩石学

キーワード：変成岩 交代作用 変形作用

1. 研究開始当初の背景

(1) 変成岩や交代岩が形成される地下深部では、鉱物-鉱物や流体-鉱物の反応と岩石の変形が相互に影響しながら同時に進行していると考えられる。従来の研究では、反応と変形を個別に扱うことがほとんどであった。すなわち、反応に関する研究は変成岩岩石学、変形に関する研究は構造地質学として発展してきた。両者が成熟期を迎えている現在、反応と変形を統合的に理解することは次のステップのひとつと位置づけられる。しかし、反応と変形の連結現象に関する研究はまだ発展段階にあり、事例研究の積み重ねが必要である。

(2) 反応と変形の連結現象を扱った先駆的研究として Nishiyama (1989) や西山 (1989) が挙げられる。これらの研究は、反応に伴う流体相と固相の体積変化に着目して水圧破砕 (hydraulic fracturing) と反応促進型延性変形 (reaction-enhanced ductility) の関係を論じた。前者では流体相の体積増加が卓越して間隙水圧が上がり、後者では固相の体積減少が卓越して間隙水圧が下がる。すなわち、反応と変形の連結現象を理解する鍵は、間隙水圧の変化にあると考えられる。

(2) 我々は、長崎変成岩類 (九州西端に分布する低温高压型変成帯) の蛇紋岩メランジに見られる交代作用の記載を行ってきた。蛇紋岩メランジでは、岩石の機械的混合に伴ってさまざまな交代作用が起きており、しばしば反応と変形の連結現象が見られる。そこでは交代作用の過程が保存されており、反応進行度の異なる試料を連続的に得られる場合がある。このことは、速度論的研究を行う上できわめて有利な条件である。そこで我々は、蛇紋岩メランジにおける交代作用を速度論的に研究し、反応と変形の連結現象の理論的解明を目指す本研究を着想した。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、変成岩における反応と変形の連結現象を速度論的に記述することを目的とする。具体的には低温高压型変成帯の蛇紋岩メランジに見られる交代作用を主な対象として、反応と変形の連結現象を記載する。物質移動解析を応用して反応の進行に伴う流体相と固相の体積変化を推定し、間隙水圧変化が岩石の変形に与える影響を考察する。事例研究を積み重ね、サブダクションチャンネルにおける反応と変形の連結現象の実態と重要性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 野外調査：長崎県西彼杵半島および野母半島を踏査し、蛇紋岩メランジにおける交代作用を記載し、反応と変形の連結現象を抽出した。また、室内研究用の試料を採集した。

(2) 室内研究：採集試料について岩石組織と鉱物共生の偏光顕微鏡観察、XRF 分析装置と CHN 分析装置による全岩化学組成分析、比重計による密度測定、EDS 分析装置による鉱物化学組成分析、顕微ラマン分光分析計による流体包有物の同定を行った。

(3) 結果解析：得られたデータをもとに物質移動解析を行い、反応の進行に伴う流体相と固相の体積変化および間隙水圧変化を推定した。解析にはアイソコン法 (Grant, 1986; Baumgartner and Olsen, 1995) を用いた。その概要を以下に示す。

- ・ 露頭から反応進行度が異なる試料を連続的に採集し、全岩化学組成 C_i^A , C_i^0 と密度 ρ^A , ρ^0 を測定する (A は交代作用を受けた試料、0 は交代作用が最も弱い試料を表す)。
- ・ 全岩化学組成のアイソコン解析を行い、系の固定成分 j と移動成分 i を判別する。
- ・ 初期体積 V_s^0 の岩石について、交代作用による固相の体積変化 ΔV_s を次式から算出する。

$$\frac{\Delta V_s}{V_s^0} = \frac{V_s^A - V_s^0}{V_s^0} = \frac{C_j^0 \rho^0}{C_j^A \rho^A} - 1$$

- ・ 交代作用による流体 k の質量変化 ΔM_k および体積変化 ΔV_k を次式から算出する。

$$\frac{\Delta M_k}{V_s^0} = \left(\frac{C_j^0}{C_j^A} \cdot C_k^A - C_k^0 \right) \cdot \rho^0$$

