

## 地殻内におけるマグマシステムの進化 — 思考実験とアナログ実験による考察 —

Evolution of magma system in the crust  
- Investigations based on thought experiments and analogue experiments -

### Abstract

金子克哉\*  
小屋口剛博\*\*

*Katsuya Kaneko\**  
*Takehiro Koyaguchi\*\**

1995年11月6日受付.  
1996年4月3日受理.

\* 東京大学 地震研究所  
〒113 東京都文京区弥生1-1-1. Earthquake  
Research Institute, University of Tokyo; 1-  
1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japan.  
(現所属: 勸電力中央研究所我孫子研究所地質  
地盤部. 〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646.  
Present address: Geology and geotechnology  
department, Abiko Research Laboratory,  
Central Research Institute of Electric Power  
Industry; 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba 270-  
11 Japan)

\*\* 東京大学 地震研究所  
〒113 東京都文京区弥生1-1-1. Earthquake Re-  
search Institute, University of Tokyo; 1-1-1  
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japan.

Thermal and compositional evolution of magmas in the continental crust are profoundly affected by the melting processes of the crust and convection in magmas. The results of calculations on heat transfer between a hot liquid and a cold solid suggest that the cooling rate of the liquid significantly increases when the solid/liquid interface moves due to melting driven by vigorous convection.

Analogue experiments have been carried out using  $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$  binary eutectic system to determine the conditions under which melting and/or convection occur at the roof and the floor of a magma chamber. When a cold solid mixture with the eutectic composition is placed at the top of a hot solution of higher  $\text{NH}_4\text{Cl}$  content, vigorous thermal convection occurs in the solution, which results in rapid melting of the solid roof to form a stable melt layer with negligible mixing of the underlying liquid. On the other hand, when the cold solid mixture is placed at the bottom of the hot solution, the convection is driven by compositional gradient due to floor melting as well as crystallization just above the floor. Because the compositional convection carries a low heat flux, the rate of melting and the temperature profile around the floor do not differ greatly from those that would be observed due to conduction alone. Unlike the roof melting, the melt generated by the floor melting efficiently mixes with the overlying solution.

The implication for the thermal and compositional evolution of a magma system is that, when a basaltic magma is emplaced in the continental crust, a silicic magma is rapidly formed by the roof melting, and that the magmas evolve very slowly after the temperatures of the magmas become as cool as the fusion temperature of the crust. The major effect of the floor melting would be that the liquid line of descent of the basaltic magma can be greatly modified by mixing with the melt generated at the floor.

*Key words: magma system, magma chamber, analogue experiment, thermal convection, compositional convection*

### 1. はじめに

マントルで発生したマグマは、地殻中のマグマ溜まりにおいて温度組成変化を起し、地表に多様な火山噴出物をもたらす。噴出するマグマの性質はいったいどのような地球科学的条件によって決まっているのだろうか？ 相平衡論に基づいた従来の岩石学的手法によって、マグマの発生や結晶化の温度圧力条件に関する知識をある程度得ることができた。しかしながら、依然として「なぜその温度なのか？」あるいは

「なぜその組成なのか？」という疑問に十分に答えることができていない。噴出するマグマの温度や化学的性質は、たとえば、マグマ溜まりにおいてどのくらいの時間をかけてどのように温度や組成の変化を進行させているのか、といった熱や物質の移動現象のバランスによって決定されており、組成、温度、圧力といった示強変数相互の関係を記述する相平衡論だけでは、マグマが噴出時に蓄えているエネルギーの量を推定することが原理的に不可能だからである。本論文では、この「なぜ」に答えるために最近我々がおこなっている、地殻

中のマグマ溜まりにおける熱物質進化の速度と過程に関する研究の概要を解説する。

この考えを進めていくために考慮しなければならない重要な点として、一般に大陸地殻物質の融点は、マントルから供給されたマグマの温度よりも低いという事実がある。そのため、特に大陸地殻上に位置する火山の下のマグマ溜まりでは、マグマの冷却と結晶化だけでなく、周辺地殻の溶融と再固結などが同時に進行する。すなわち、地殻中のマグマの進化を理解するためには、マグマ溜まりを作る「器」である地殻と「中身」であるマグマの両方をその相互作用とともに論じなければならない。そこで、本論文では、マグマ溜まりだけでなく、周囲の地殻も考察対象とすることを強調するため、この地殻とマグマより成る系をマグマシステムと呼び、マグマシステム全体がどのように進化するかをモデリングしていく。

