ペリドタイトの高压下での融解実験

—玄武岩マグマからペリドタイトの起源まで—

高 橋 栄 一*

Melting Experiment on Peridotite at High Pressure:
from Basalt Magma Genesis to Origin of Peridotite

Eiichi TAKAHASHI

I. はじめに

地球の上部マントルは、カンラン石を主成分とし斜方輝石、単斜輝石、クロムスピネル（又はガーネット）などを含む一群の岩石（ここでは一括してペリドタイトと呼ぶ）から構成されている。ペリドタイトは高压変成岩と相伴って造山帯の中軸部に構造貫入したり（アルプス型貫入岩体）、海洋底を構成する玄武岩及びチャート、石灰岩などと伴って産する（オフィオライト）、或はアルカリ玄武岩やキンバーライトの活動に伴って捕獲岩として産出する。これらの産出状況の多様さにもかかわらず、またその産出地域が各大陸と海洋地域にまたがるものの、これらのペリドタイトの鉱物組成や、化学組成は互いに極めて良く似ている（KUNO and AOKI 1970；青木 1978）。地震学、及び高温高压下での相平衡実験によれば、地球のマントルは（下部マントルも含めて）全体としてペリドタイトの化学組成を持つと考えることができる（RINGWOOD 1975）。

筆者はペリドタイトの高压下での融解実験を行い、中央海嶺などに産する玄武岩マグマの生成条件、及び地球のマントルを構成するペリドタイトそのものの起源について考察した。

II. 玄武岩マグマの起源

上部マントルが主としてペリドタイトから構成されているとするならば、中央海嶺、海洋島、島

弧、大陸など広範な地球上に出現する玄武岩マグマはペリドタイトの部分融解により生成すると予想される。過去20年の実験岩石学の歴史を振り返って見ると、この問題に関する研究の占める割合が群を抜いて多いことが判る（久城 1976；高橋 1986）。1960年代にピストンシリンダーを始めとする高温高压実験装置が実用化されると、玄武岩やペリドタイト、又はそれらのアナログ物質に関する融解実験が世界中で開始された。その結果、①玄武岩マグマはペリドタイトの高压下（1～3 GPa、又は10～30kbar、偶然にもこれはピストンシリンダー装置のカバーする圧力領域と一致していた）での部分融解液として生成すること、②ペリドタイトのソリダス付近で生成する液の化学組成は圧力の上昇と伴にカンラン石成分に富み且つノルム石英に不飽和な領域へと変化していくこと、などが解明された。

EPMA 装置を用いて、実験産物の化学組成が決められ、ペリドタイトのソリダス近傍で生じた液（実際には急冷相として生じたガラス）の組成も報告された（KUSHIRO *et al.* 1972；MYSEN and KUSHIRO 1977）。しかしながら、これらのガラスの化学組成は、急冷時（高々 1/10～1/2 秒間）の結晶作用の影響を蒙って元の組成から大きく外れていることがその後の研究で判明した（JAQUES and GREEN 1979）。そこで筆者は久城と共同で、ペリドタイトの部分融解液組成を正確に求める為の実験を、1980年から81年にかけて

* 岡山大学地球内部研究センター Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

第1図 (玄武岩/ペリドタイト) サンドウィッチ実験法を用いて決定したペリドタイト (HK 66) の部分融解液の化学組成 (TAKAHASHI and KUSHIRO 1983). 液のノルム組成を WALKER *et al.* (1979) の方法で投影したもの。ペリドタイトの部分融解液は圧力の上昇と共にノルム ol に富む方向へ移動していくことが判る。

カーネギー研究所 (Geophysical Laboratory) で行った。

急冷時の結晶化作用によって化学組成の乱されていない領域を確保するためには、最低でも直径数10 μ m 以上の液の集積部をペリドタイト内部に作らねばならない。我々はメルトとなるべき物質 (玄武岩の粉) を予めペリドタイトにサンドウィッチ状に挟むことによりこれを実現した。ペリドタイトのソリダス以上の温度で長時間保持すると、ペリドタイトの粒界に生じた部分融解液とサンドウィッチ状に挟んだ玄武岩質の液が拡散により混合し均質化する。1300~1400°C の温度で数日保持した試料では混合が完全に起こり、挟みこんだ玄武岩質の液と部分融解したペリドタイトの間に化学平衡が成立していることを様々な方法で確認することができた (TAKAHASHI and KUSHIRO 1983)。