および

$$\frac{\Delta V_k}{V_s^0} = \frac{\Delta M_k}{V_s^0} \frac{(\bar{V}_k)_{PT}}{m_k}$$

m_k は流体 k の分子量、 $(\bar{V}_k)_{PT}$ は圧力 P 温度 T における流体 k のモル体積を表す。

- ・ 以上の結果から MRK 状態方程式を用いて間隙水圧の変化を推定する。これを反応進行度の異なる試料について繰り返し、速度論的解釈を与える。

4. 研究成果

(1) 長崎変成岩類の蛇紋岩メランジに見られる主な交代作用は次のとおりである。

- ① テクトニックブロック周縁部の曹長岩化
- ② テクトニックブロック周縁部の反応帯と鉱物脈
- ③ テクトニックブロック内部の片理や裂罅に沿った曹長岩化
- ④ 超苦鉄質メランジマトリックスの曹長岩化および緑簾石化
- ⑤ 蛇紋岩中のロジン岩脈

このうち①～③が反応と変形の連結現象とみられ、解析の対象となった。

(2) 泥質片岩ブロック周縁部の曹長岩化 (西彼杵)：①の1例である。超塩基性メランジマトリックスと接する部分に厚さ数 cm の曹長岩化帯が見られる。曹長岩化帯では、炭質



図1. 泥質片岩ブロック周縁部の曹長岩化。

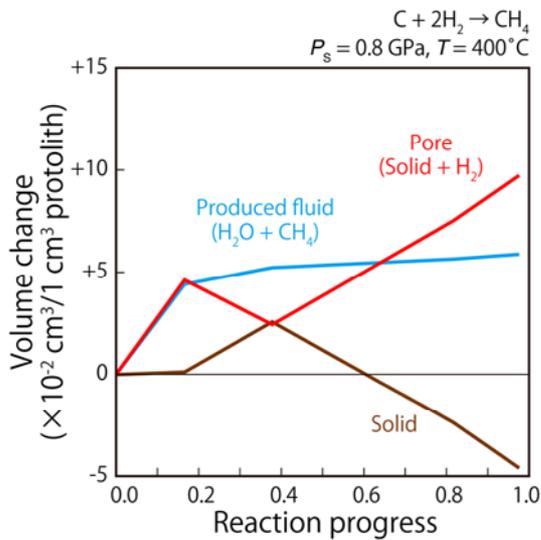


図2. 反応の進行に伴う流体相および固相の体積変化。

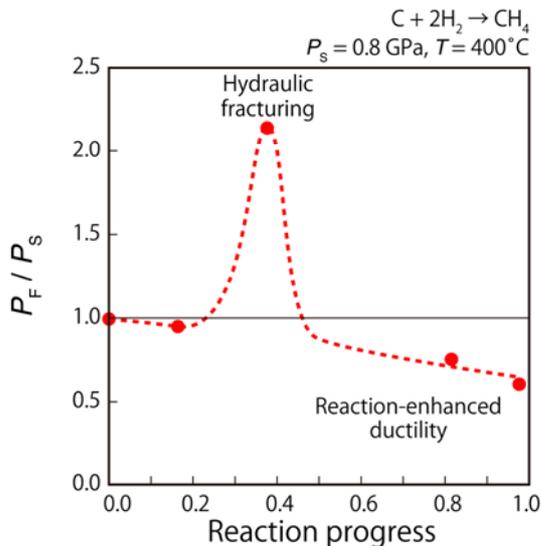


図3. 反応の進行に伴う間隙水圧の変化。

物の消失、白雲母および石英の減少、曹長石の増加が生じている。露頭では目立った変形構造は認められない。しかし、顕微鏡下では

多数のマイクロクラックに沿って H_2O や CH_4 の流体包有物が見られる。アイコン解析の結果、反応に伴って固相の体積が約10%減少したと推定される。反応の初期では流体生成が卓越し、間隙水圧の上昇によりマイクロクラックが形成されたと考えられる。ところが反応の後期になると固相の体積減少が卓越し、間隙水圧が急激に下がったと考えられる。この事例では、素反応の速度論的關係により変形様式が水圧破砕から反応促進型延性変形へと遷移する複雑な過程が読み取れる。

(3) 翡翠輝石岩ブロック周縁部の曹長岩化（西彼杵）：①の1例である。翡翠輝石岩は石英包有物を多量に含む翡翠輝石からなり、周辺の片岩類（曹長石を含む）に比べ高压の鉱物共生を保持している。周縁部の曹長岩化帯は上昇時に形成されたと考えられる。アイコン解析の結果、この反応に伴って固相の体積が約10%増加したと推定される。これにより曹長岩化帯では空隙が失われ、翡翠輝石岩がメランジマトリックス中の流体相から遮断された可能性がある。このことは、翡翠輝石岩が高压の鉱物共生を保持することに貢献したかもしれない。



