観測的変成岩科学の建設

鳥 海 光 弘*

Foundations of the Observational Metamorphic Sciences

Mitsuhiro TORIUMI *

Abstract

Modern metamorphic petrology has founded by Eskora and Goldschmidt in the 1930s, and their basic idea was that the metamorphic facies represent the range of pressure, and the temperature and mineral facies show the compositional space regions. Later, during the 1950s to 1960s the Korzinskii, Thompson and Miyashiro applied solid thermodynamics to metamorphic phase equilibria. Miyashiro presented the new concept of facies - series in a geologic framework.

Recent progress in metamorphic petrology has concentrated on methods and applications of exact pressure-temperature paths using differential thermodynamics. This new method of quantitative metamorphic petrology was established by Spear in 1980s. The precise P-T paths of subduction related metamorphic rocks make it possible to discuss the detailed process of subduction. Furthermore, important progress in seismic studies using seismic reflection and refraction methods in the plate boundary regions combines quantitative metamorphic petrology and seismic structure surveys with materials science in the Earth's interior as proposed by Peacock, and Seno and coworkers in the late 1990s. Along the line of the observational but not conceptual metamorphic sciences, the comprehensive field of geosciences focus on the foundations of Observational Metamorphic Sciences including geophysical prospecting, precise metamorphic petrology, and materials sciences of the Earth's interior.

Key words : metamorphic petrology, precise P-T path, seismic structure analysis, observational metamorphic petrology, plate boundary

キーワード：変成岩岩石学，精密温度・圧力径路，地震波構造解析，観測的変成岩岩石学，プレート境界

近代的な変成作用の概念は 1920 年代にエスコラやゴールドシュミットらがほぼ完成させたものであり，その基本は温度と圧力を変数とする空間上での変成相とそれに対応する岩石の組成空間上

での鉱物相という概念であった。その後，1950 年代から 1960 年代にかけて，コルジンスキーやトンプソン，都城らによって固体の熱力学にもとづいた相平衡岩石学として大いに成功をみた分野で

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科 / 海洋科学技術研究機構，固体地球進化研究センター

* Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo and IFREE, Japan Marine Science Research and Developing Organization

ある(都城, 1965 参照)。このような背景には、地球現象としての変成作用の一般性を温度・圧力構造の中で捉えたことにある(Miyashiro, 1961)。変成作用の研究は地球物質の一般性を研究する手法である相平衡岩石学として確立されてきたにも関わらず、プレート運動のダイナミックス研究の中では定性的な議論はできて定量的な議論への貢献は果たせてこなかった。それは熱力学的岩石学は本来きわめて定量的なものであるが、地球の岩石、とくに様々な変成岩の鉱物共生のシステムティクスの説明、つまりどれが化学平衡であるか、鉱物組み合わせの一般性を示す鉱物相はどの様であるかという岩石学の内部からの論理的なニーズに対応した研究に関心が向けられたためであろう。1984 年に始まった超高压変成岩の研究は(Chopin, 1984)、この研究テーマのおおきな転換を促すものであったが、その基本的な問題である、精度の高い定量的な岩石の温度・圧力及び変形経路、さらには最近では脱水、吸水量の時間的変化をどのように求めるかという命題については最近まで待たねばならなかった。それは熱力学的量の決定も含めて、天然系における鉱物の化学組成などから温度、圧力、反応量、そして物質の移動量などの逐次変化を逆問題として解く方法が必要であったからである。この大きな貢献は 1990 年代に入って Spear や Holland らによってなされた(Spear, 1993; Holland and Powell, 1998)。

ところで、1984 年の超高压変成岩の発見は岩石学者が考える変成作用の範囲を劇的に拡大した。それは従来は高々 1 GPa 程度までしか地殻の岩石や海溝で堆積した堆積物が沈み込むことはなろうと考えられていたのが、コーサイトやダイヤモンドが安定な 3 GPa を超える圧力まで達していることが明らかとなり、変成作用の圧力の上限が一気に 3 倍に伸びたからである。最近ではさらに 10 GPa を超える条件で変成された岩石が、大陸衝突に伴う大規模な広域変成帯である、中圧型変成帯と呼ばれていた地域から見いだされている。このような変成帯が地表に存在すること自体、H₂O を含む地球表層の物質がコア-マントル境界などのマントル深部へ戻されるという大規模な物

質循環という意味で第一級の問題であるとともに、沈み込むプレートに随伴して沈み込んだ変成岩が、100 km 以上上昇する過程であり、それはプレート境界における力学的結合が大きく変化したということの意味し、プレート運動のダイナミックスにとってきわめて重要な問題を提起している。