以上の手続きを経て求めたペリドタイト (HK 66) の部分融解液の化学組成を WALKER *et al.* (1979) の方法でノルム鉱物 ol-di-qz と ol-pl-qz の面にそれぞれ投影したものを第1図に示す。この投影で明らかな如く、ペリドタイトの部分融解により生ずる液はそれぞれの圧力毎にノルム空間内の単一面 (又は線) の上に集中している。これは液の化学組成がその圧力での ol+opx $\pm$ cpx の

cotectic boundary に支配されているためである。0.5GPa (深さ約15km に対応する) の圧力でペリドタイトが部分融解すると石英ソレイアイト質のマグマを生ずる。このようなマグマは、海嶺直下、又は地殻の薄い海洋性島弧、又は地殻に高温貫入したペリドタイトブロックの内部などで発生し得るであろう。より重要な発見は0.8~1 GPa 付近で生ずるペリドタイトの部分融解液が典型的な MORB の化学組成と等しいことがこの実験により初めて確認されたことである。

MORB の起源については、初生マグマであるとする説 (KUSHIRO 1973; PRESNALL *et al.* 1979) と、ピクライト質の初生マグマの分化物とする説 (O' HARA 1968; STOLPER 1980) に実験岩石学者の意見が別かれ永い間論争が続いた。しかし、最近のペリドタイトの融解実験 (第1図、及び FUJII and SCARFE 1985) や未分化 MORB を用いた相平衡実験 (FUJII and BOGAHLT 1983) により、MgO に富む (8~11 wt %) 未分化な MORB の生成条件はほぼ解明された。これらの MORB が最期にマントルと平衡共存した深さとその時の温度はそれぞれ約30 km と1250~1300°C である。MORB の平均化学組成は世界中の海嶺を通じてほぼ一定であるから、上の条件は海洋下のアセノスフィアの平均的

温度を代表していると見ることができる (McKENZIE and BICKLE 1988)。玄武岩マグマの起源に関する岩石学的研究から、上部マントルの不均質 (化学組成、温度など)、マントル対流のパターン、更にはマントルの地質時代を通じての進化の様子を探ることは今後の重要な研究課題である。

III. ペリドタイトの起源

最初に述べたように現在の地球の上部マントルはペリドタイト組成を持っている。深さ 400 km と 670 km に存在する地震波速度の急増はペリドタイトを構成する鉱物相の相変化として説明することができる (ITO and TAKAHASHI 1987a)。即ち、上部マントルのみでなく、下部マントルもペリドタイト組成であると考えても実験結果と矛盾しない。オーストラリア国立大学の RINGWOOD は一貫してそう主張している (RINGWOOD 1975)。もしマントルが全体としてペリドタイト組成を持っているとするならば、その起源はいかなるものであろうか。言い換えるなら、地球の進化のいかなる時期に、どのような道筋でマントルの化学組成が決定されたのであろうか。

一様で均質なマントルのモデル (Pyrolite model) を主張する RINGWOOD は、ペリドタイトの化学組成は地球の原料となった C1 コンドライト質の物質が、惑星形成時又は集積前に加熱されて蒸発変性を蒙った結果であると説明する (RINGWOOD 1979) ペリドタイトと C1 コンドライトを比較すると、前者は後者に較べて H_2O を始めとする揮発成分に著しく不足している。このことは蒸発変成作用説で良く説明可能である。しかしながら、ペリドタイトはコンドライトに較べて (同じ酸化還元状態で比較した時) カンラン石/輝石の比が高い。このことは地球のマントルが、隕石物質を直接の原料とした仮想的マントルより Mg/Si 比が高いことを意味している。従って蒸発変成作用説では、加熱時の最高温度は Si が部分的に蒸発する領域 (約 $1200 \sim 1300^\circ C$) に達したものと考えねばならない。