図4. 翡翠輝石岩ブロック周縁部の曹長岩化

(4) 蛇紋岩ブロック周縁部の反応帯と炭酸塩鉱物脈（西彼杵）：②の例である。蛇紋岩ブロックと泥質片岩ホストの間に滑石+炭酸塩鉱物層、炭酸塩鉱物+石英層、緑泥石層、白雲母層、曹長石層からなる反応帯が見られ、その反応前面付近から蛇紋岩および泥質片岩に向かって炭酸塩鉱物脈が伸びている。アイコン解析の結果、蛇紋岩-滑石層境界では流体相および固相の体積増加が推定され、間隙水圧が上昇して水圧破砕を生じたと考えられる。このことは炭酸塩鉱物脈の産状をよく説明する。一方、泥質片岩-曹長石層境界では固相の体積減少（約10%）が卓越し、間隙水圧が下がったと考えられる。こちらは炭酸塩鉱物脈の産状と矛盾した結果である。その理由は、現在のところよく分かっていない。

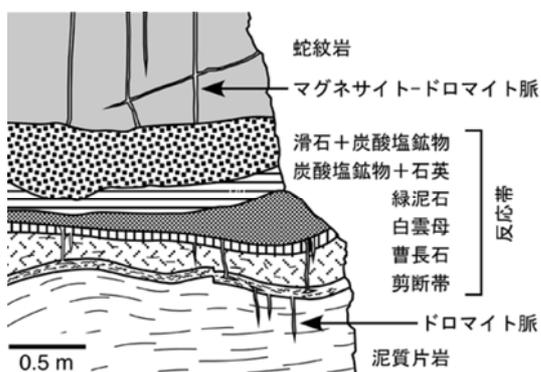


図5. 蛇紋岩ブロック周縁部の反応帯と炭酸塩鉱物脈の産状。

(5) 泥質片岩ブロック内部の片理や裂罅に沿った曹長岩化(野母): ③の例である。小規模な曹長岩化帯では、中央に裂罅の痕跡が見られ、泥質片岩との境界は漸移的である。中規模なものでは、中央に強く曹長岩化した部分があり、その外側に漸移的な部分が見られる。大規模なものでは、全体が強く曹長岩化しており、泥質片岩との境界は明瞭である。このような産状から、この曹長岩化は片理や裂罅に沿った流体相の浸透を原因とすると考えられる。アイソコン解析の結果は、反応に伴う固相の体積減少を示した。特に強く曹長岩化した部分では約23%もの体積減少が推定される(漸移的な部分での体積減少は数%)。流体生成は少なく、間隙水圧は急激に下がったと考えられる。このことは、このタイプの曹長岩化が反応促進型延性変形を引き起こす可能性があり、かつ自己促進的な現象であることを示している。



図6. 泥質片岩ブロック内部の片理や裂罅に沿った曹長岩化。写真は中規模なもの。

(6) 以上のような事例研究から、蛇紋岩メランジに見られる交代作用には反応と変形の連結現象が複数あることが明らかになった。それらは、反応速度論と間隙水圧変化の視点から3つのタイプに分類される。すなわち、(A) 流体相の体積増加が卓越して間隙水圧が上がる「水圧破碎タイプ」、(B) 固相の体積減少が卓越して間隙水圧が下がる「反応促進型延性変形タイプ」、(C) 固相の体積増加が卓越する「目詰まりタイプ」である。西彼杵

地域で見られる泥質片岩ブロック周縁部の曹長岩化のように、一連の過程の中でタイプ遷移を起こす場合も確認された。このように反応と変形の連結現象は想像以上に複雑なもので、本研究完了時における理論的説明はまだ難しい状況である、しかし、天然の事例に対して反応の進行に伴う流体相と固相の体積変化や間隙水圧変化を推定する方法が構築され、その有効性が示されたこと、連結現象の基本的なタイプが示されたことは、本研究における大きな成果と言えるだろう。

<引用文献>

- Baumgartner, L. P., Olsen, S. N. (1995) A least-squares approach to mass transport calculations using the Isocon method. *Economic Geology*, 90, 1261-1270.
- Grant, J. A. (1986) The Isocon diagram-A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81, 1976-1982.
- Nishiyama, T. (1989) Kinetics of hydrofracturing and metamorphic veining. *Geology*, 17, 1068-1071.
- 西山忠男 (1989) 西彼杵半島長崎変成岩類の岩石学的研究: とくに緑色岩複合岩体と反応促進型延性変形について. *地質学論集*, 33, 237-257.