マグマシステムの進化を決定しているのは、液体であるマグマと固体である地殻の境界における熱および物質の移動過程である。マグマと地殻が接して熱の移動がおこるとき、その境界では(1)伝導あるいは対流による熱の移動、(2)地殻の溶融およびマグマの結晶化とそれによる固体液体の境界面の移動、(3)マグマと地殻両方の組成の分化、(4)拡散あるいは対流による物質の移動といった過程が必然的に同時に起こり、これら4つが複雑に絡み合っ、マグマシステムの熱物質進化を進行させている。このような複雑な系を確実に理解するために、本論文では、マグマが地殻中に貫入し、その後新たなマグマの供給を受けない場合のマグマシステムの進化について、2つの段階を踏んで議論を進めていきたい。まず、第一段階として、思考実験に基づいて、境界面での物質移動を考慮に入れない系で、溶融による境界の移動がマグマの冷却の時間スケールに与える影響について議論する。このように境界における物質移動を全く伴わない系は、天然や実験のいかなる条件でも存在しないが、境界面での固相の溶融や液体中の対流を含む冷却過程を支配する要因について基本的アイデアを得ることができる。次に第二段階として、アナログ実験に基づいて、境界面での物質移動を考慮にいたした系の熱物質進化について考察を行う。この系は、複雑すぎるため、現象を定量的に完全に記述するモデルを立てることに未だ成功していないが、実験結果から、定性的に本質的に重要であると思われる現象を把握することができる。

大陸地殻中に玄武岩質のマグマ溜まりが形成した場合、地殻が溶融してできたマグマや、結晶化によるマグマの残液は、組成的効果のため、元のマグマより密度が小さくなる。その結果、マグマ溜まりの上面と下面ではメカニズムの全く異なる対流が発生する。これまで、マグマ溜まりの上面あるいは下面において発生する対流や熱移動について、アナログ物質を使った実験的研究またそれに関連した理論的研究がなされてきた。Campbell and Turner (1987) は、液が上面で固体と接して、固体の溶融を伴う液の結晶化についての実験を行い、固体の溶融してできた液と元の液が分離した二液層を形成し、それぞれの層が上方からの冷却によって、活発に熱対流することを観察した。Huppert and Sparks (1988a,b) は、液の上面固体の溶融について実験を行い、Campbell

and Turner (1987) と同様の現象を観察した。彼らは、さらにこの系における理論的なモデルを構築し、固液境界の移動を伴った上面固体の溶融によって、液の温度低下が急速に進行し得ることを明らかにした。一方、液が下面で固体と接する場合には、固体溶融あるいは結晶化によって、組成対流が発生する。Campbell (1985), Woods (1991), Kerr (1994) は、液の下面における固体の溶融について実験を行い、下面固体の溶融でできた密度の小さい液が上昇し、元の液と混合することを観察した。また、Tait and Jaupart (1989, 1992), Chen and Chen (1991) は、液の下面からの冷却による液の結晶化実験を行ない、液の底面からの結晶化の進行によって、固液共存層である mush が形成すること、結晶化による組成変化のため密度の減少した mush 中の粒間液が上昇して元の液と混合することを観察した。これらの組成対流が運ぶ熱は条件によって大きく異なる (e.g. Kerr, 1994; Tait and Jaupart, 1989, 1992)。

これらの研究の中で、マグマの温度変化を支配する要因について述べた Huppert and Sparks (1988a, b) が最も重要である。本論文の思考実験では、Huppert and Sparks (1988a, b) の考え方を拡張し、地殻とマグマの溶融温度の様々な組み合わせやマグマの対流状態について網羅的に検討を行い、マグマの冷却の時間スケールとそれを支配する要因について論ずる。アナログ実験では、これまで理解されていなかった上面と下面における発生機構の異なる対流の相互作用を中心に論ずる。これは、マグマが上面および下面において地殻と接する天然のマグマシステムの進化を理解する上で重要な問題である。

