高压下でのマグマの物性

藤 井 敏 嗣*

Physical Properties of Magmas at High Pressure

Toshitsugu FUJII

I. はじめに

マグマの物性、特に粘性、密度は火成活動を理解する上で重要なパラメータである。粘性はマグマの移動の容易さを規制し、また密度はマグマと固相（結晶）の相対的運動の容易さと方向との両方を規制する。したがって、マグマ溜りでの結晶分化作用にともなう斑晶の集積、マントル物質からのマグマの分離、移動といった火成活動のダイナミックな側面を理解するためにはマグマ物性の理解は不可欠である。特に、多くの火成活動は地下深部で起こる現象が主であるので、マグマ物性におよぼす圧力の影響を理解することが必要となる。

地球型惑星の進化—微惑星の衝突、集積による成長から現在にいたるまで—の過程において、惑星内部には大規模な溶融状態が存在したと考えられている（例えば、Toköz *et al.* 1978）。現在の地球にみられる層構造の形成にはこのような溶融状態での分化が大きな役割を果たしたはずであり、そのプロセスを理解するためにはマグマの高压での物性の理解が重要であることはいうまでもない。最近10年程の間に、この問題についての議論が多く行われるようになり、また高压でのデータがある程度手にはいるようになった。ここでは、高压下でのマグマの粘性、密度について概観し、現在の火成活動や地球進化の過程を理解する上でのこれらのパラメータの意義について述べる。

II. 粘性に及ぼす圧力の影響

KUSHIRO (1976) が高压実験により、jadeite や albite の組成を持つ珪酸塩メルトの粘性が圧力の増加と共に減少するという、当時の常識に反する事実を発見して以来、高压下でのマグマ物性が注目を集めるようになった（第1図）。この発見を契機として、珪酸塩メルトの構造とその圧力依存性が多くの研究者により研究されることになるが、ここでは立ち入らない。

マグマの粘性が圧力の増加にともない減少するならば、マグマの移動は高压になるほど容易になる。マントル物質の部分溶融で生じたマグマが集積し、固相から分離するプロセスも高压下では生じ易くなる可能性がある。KUSHIRO (1976) は少なくとも25kb まではマグマの粘性は減少を続けることを示したが、この傾向がさらに高压まで存続するかどうかは地球内部の化学組成の分布や構造を考える上で重要な問題である。もし、マグマの粘性の減少がさらに高压まで続くならば、マントル深部ではマグマの移動は非常に容易となり、マントル物質中の低融点成分の大部分はマグマによって地下深部から運びさらわれてしまい、その結果マントル内には化学組成の不均質性が生じる可能性もある。このような可能性の検討のためには、さらに高压でのマグマの粘性を知る必要がある。

FUJII *et al.* (1985), KANZAKI *et al.* (1987) はシンクロトロン放射光と高压装置とを利用して超高压下での粘性を測定するための新しい方法を考案した。この方法は精度が高く、将来有望であ

*東京大学地震研究所 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

るが特殊設備が必要であるので現状では手軽に測定するというわけにはいかない。このため、KANZAKI (1987) は KUSHIRO (1976) の方法を多段式超高压発生装置に応用し、albite 組成のメルトの粘性を80kb までの超高压下で測定した。彼の結果は、80kb までは粘性の減少が継続することを示している。しかしながら、このような圧力下でマントル物質の部分溶融で生じる液の組成はもちろん albite とは非常に異なっている。超高压下でマントル物質と共存できるような組成のマグマで粘性がどうなるかはまだ分かっていない。今後、マントルに存在し得るような組成のマグマについて粘性の圧力依存性を調べる必要がある。

III. 密度の圧力変化

粘性がマグマの移動の容易さを規制するのに対し、密度はマグマと固相の相対運動の方向と容易さを規制する重要なパラメータである。FUJII & KUSHIRO (1977) は KUSHIRO (1976) の方法を改良して、高压下でのマグマの密度を測定する方法を考案し、玄武岩マグマの密度を15kb までの圧力下で測定した。その結果、珪酸塩メルトの圧縮率は、珪酸塩結晶にくらべてはるかに大きい(5-10倍)ことが示された。また、斜長石は低圧ではある種の玄武岩マグマよりも重い、圧力の増大にともなう密度の増加率はマグマの方が大きいために、高压下では玄武岩マグマよりも軽くなることを実験的にも示した。FUJII *et al.* (1978) はこの結果を海洋底玄武岩マグマの成因論に適用し、MIYASHIRO *et al.* (1970) によって提唱された、PL-tholeiite と OL-tholeiite に各々独立な本源マグマを想定する必要はなく、PL-tholeiite は比較的高圧下の マグマ溜り中で斜長石が浮上濃集した部分に由来するものであり、単一の OL-tholeiite マグマから導かれ得ることを示した。KUSHIRO & FUJII (1977) はまた、圧力増加にともない斜長石とマグマの密度の逆転が生じることを anorthosite の成因論に応用し、anorthosite は高压下でのマグマ溜り中で斜長石が浮上、濃集してできたとするモデルを提唱した。