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7件)

- (1) Mori, Y., Shigeno, M., Nishiyama, T., Fluid-metapelite interaction in an ultramafic mélange: implications for mass transfer along the slab-mantle interface in subduction zones, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 2014
DOI: 10.1186/1880-5981-66-47
- (2) Kouketsu, Y., Nishiyama, T., Ikeda, T., Enami, M., Evaluation of residual pressure in an inclusion-host system using negative frequency shift of quartz Raman spectra, *American Mineralogist*, 査読有, Vol. 99, 2014, 433-442
DOI: 10.2138/am.2014.4427
- (3) Miyazaki, K., Ikeda, T., Arima, K., Fukuyama, M., Maki, K., Yui, T.-F., Grove, M., Pressure-temperature structure of a mylonitized metamorphic pile, and the role of advection of the lower crust, *Nagasaki Metamorphic Complex, Kyushu, Japan. Lithos*, 査読有, Vol. 162-163, 2013, 14-26

DOI: 10.1016/j.lithos.2012.12.017

- (4) Shigeno, M., Mori, Y., Shimada, K., Nishiyama, T., Origin of omphacitites from the Nishisonogi metamorphic rocks, western Kyushu, Japan: comparison with jadeites, *European Journal of Mineralogy*, 査読有, Vol. 24, 2012, 247-263

DOI: 10.1127/0935-1221/2012/0024-2198

- (5) Shigeno, M., Mori, Y., Shimada, K., Nishiyama, T., Jadeitites with metasomatic zoning from the Nishisonogi metamorphic rocks, western Japan: fluid-tectonic block interaction during exhumation. *European Journal of Mineralogy*, 査読有, Vol. 24, 2012, 289-311

DOI: 10.1127/0935-1221/2012/0024-2195

- (6) Miyazoe, T., Enami, M., Nishiyama, T., Mori, Y., Retrograde strontium metasomatism in serpentinite mé lange of the Kurosegawa Zone in central Kyushu, Japan. *Mineralogical Magazine*, 査読有, Vol. 76, 2012, 635-647

DOI: 10.1180/minmag.2012.076.3.14

- (7) 北野一平、池田剛、朝倉地域に産する周防変成岩類の接触変成作用の温度圧力条件：上昇過程の制約、*地質学雑誌*、査読有、Vol. 118、2012、801-809

DOI: 10.5575/geosoc.2012.0066

[学会発表] (計32件)

- (1) Mori, Y., Shigeno, M., Kawamoto, T., Nishiyama, T., Saline fluid inclusions in jadeitites from southwest Japan: Records of slab-derived fluid composition in subduction-zone channels, *International Eclogite Conference*, 2015

- (2) 西山忠男、吉田知里、森康、重野未来、不可逆反応と変形の連結現象：ロジン岩-蛇紋岩系における水圧破砕の事例、*地球惑星科学連合大会*、2015

- (3) 森康、重野未来、西山忠男、超塩基性メランジにおける流体-岩石相互作用と浸透率変化：野母変成岩類に見られる例、*日本地質学会*、2014

- (4) 重野未来、森康、川本竜彦、西山忠男、西南日本の蛇紋岩メランジ中のヒスイ輝石岩に記録された塩水、*日本地質学会*、2014

- (5) 島田麻美、池田剛、東南極リュツォ・ホルム

岩体オングル島のザクロ石周囲にみられるコロナの微細構造、*日本地質学会*、2014

- (6) 山崎由貴子、池田剛、本吉洋一、廣井美邦、Prame, B.、スリランカに産するarrested チャーノソカイト形成に伴う局所的な元素拡散、*日本地質学会*、2014

- (7) 池田剛、ザクロ石の拡散累帯構造から求めた東南極リュツォ・ホルム岩体の冷却速度、*日本地質学会*、2014

- (8) 西山忠男、中村怜美、浦田健作、接触変成帯における流体活動と周期的鉱物沈殿、*日本鉱物科学会*、2014

- (9) 森康、重野未来、川本竜彦、西山忠男、西南日本の沈み込み帯メランジ中のヒスイ輝石岩に記録された塩水、*地球惑星科学連合大会*、2014

- (10) 西山忠男、森部陽介、石丸聡子、荒井章司・森康、重野未来、沈み込み起源の超高压クロミタイト：西彼杵変成岩の例、*地球惑星科学連合大会*、2014

- (11) 島田麻美、池田剛、東南極リュツォ・ホルム岩体オングル島に産するコロナの形成反応、*地球惑星科学連合大会*、2014

- (12) 山崎由貴子、池田剛、本吉洋一、廣井美邦、Prame, B.、スリランカのarrested チャーノソカイト形成時のモード組成の時間変化、*地球惑星科学連合大会*、2014