マグマが上面と下面で地殻と接して熱物質進化が起こるマグマシステムは、側壁の影響が無視できるシル状のマグマ溜まりと周辺の地殻からなるマグマシステムに相当するであろう。マグマの形状によっては、側壁における溶融結晶化に伴う固液の分離が、マグマ溜まり中にマグマの層構造の形成を促すことが報告されているが (e.g. Campbell and Turner, 1987), 現段階において我々は、実験および考察を十分に行っていないので、本論文では議論しない。

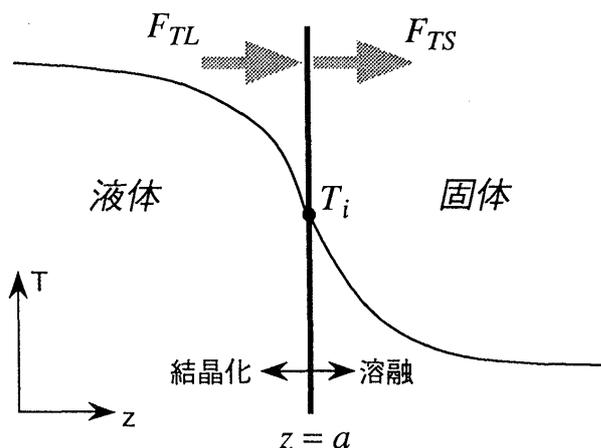
## 2. マグマシステムの冷却に関する思考実験

### 2. 1. 固液境界における熱バランスの基本的考え方

本節では、固液境界の移動と液の対流を含む系の熱の移動について、時間を  $t$ 、位置座標を  $z$  とした一次元系によって議論を進める。溶融や結晶化によって固液境界面が移動する場合の熱バランスは

$$\left( \begin{array}{c} \text{液から境界} \\ \text{面への熱流} \\ \text{量} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{境界面から} \\ \text{固体側への} \\ \text{熱流量} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{境界の移動によって} \\ \text{単位時間に発生ある} \\ \text{いは吸収される熱量} \end{array} \right) \quad (1)$$

によって決定される (第1図)。右辺第二項は固体が溶融するときは正、液が結晶化するときは負である。液から境界面への熱流量を  $F_{TL}$ 、境界面から固体への熱流量を  $F_{TS}$ 、境界面の位置を  $a$  とすると、境界の移動速度、 $da/dt$  は



第1図 固液境界面における熱バランスと境界温度についての考え方。縦軸、横軸はそれぞれ温度、位置を表す。\$F\_{TL}\$、\$F\_{TS}\$はそれぞれ、液体から固液境界面への熱流量、固液境界面から固体への熱流量を表す。\$T\_i\$は境界面の温度を表す。

$$F_{TL} = F_{TS} + \rho L \frac{da}{dt} \quad (2)$$

の関係から求められる。\$\rho, L\$はそれぞれ物質の密度、融解熱である。

固体中の熱移動は熱伝導過程によるため、固体中の温度変化は熱伝導方程式に従う。境界面から固体への熱流量\$F\_{TS}\$は、

$$F_{TS} = k_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=a+} \quad (3)$$

で与えられる。\$T\$は\$t\$と\$z\$を変数とする温度、\$k\_s\$は固体中の熱伝導率である。\$F\_{TS}\$は温度の異なる固体と液が接した直後、固体の境界部付近には大きな温度勾配が生じるため非常に大きい値をとるが、時間とともに急速に温度勾配が小さくなり急速に減少するという性質を持つ。

液から境界面への熱流量(\$F\_{TL}\$)は、対流している場合としていない場合とでは全く異なる。液が活発な対流をしているときの液から境界面への熱流量は、

$$F_{TL} = \lambda k_l \left( \frac{\alpha g}{\kappa_l \nu} \right)^{1/3} (T_i - T_s)^{4/3} \quad (4a)$$