変成岩研究で 100 年来の問題は、どのように沈み込んだのかという問題と、なぜ変成帯が上昇し得たかという問題であった。その基本的な原因は重力に求められるにしても、上昇する過程の記録をどう読みとるかは、観測可能な物理量からどのように逆問題を解くか、ということにかかっている。すでに述べたように、造岩鉱物とくにざくろ石と角閃石の結晶成長に伴う化学組成変化からは温度・圧力経路がそれぞれの成長過程に対応して求められる。こうした鉱物の成長過程の記録には確かに変成岩の沈み込む過程の記録が含まれているに違いない。したがってどのようにそれらを読み解くかが重要である。

本特集号ではこのような視点から最近著しい進展のあった変成岩の温度・圧力履歴の解読についての問題を紹介する。この中には 3 つの方法が示されている。一つはジルコンやざくろ石結晶に包み込まれている鉱物の熱力学的解析からその鉱物包有物が取り込まれた時期の温度・圧力の変化を決定する方法であり(Katayama *et al.*, 2000)、2 番目は岩石に含まれている鉱物の化学組成を用いてすべての鉱物の間の化学反応の平衡条件を求め、化学組成から温度・圧力履歴を決定する方法である(Spear, 1993)。3 番目はギブズ法もしくは微分熱力学法とも呼ばれ、すべての化学平衡式を微分形を用いて線形化して、観測量としての鉱物の化学組成変化から、温度と圧力の変分を逆問題として解くものである(Okamoto and Toriumi, 2001; Inui and Toriumi, 2002)。いずれも一つの鉱物粒子の成長に伴う化学組成変化と、その中に粒子として包み込まれている鉱物包有物の化学組成から温度・圧力経路を求めることが可能であり、それぞれの方法は独立しているので、それらによる温度・圧力の経路について互いに検証しうる。そのため、本特集号にあるように、三

波川変成岩において、いずれの方法でも一致した温度・圧力経路を示したことは、過去の解釈を中心とした議論とは異なり、はじめて確固とした温度・圧力経路が推定されたという意味と、方法として従来とは比較にならないほど精度の高いものであるという意味において、重要な変成岩研究の転機なのである。

問題はこれらにとどまらないだろう。ひとつには生成される鉱物の体積変化の履歴 (Toriumi and Inui, 2001) とその変成岩の方向による変化、すなわち成長の異方性が観測量であることである。もう一つは放射性同位体年代、もしくは年代差が温度・圧力経路とともに測定可能であることである。むろん技術的な解決すべき問題があるだろう。しかし、実際すでに角閃石やざくろ石では測定例もある。また、片山らが試みたように、ジルコン中に多数の変成作用で形成した鉱物が包み込まれていて、それらから決定される温度・圧力とその周辺で決定されるジルコンの放射年代を決定することによって温度・圧力経路とその時間尺度を同時に決定できるのである (Katayama *et al.*, 2000)。

こうした方法的にまったく新しい展開によって、プレート境界域における、地球熱学的、地震学的、そして測地学的な精度の高い観測結果との対比もようやく可能となりつつある (Peacock and Wan, 1999; Kasahara *et al.*, 2001, Hacker *et al.*, 2003, Seno and Yamasaki, 2003)。最近の精密なマルチチャンネル反射法探査と、それを束縛条件として精度を高めた屈折法による構造探査、そして、トモグラフ法を用いて決められた沈み込みプレート境界付近の構造がどのような岩石学的、または物質科学的な状態であるのかを特定することが可能となりつつある (Kodaira *et al.*, 2004)。すでに瀬野ら、笠原らは最近の一連の革新的な研究の中で、境界型地震で観測されるアスペリティとその分布、その周辺の相似地震や非地震性すべりの分布、および地震波反射面の分布などが強く関係していることを明らかにした (Kasahara *et al.*, 2001; Seno and Yamasaki 2003)。

最近になって三浦らや小平らは、沈み込むプ

レート境界部分の岩石またはその物質状態の変化について、精密な探査を行い沈み込むプレート上面とその上部に明白な地震波反射帯が存在し、その厚さはほぼ2 km程度であることをあきらかにしている (Miura *et al.*, 2003; Kodaira *et al.*, 2004)。この地震波反射帯とスラブ上面とに挟まれた岩石はVp/Vsの増加から水などの流体相を含む岩石と考えられ、そしてそれが海溝付近のデコルマ帯に連続していることから、沈み込んでいる付加体または削られた島弧地殻であろうと推定される。それらの岩石は浅いところから40 km程度まで沈み込むのであるから、温度・圧力変化を経験しており、当然それは変成岩であると考えざるを得ない。これが鳥海らがいう境界変成岩の現在のプレート境界における実体なのである (Toriumi and Inui, 2001)。