第1図 Albite と Jadeite 組成のメルトの粘性 (KUSHIRO 1980による)

KUSHIRO (1986) は tholeiite から alkali basalt にいたる種々の組成の玄武岩マグマの密度を12kb までの圧力下で測定し、無水の tholeiite マグマは alkali basalt マグマよりも密度が大きく、また圧縮率も大きいことを見いだした。彼の議論に従えば、tholeiite マグマは地殻物質との密度差が小さいために、下部地殻中にマグマ溜りを形成し易いことになり、そのため地表に噴出する tholeiite は分化の進んだものが認められるということになる。一方、alkali basalt マグマは地殻物質より密度が小さいため、地殻中に停滞する時間が短く、地表に噴出する際には分化の進んでいない、マントル内で生成された組成に近いものが認められる傾向があることになる。日本列島における島弧を横切る方向での火山岩の組成変化の特徴(例えば KUSHIRO 1983)のいくつかはこのようなマグマの物性量の違いによる結果として理解できることになる。このように、最近ではマグマ成因論にマグマの高压物性がひとつのパラメータとして取り入れられるようになった。

IV. 初期地球とマグマの物性

FUJII & KUSHIRO (1977) が15kb までの玄

第2図 マントルと共存するメルトの密度 (藤井 1985 及び未公表データ) 黒丸は TAKAHASHI (1986), 黒四角は FUJII & SCARFE (1985) 四角は TAKAHASHI & KUSHIRO (1983) が求めたメルトの組成の密度。

玄武岩マグマの密度を測定した後、この結果をさらに高压まで外挿しようとする試みがおこなわれた。STOLPER *et al.* (1981) は Birch-Murnaghan の状態方程式がマグマについても成立するとして、FUJII & KUSHIRO (1977) の測定結果に適用して、マグマの圧縮率をもとめた。マグマの圧縮率に組成依存性はないと仮定して、マントル内に存在し得るマグマの密度を計算した結果、マグマの密度は40-80kb の圧力でマントル物質よりも大きくなるという結論に達した。RIGDEN *et al.* (1984) は衝撃波を使った An-Di 系での実験により STOLPER *et al.* (1981) の推定が正しいと主張している。彼らの推定が事実だとすると、現在、地表で見られるマグマはすべて 80kb 以浅のマントルに由来するものであり、それよりも深い部分で生成されたマグマは地下深部に沈んでしまうことになり、マントル内部での化学的な分化が進むことになってしまう。

OHTANI (1984) は珪酸塩鉱物の高压下での融解曲線を熱力学的に解析する方法で地球内部のマグマの密度を推定し、初期地球に存在したと考えられる大規模溶融状態 (magma ocean) でのプロセスに応用した。彼の方法ではマグマの圧縮率に組成依存性があるが、STOLPER *et al.* (1981) の推定より高压の 100kb 程度の圧力を境にして、マグマとマントル物質との密度の逆転が生じるこ

とになる。その結果 magma ocean 内の 100 kb より低压では、晶出した olivine が沈降し、100 kb より高压では olivine は浮上することになり、最終的には 100 kb に相当する深さに olivine の濃集した層が形成されることになる。このようにマグマの高压下での密度は地球の内部構造や大規模な分化を規制する重要な物性量であることがわかる。FUJII *et al.* (1984) は玄武岩マグマと olivine の密度の関係を 85 kb までの圧力下でしらべ、85 kb の圧力で Fo90 の olivine と玄武岩マグマの密度が等しくなることを見いだした。しかし、マントル物質と共存するマグマの組成は低压でこそ玄武岩質であるが高压下では異なる。このため、マグマの圧縮率の組成依存性を知る必要があるが超高压下での密度測定にはまだ技術的困難さがあり、現在のところ実験的にはまだよく理解されていない。

藤井 (1985), HERZBURG (1987) はこの問題の解決を図るため、マグマの密度を構成酸化物の部分モル体積の線形結合で表現する BOTTINGA & WEILL (1970) の方法を採用し、高压下での部分モル体積は珪酸塩鉱物の溶融曲線の熱力学的解析やいくつかの実測値から求めた。彼らの方法をもちいると、どのような化学組成のマグマについても高压下での密度を推定することができる。彼らの方法で求めた玄武岩組成のマグマの密度は 80-100kb 程度でマントル物質とほぼ等しくなり、FUJII *et al.* (1984) の実験結果と一致する。しかし、マントル物質と共存できるマグマの組成は圧力の増加と共に MgO にとり、SiO₂ にとりよくなる (TAKAHASHI 1986)。このようなマグマの圧縮率は玄武岩マグマに比べて小さくなるため、少なくとも100kb まではマグマとマントル物質の密度の逆転は生じないという結果が得られることになる (第2図)。現在のところ、上記の議論のどちらが正しいか決着がついていないが、早急に実験によって解決する必要がある。