で表されることが知られている (Turner, 1979)。\$T\_i\$は液の温度、\$T\_s\$は固液境界面の温度、\$\alpha, k\_l, \kappa\_l, \nu\$はそれぞれ液の熱膨張率、熱伝導率、熱拡散率、動粘性係数を表す。\$g\$は重力加速度、\$\lambda\$は定数である。この関係式は、境界付近をのぞく液層内部のほとんどの部分で対流によって温度が均質化しており、かつ、境界付近に生じた密度不安定によって次々に形成されるブリュームが鉛直方向の熱輸送を担っているような系においては、系のスケールによらずに成り立つものである。このような熱輸送は、液が上方より冷却されている場合に進行する。この関係式で注目すべき点は、\$F\_{TL}\$は液層内部の温度と冷却境界面の温度差によって決まることであり、

そのため熱流量の時間的変化は、液層全体の冷却の時間スケールと同程度の時間スケールで変動することになる。

液中に対流していない場合、液から境界面への熱流量(\$F\_{TL}\$)は、固体の場合と全く同様に

$$F_{TL} = k_l \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=a-} \quad (4b)$$

で与えられる。このような熱輸送は、たとえば、液が下方から冷却されて温度的に密度安定な構造を作っているような条件で進行するであろう。

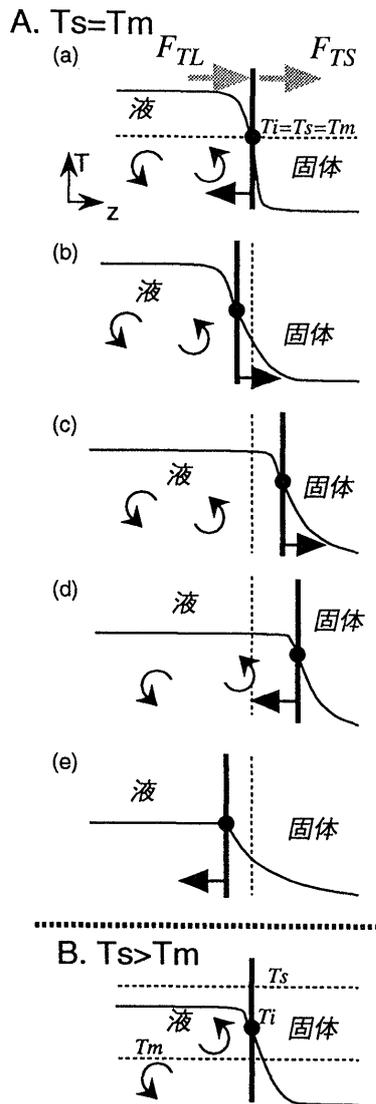
さてここで、式(1)、(2)にもどって熱バランスと境界の移動について考えよう。境界面が停止したまま移動しない場合には、境界の温度\$T\_i\$は\$F\_{TS}=F\_{TL}\$を成立させるように決まる。相対的に\$F\_{TL}\$が増加すれば\$T\_i\$が上昇することによって、逆に、減少すれば\$T\_i\$が降下することによって\$F\_{TS}=F\_{TL}\$の関係を満たすことができる。\$T\_i\$は固相の融点\$T\_s\$以上になることができないので、ある程度以上\$F\_{TL}\$が増加すると、もはや\$F\_{TS}=F\_{TL}\$を成立させることはできなくなり、\$F\_{TS}<F\_{TL}\$の条件となって、境界温度が固体の融点(\$T\_s\$)に保たれたまま溶融が進行する(式(2)参照)。全く同様に、境界温度は液相の融点以下になることができないので、相対的に\$F\_{TL}\$が減少した場合には、\$F\_{TS}>F\_{TL}\$の条件で、境界温度\$T\_i\$が液の融点に保たれ結晶化が進行する。

以上のように、固液境界の熱バランスと境界の移動の関係は、固相と液相の融点によって決定される。マグマや地殻を構成している多成分物質は、ソリダスとリキダスの間で固液相割合が連続的に変化するため、厳密な意味での融点を1つの温度で定義することはできない。しかし、部分溶融体は、液相の割合が小さい時には事実上固体として振る舞うが、ある数値(50~60%)を越えると、粘性が急激に低下し、事実上液体として振る舞う様になることが知られている (van der Molen & Paterson, 1979; Shaw, 1980; Marsh, 1981)。そこで、固液分離が起こらない部分溶融物質については、この物性が急変する温度を実効的な融点 (以後 Huppert & Sparks, 1988b にならって Effective Fusion Temperature, EFT と呼ぶ) と考えても差つかえないであろう。