- (13) 池田剛、鉱物分解反応による拡散累帯構造形成の時間スケール、*地球惑星科学連合大会*、2014

- (14) Nishiyama, T., Moribe, Y., Ishimaru, S., Arai, S., Mori, Y., Shigeno, M., Subduction origin for UHP chromitite from the Nishisonogi metamorphic rocks, western Kyushu, Japan, *JpGU Annual Meeting*, 2014

- (15) Nishiyama, T., Shiosaki, D., Eguchi, H., Yoshiasa, A., Microdiamond-bearing chromitite from the Higo metamorphic rocks, Central Kyushu, Japan, *JpGU Annual Meeting*, 2014

- (16) 森康、重野未来、西山忠男、交代作用の進行に伴う変形メカニズムの遷移：西彼杵変成岩類の超塩基性メランジに見られる例、*日本鉱物科学会*、2013

- (17) Yamasaki, Y., Ikeda, T., Strain analysis of plagioclase spot in basic

schists of Sangun Metamorphic Belt in northern Kyushu, Japan, AGU Fall Meeting, 2013

(18) Kouketsu, Y., Enami, M., Nishiyama, T., Ikeda, T., Kagi, H., Investigation of residual pressure of quartz inclusion in garnet host, International Eclogite Conference, 2013

(19) 島田麻美、池田剛、東南極リュツォ・ホルム岩体オングル島のザクロ石角閃岩中にみられるコロナの微細構造、日本地質学会、2013

(20) 山崎由貴子、池田剛、本吉洋一、廣井美邦、Prame, B.、スリランカ中央部に産する"arrested"チャーノッカイト中に含まれるアパタイトの組成累帯構造、日本地質学会、2013

(21) 池田剛、宮崎一博、九州西部天草高浜変成岩類上部ユニットのマイロナイトの内部構造、日本地質学会、2013

(22) 島田麻美、池田剛、東南極リュツォホルム岩体のザクロ石角閃岩にみられるコロナの微細構造、地球惑星科学連合大会、2013

(23) 山崎由貴子、池田剛、本吉洋一、廣井美邦、Prame, B.、スリランカの arrested チャーノッカイト形成に伴う有色鉱物のモード変化、地球惑星科学連合大会、2013

(24) 菅原雄、池田剛、低圧型変成帯の広域温度上昇マップ：山口県東部領家帯を例にして、地球惑星科学連合大会、2013

(25) 瀨瀬佑衣、西山忠男、池田剛、榎並正樹、弾性モデルを用いた石英ラマン圧力計の較正：ざくろ石中の石英が保持する残留圧力の評価、日本鉱物科学会、2012

(26) 宮崎一博、福山繭子、池田剛、有馬和宏、牧賢志、下部地殻部深度での部分熔融：長崎変成岩類の例、日本地質学会、2012

(27) 山崎由貴子、池田剛、スリランカ中央部に産する"arrested"チャーノッカイトの内部組織、日本地質学会、2012

(28) 池田剛、連続反応によるコロナ構造形成の定性的モデル、日本地質学会、2012

(29) 山崎由貴子、池田剛、変成条件が局所的に異なる岩石間の変成反応の推定、地球惑星科学連合大会、2012

(30) 菅原雄、池田剛、低圧型変成帯における温度圧力構造：山口県東部領家帯を例にして、地球惑星科学連合大会、2012

(31) 瀨瀬佑衣、榎並正樹、池田剛、負の残留圧力を保持するざくろ石中の石英：石英ラマン圧力計の高温変成岩への適用、地球惑星科学連合大会、2012

(32) 池田剛、変成岩の反応縁に保存された組成勾配の成因、地球惑星科学連合大会、2012

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 康 (MORI, Yasushi)

北九州市立自然史・歴史博物館・自然史課・学芸員

研究者番号：20359475

(2) 研究分担者

西山 忠男 (NISHIYAMA Tadao)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：10156127

池田 剛 (IKEDA Takeshi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40243852

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

重野 未来 (SHIGENO Miki)