蒸発説にとって更に都合の悪い観察事実が存在する。それは、未分化なペリドタイトの全岩組成を調べると、その Ca/Al 比がコンドライト隕

石の値よりも系統的に $10 \sim 30\%$ 高い点である (PALME and NICKEL 1985)。 Ca も Al も代表的な難揮発成分であり、蒸発変成作用で始源物質に Ca/Al 比の変動は期待できそうにない。これらの元素が蒸発を開始する温度では Si , Fe などの主要元素のほとんどが散逸している筈である。又逆に、高温の宇宙ガスからの凝縮過程に於ても Ca/Al 比の変動は期待できない。従って地球のマントルがコンドライトに較べて高い Ca/Al 比を持つ理由は、以下に述べるようにマグマオーシャン内部での結晶分化など、地球形成後のマントル内又はマントルとコアの間の化学分別に求められねばならない。一方、蒸発説の信奉者は Ca/Al 比の異常を標本の代表性の問題 (ペリドタイトを収集・化学分析する研究者が、エメラルドグリーン色の単斜輝石に富む標本を無意識的に選別していると考える) として片付けようとしている (HART and ZINDLER 1986)。

最近、地球及び他の惑星の形成過程に関する各種のモデル計算が進行中である。形成過程の惑星表面温度は、惑星の形成速度と宇宙空間への熱の散逸速度のバランスにより決定される。後者は形成過程の惑星を包む原始大気の組成とその質量に大きく依存する。SASAKI and NAKAZAWA (1986) は地球の形成が原始太陽系星雲の内部で起きたと仮定した。この場合、形成中の地球表面からの熱の散逸は厚い星雲ガスに阻まれ、表面温度は容易に $2000^\circ K$ 程度に至る。従って惑星の原料物質 (コンドライト) は融解して金属相とシリケイトメルトに重力分化する。金属 ($Fe-Ni$) とシリケイトの分離が惑星規模で起こると、その解放する重力エネルギーは惑星を内部から暖め、ますます融解が進行する。結局、形成直後の原始地球はほぼ全面融解を呈する。ABE and MATSUI (1985) は地球型惑星の形成は星雲ガスの散逸後に起きたと仮定して同様な計算を行ったが、地球の原料となった物質に含まれている揮発成分 (特に H_2O) の保温効果により、やはり地表面付近が $2000^\circ K$ 付近まで温度上昇する結果を得ている。

従って、惑星形成に関するモデル計算からは、形成直後の原始地球は少なくとも厚さ $1000 km$ 位のマグマオーシャンに被われていたことが期待さ

れる。このことは、地球より遙かに小さな天体である月（従って惑星形成により解放されるエネルギーは桁違いに僅かである）が、その形成直後に大規模な溶融状態を経過し、アノソサイトからなる地殻（月殻）を形成したことからも類推される（Basaltic Volcanism Study Project 1981）。月のアノソサイトが40~44億年の形成年代を示すのに比較して、地球ではこの年代を持つ岩石は存在しない。古い年代を示す岩石が存在しない事実は、地球がこの時代には大規模な溶融状態にあり、放射年代の時計が次々リセットされていたと考えることを可能とする。

地球の形成過程を考察する上で鍵となる地層は上部マントル

のペリドタイト層である。地殻はその質量がマントルの1%にも足らず、しかも最近37億年の年齢を持つに過ぎないから、地球の形成過程を考察する上では無視できる。筆者らは以上の見通しに基いてペリドタイトの起源を探る為に超高压下での融解実験を行ってきた。

鳥取県の山あい、三朝温泉に位置する我々の研究センターは、1985年4月に岡山大学温泉研究所（坪井誠太郎先生が初代所長を勤められた）から改組転換された小規模な全国共同利用組織である。実験に用いた5000トンの加圧能力を持つ一軸加圧型分割球アンビル装置（USSA-5000）は伊藤英司により開発されたものである。超高压下でのマントル物質の相平衡に関する伊藤の一連の業績に対する国際的な評価は高く、同型の装置が米国、カナダ、オーストラリア、西独などに続々建設されつつある。

実験に用いた試料は、米国の Kilborne Hole 爆裂火口で採集した未分化スピネルペリドタイト（KLB-1）、及び南アフリカ産のシアードガーネットペリドタイト（PHN-1611）の二種類である（TAKAHASHI 1986）。KLB-1の14GPaまでの

第2図 未分化ペリドタイト（KLB-1）の14 GPaまでの融解実験結果（TAKAHASHI 1986）。ピストンシリンダー装置による実験は丸印、超高压発生装置（USSA-5000）による実験は角印で示めす。ペリドタイトのリキダス鉱物はこの実験領域では常にカンラン石であるが、より高压下ではメージャライト、次に MgSiO_3 ペロフスカイトに置き換えられる（ITO and TAKAHASHI 1987）。