このように、観測される境界変成岩はどのようなものなのかを定量的にモデル化し、地球物理学的探査の観測量としてどのようなものが予測されるかが議論の俎上に上る。最近、武井はVp, Vs, およびそれらの比が変成岩の中に含まれる相としての水などの流体の体積比やその存在形態との関係を理論的に求めている (Takei, 2000)。さらに境界変成岩がどのように脱水・排水し、沈み込むスラブ内部から吸水するか、それらの過程がプレート間の力学結合をどう変化させるかといった、境界変成岩のダイナミックスの理解に対して、地震探査、地震波、岩石破壊、摩擦、変形実験、電磁気探査、変成岩の逆解析、プレート内またはプレート間応力解析、水などの流体移動、流体の存在様式、移動様式、そしてマクロスコピックな流体と岩石部分の運動などの研究が相補的となったのである (Omori *et al.*, 2002; Seno and Yamasaki, 2003; Kodaira *et al.*, 2004)。このことは沈み込むプレート境界部分の研究が総合的な観測的変成岩科学として再編成されたことを意味する。

本特集号では、観測的変成岩科学という総合的科学的枠組みの中で、とくに岩石学的な研究手法の新しい展開について紹介している。ここでは従来の定性的な温度・圧力経路から定量的で誤差も

含めて検討可能な温度・圧力・変形・時間経路の推定方法とその結果が紹介されている。これらの研究成果が他の地球物理学的な研究成果や地球化学的な研究成果とは独立なものであり、このためそれらの成果を相互に比較することによって、今後あたらしいプレート境界の実像とモデルが浮かび上がると期待される。この特集はその第一歩であると考えている。

文 献

- 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.
- Hacker, B.R., Peacock, S.M., Abers, G.A. and Holloway, S.D. (2003): Subduction factory-2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. Geophys. Res.*, **108**(B1), doi: 10.1029/2001JB00129.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (1998): An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Petrol.*, **16**, 309–343.
- Inui, M. and Toriumi, M. (2002): Prograde pressure-temperature paths in the pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan. *J. Metamorphic Geol.*, **20**, 563–580.
- Kasahara, J., Kamimura, A., Fujie, G. and Hino, R. (2001): Influence of water on earthquake generation along subduction zones. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 291–303.
- Katayama, I., Zayachikovskiy, A.A. and Maruyama, S. (2000): Prograde P-T records from inclusions in zircons from UHP-HP rocks of the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, **9**, 417–427.
- Kodaira, S., Hidaka, T., Kato, A., Park, J.-D., Iwasaki, T. and Kaneda, Y. (2004): High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai trough. *Science*, **28**, May, 1295–1298.
- Miura, S., Kodaira S., Nakanishi, A., Tsuru, T., Takahashi, N., Hirata, N. and Kaneda, Y. (2003): Structural characteristics controlling the seismicity of southern Japan Trench fore-arc region, revealed by ocean bottom seismographic data. *Tectonophysics*, **363**, 79–102.
- Miyashiro, A. (1961): Evolution of metamorphic belts. *J. Petrol.*, **2**, 277–311.
- 都城秋穂 (1965): 変成岩と変成帯. 岩波書店.
- Okamoto, A. and Toriumi, M. (2001): P-T paths of amphiboles by Gibbs method. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **141**, 168–181.
- Omori, S., Kamiya, S., Maruyama, S. and Dapeng, Z. (2002): Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 455–478.
- Peacock, S.M. and Wang, K. (1999): Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937–939.
- Seno, T. and Yamasaki, T. (2003): Low-frequency tremors, intraslab and interplate earthquakes in Southwest Japan – From a viewpoint of slab dehydration. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 22, 2171, doi:10.1029/2003GL018349
- Spear, F.S. (1993): Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature – Time paths. *Mineral. Soc. Amer. Monograph*, 547–639.
- Takei, Y. (2000): Acoustic properties of partially molten media studied on a simple binary system under a controllable dihedral angle. *J. Geophys. Res.*, **105**, 16665–16682.
- Toriumi, M. and Inui, M. (2001): Pressure-temperature-water production rate paths in the subduction metamorphism. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 367–376,

(2004年7月26日受付, 2004年8月18日受理)