V. おわりに

マグマの物性、特に粘性、密度は単に地表での溶岩流の流れ易さといった問題のみでなく、地球

進化のプロセスを理解する上で重要なパラメータであることを述べた。かつて、マグマ成因論は固相（結晶）と液相との化学的相互作用として述べられることが多かった。しかし、本来マグマの成因は固液の分離、液相の集積、移動といったダイ

ナミックスの側面からも理解されるべきである。高圧実験によるマグマの高圧物性のデータが集積されつつある現在、この側面からの理解も可能になろうとしている。

文 献

- BOTTINGA, Y. and WEILL, D. F. (1970) : Densities of liquid silicate systems calculated from partial molar volumes of oxide components. *Am. J. Sci.*, **269**, 169-182.
- 藤井敏嗣 (1985) : 高圧下でのマグマの密度. 火山第2集, **30**, 304.
- FUJII, T. & KUSHIRO, I. (1977) : Density, viscosity, and compressibility of basaltic liquid at high pressures, *Year Book Carnegie Inst. Washington*, **76**, 419-424.
- , KUSHIRO, I. and HAMURO, K. (1978) : Melting relations and viscosity of anabyssal tholeiite. *DSDP Initial Rept.* **45**, 513-517.
- , KURITA, K., KATO, K. and KATO, M. (1984) : Density of basalt melt at high pressure. Presented at *U. S. Japan Seminar on partial melting, Oregon*.
- , KURITA, K., KANZAKI, M., KATO, M. SHIMOMURA, O. and AKIMOTO, S. (1985) : *In situ* measurement of viscosity of silicate melt at high temperature and pressure. *KEK progress Report*, 85-1, 109.
- and SCARFE, C. M. (1985) : Composition of liquids coexisting with spinel lherzolite at 10 kbar and the genesis of MOCBs. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **90**, 18-28.
- HERZBURG, C. (1987) : Magma density at high pressure Part 2 : A test of the olivine flotation hypothesis. In *Magmatic Processes: Physicochemical Principles* (ed. B. O. MYSEN). The Geochemical Society Spec. Publ. 1, pp. 47-58.
- KANZAKI, M. (1987) : Physical properties of silicate melts at high pressure. Ph. D. thesis, Univ. Tokyo.
- , KURITA, K., FUJII, T., KATO, K., SHIMOMURA, O. and AKIMOTO, S. (1987) : A new technique to measure the viscosity and density of silicate melts at high pressure. In *High-Pressure Research in Mineral Physics* (ed. by M.H. MANGHNANI and Y. SHONO), pp. 195-200, TERRAPUB, Tokyo.
- KUSHIRO, I. (1976) : Changes in viscosity and structure of melt $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ composition at high pressures. *J. Geophys. Res.*, **81**, 6347-6350.
- (1980) : Viscosity, density, and structure of silicate melts at high pressures, and their petrological applications. In *Physics of magmatic processes* (ed. R.B. HARGRAVES), pp. 93-120. Princeton Univ. Press, Princeton.
- (1983) : On the lateral variations in chemical composition and volume of Quaternary volcanic rocks across Japanese arcs. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18**, 435-447.
- (1986) : Viscosity of partial melts in the upper mantle. *J. Geophys. Res.*, **91**, 9343-9350.
- & FUJII, T. (1977) : Floation of plagioclase in magma at high pressures and its bearing on the origin of anorthosite. *Proc. Japan Academy*, **53**, Ser. B, 262-266.
- MIYASHIRO, A., SHIDO, F. and EWING, M. (1970) : Crystallization and differentiation in abyssal tholeiites and gabbros from mid-oceanic ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **7**, 361-365.
- OHTANI, E. (1984) : Generation of komatiite magma and gravitational differentiation in deep upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **67**, 261-272.
- RIGDEN, S., AHRENS, J. J. and STOLPER, E. M. (1984) : Density of liquid silicates at high pressure. *Science*, **226**, 1071-1074.
- STOLPER, E. M., WALKER, D., HAGER, B. and HAYS, J. F. (1981) : Melt segregation from partially molten source regions. *J. Geophys. Res.*, **86**, 6261-6271.

- 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.
- & KUSHIRO, I. (1983) : Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magmatogenesis. *Am. Mineral.*, **68**, 859-879.
- TOKÖZ, M. N., HSUI, A. and JOHNSON, D. H. (1978) : Thermal evolution of the terrestrial planets. *Moon & Planets*, **18**, 281-320.

(昭和63年3月3日受理)