圧力に於ける融解実験の結果を第2図に示めす。現在この実験は25GPa（深さ700kmに相当する）の圧力まで進行中である（ITO and TAKAHASHI 1987b）。実験の結果明らかとなった重要な点は、①ペリドタイトの融解温度幅（ソリダスとリキダスの温度差）は1気圧では約700°Cあるが、圧力の上昇に伴って減少し、15-20GPaでは200°C以下となる。②ペリドタイトのリキダスで晶出する鉱物は1気圧から17GPa付近までカンラン石であるが、17-20GPaの圧力範囲では変形スピネル（カンラン石の高压相）とメージャライト（輝石とガーネットの固溶体）がほぼ同時に晶出し、20-24GPaではメージャライト、25GPa以上の圧力ではペロフスカイト（エンスタタイトの高压相）がそれぞれ晶出する。

融解温度中の減少、及びリキダス相の変遷は、ペリドタイトの化学組成が超高压下で生成した eutectic melt に近いことを示めている。地球の原料物質として、C1コンドライト又はその蒸発変成を蒙った物質が考えられることを前に述べた。これらの物質はいずれにせよ高压下では、カンラン石、斜方輝石、ガーネットから構成され、

15-20GPa の圧力下では部分融解によってペリドタイト組成のマグマを形成することが上の実験結果から予想される。もし更に高い圧力で部分融解すれば、ペリドタイトより更に MgO に富み、SiO₂ に不足したマグマが生成されたであろう。

ペリドタイトが 15-20GPa の圧力で eutectic relation を示すことは地球の形成過程を考察する上でいかなる意味を持つのであろうか。現在の海嶺に於ける MORB マグマ形成のアナロジーを原始地球にまでさかのぼって適用すれば、形成して間もない地球の表面を、深部で形成したペリドタイト質の無数の溶岩流が被い尽したという考えが可能である。実際アーケアンには MORB とペリドタイトの中間の化学組成を持つコマチアイトが溶岩流として噴出している(Basaltic Volcanism Study Project 1981)。もし、惑星の形成過程に関する前述のモデル計算の結果が正しいならば、ペリドタイトは原始地球を被ったマグマオーシャンの化石であるかも知れない。ペリドタイトの示めす eutectic relation からは、マグマオーシャンの化学組成が深さ約500km での液と固相の化学反応に規定されていたことが推定される(OHTANI 1985)。

IV. おわりに

ペリドタイトの融解実験から現在の地球内部に関する考察、地球の形成過程に関する考察が可能であることが筆者の拙論で少しでも御理解いただけたならば幸いである。筆者はこれまで岩石スクールの中でも比較的地球物理に近い領域で研究活

動を行ってきた。特に、超高压下での相平衡実験は日本の地球物理学研究者の手で開発された手法であるから(秋本 1978) 最近 はなおさらである。地球物理学と岩石学(地質学)の境界領域で仕事を行っていると、伝統的な地質学の持つ束縛を時に強く感じることもある。

例えば、岩石の定義からして地球全体を扱う学問に向いていない。岩石は鉱物の集合体であるが、その鉱物とは天然に存在することが野外で確認された結晶体である。従って地球の下部マントルの主成分と予想されている MgSiO₃ ペロフスカイトなどは、将来隕石か隕石孔かでも発見されない限り鉱物とはなり得ないのである。超高压実験で地球深部の温度圧力を再現し、マントル深部やコアの相平衡をいかに精密に決定したとしても、それは現在の定義では岩石学とは呼べない。

以上の問題は単に定義の変更で片が付くことではない。より本質的な問題は地質学の研究手法が野外に於ける岩石の記載から出発するという点にある。天然に産出する岩石は、キンバーライトに含まれる捕獲岩でも高々200km 程度の深さに由来するに過ぎないから、記載に基く岩石学的手法で取り扱うことのできる領域は地球の極く表層に限られている。近年地球物理学的観測手法に基く地球内部構造の解明は飛躍的な勢いで進展しつつある(例えば3次元トモグラフィ)。直接試料を手にとって調べられない地球深部についても、妥当な推論に基く精密なモデル実験を行うことにより、物質科学的研究(拡張岩石学)を展開する余地が十分にあると私は思う。

引用文献

- ABE, Y. and MATSUI, T. (1985): The formation of an impact-generated H₂O atmosphere and its implications for the early thermal history of the Earth. *J. Geophys. Res.*, **90**, Sppl., C545-560.
- 秋本俊一 (1978): 超高压高温実験と地球深部物質. 岩波講座地球科学, **2**, 157-244.
- 青木謙一郎 (1978): 上部マントルの岩石学. 岩波講座地球科学, **3**, 41-92.
- Basaltic Volcanism Study Project (1981): *Basaltic Volcanism On the Terrestrial Planets*. Pergamon Press, 1286p.
- FUJII, T. and BOUGAULT, H. (1983): Melting relations of a magnesian abyssal tholeiites and the origin of MORBs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 283-295.
- and SCARFE, C. M. (1985): Composition of liquids coexisting with spinel lherzolite at 10 kbar and the genesis of MORBs. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **90**, 18-28.
- HART, S. R. and ZINDLER, A. (1986): In search of a bulk Earth composition. *Chem. Geol.*, **57**.

- 247-267.
- ITO, E. and TAKAHASHI, E. (1987a) : Ultrahigh-pressure phase transformations and the constitution of the deep mantle. in *High-Pressure Research in Mineral Physics.*, 221-229.
- and — (1987b) : Melting of Peridotite at Uppermost Lower-mantle Conditions. *Nature*, **328**, 514-517.
- JAIQUES, A. L. and GREEN, D. H. (1979) : Determination of liquid compositions in experimental, high pressure melting of peridotite. *Am. Mineral.*, **64**, 1312-1321.
- KUNO, H. and AOKI, K. (1970) : Chemistry of ultramafic nodules and their bearing on the origin of basic magmas. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **3**, 273-301.
- KUSHIRO, I. (1973) : Origin of Some magmas in oceanic and circum oceanic regions. *Tectonophysics*, **17**, 211-222.
- 久城育夫 (1976) : マグマの起源. 火山, 第2集, 20周年特集号, 259-266.
- KUSHIRO, I., SHIMIZU, N., NAKAMURA, Y. and AKIMOTO, S. (1972) : Compositors of Coexisting liquid and solid phases formed upon melting of a natural garnet and spinel lherzulites at high pressures: A preliminary report. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **14**, 19-25.
- MCKENZIE, D. and BICKLE, M. J. (1988) : The volume and compaction of melt generated by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, in press.
- MYSEN, B. O. and KUSHIRO, I. (1977) : Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. *Am. Mineral.*, **62**, 843-865.
- O'HARA, M. J. (1968) : Are ocean floor basalts primary magmas? *Nature*, **220**, 683-686.
- OHTANI, E. (1985) : The primordial terrestrial magma ocean and its implication for stratification of the mantle. *Phys. Earth Planet Inter.*, **38**, 70-80.
- PALME, H. and NICKEL, K. G. (1985) : Ca/Al ratio and composition of the Earth's upper mantle. *Geschim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2123-2132.
- PRESNALL, D. C., DIXON, J. R., O'DONELL, T. H. and DIXON, A. (1979) : Generation of mid-ocean ridge tholeiites, *J. Petrol.*, **20**, 3-35.
- RINGWOOD, A. E. (1975) : *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, 618p.
- (1979) : *Origin of the Earth and Moon*. Springer-Verlag., 295p.
- SAKAKI, S. and NAKAZAWA, K. (1986) : Metal-silicate fractionation in the growing earth: energy source for the terrestrial magma ocean. *J. Geophys. Res.*, **91**, 9231-9238.
- STOLPER, E. (1980) : A phase diagram for mid-ocean ridge basalts: preliminary results and implications for petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **74**, 13-27.
- 高橋栄一 (1986) : 玄武岩マグマの起源—高温高压実験の結果を踏まえて—. 火山, 第2集, 30周年特集号, S17-S40.
- TAKAHASHI, E. (1986) : Melting of a dry peridotite KLB-1 up to 14 GPa: Implications on the origin of peridotitic upper mantle. *J. Geophys. Res.*, **91**, 9367-9382.
- and KUSHIRO, I. (1983) : Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis. *Am. Mineral.*, **68**, 859-879.
- WALKER, D., SHIBATA, T. and DE LONG, S. E. (1979) : Abyssal tholeiites from the Oceanographer fracture zone. II, Phase equilibria and mixing. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 111-125.

(昭和63年4月5日受理)