EFTは固相と液相の体積比によって決まるものであるから、その値は、地殻あるいはマグマの化学組成によって変化しうる。従って、仮に固液分離が起こらずにEFTが定義できる場合であっても、一般には、マグマと地殻のEFTは異なることが予想される。そこで、EFTの違いによって境界面の移動がどのように変化するかを理解する必要がある。以下には、初期において固体と液体のEFTの大小関係と対流の有無に関する場合分けを行って考察する。

#### (1) 液層が対流する場合

(i) EFTが一様である場合 (第2A図)、境界温度がそのEFTに保たれるまま、溶融また結晶化が進行し、常に境界が移動する。液と固体が最初に接した直後には、固体の境界部付近に大きな温度勾配が生じるため、\$F\_{TS}>F\_{TL}\$となって、液の結晶化が進行する(第2Aa図)。その後、固体中では境界付近の温度勾配が急速に小さくなり\$F\_{TS}\$は減少するため、



第2図 マグマシステムの固液境界面の移動の様子。  $T_i$  は境界面の温度、  $T_s$ 、  $T_m$  はそれぞれ固体と液体の EFT (部分溶融した固体が事実上液体として振る舞い始める温度) を表す。 A: EFT が一樣である場合。 a~e は時間経過順に並べてある。 詳しくは本文参照。 B: 高 EFT の固体と低 EFT の液体が接した場合、 A における b と c の間または d と e の間に、境界面温度が固体と液体の間の値を持ち、境界が移動しない場合が生ずる。

$F_{TS}$  と  $F_{TL}$  の大小関係は逆転し、いったん結晶化した部分が溶融し (図 2Ab), さらに、地殻だった部分まで溶融は広がる (第 2Ac 図)。 液の温度低下とともに、  $F_{TL}$  は減少し (式 (4a) 参照), やがて、液の温度が EFT 付近まで低下すると、再び  $F_{TS} > F_{TL}$  となって、溶融した固体を含めた液の固結が開始する (第 2Ad 図)。 固結の進行中、液の温度が EFT に達すると、液中にはもはや温度差が無くなるので、対流は停止し、熱伝導による冷却のみによって固結する (第 2Ae 図)。

(ii) 低 EFT の固体に高 EFT の液体が接した場合、物質の移動が起こらないと、時間とともに、液体がその EFT まで冷却し、最初の固液境界の液側における結晶化と固体側に

第1表 計算に用いた物性値および定数。

	値	単位
密度 ( $\rho$ )	$2.6 \times 10^3$ (s), $2.4 \times 10^3$ (l)	$\text{kgm}^{-3}$
熱伝導率 ( $k_s, k_l$ )	2.4 (s&l)	$\text{Wm}^{-2} \text{s}^{-1}$
比熱	$1.3 \times 10^3$ (s&l)	$\text{Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
動粘性係数 ( $\nu$ )	$1.0 \times 10^2$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
融解熱 (L)	$2.9 \times 10^5$	$\text{Jkg}^{-1}$
熱膨張係数 ( $\alpha$ )	$5.0 \times 10^{-5}$	$^\circ\text{C}^{-1}$
融点 ( $T_e$ )	850	$^\circ\text{C}$
重力加速度 (g)	9.8	$\text{ms}^{-2}$
式(3)の定数 ( $\lambda$ )	0.1	

s, l はそれぞれ固体, 液体の値であることを表す。

おける溶融とが同時に進行する。この状況では液中でできた結晶はその場に安定して存在できず、結晶が液から分離すると考えられる。このとき、液の EFT は継続的に低下していき、最終的には固体の EFT に達する。したがって、(i) の状況に帰着できる。

(iii) 高 EFT の固体と低 EFT の液体と接した場合、初期状態で固体だった領域が溶融または結晶化するときには境界温度が高 EFT 物質の EFT に固定され、初期状態で液だった領域が結晶化や溶融を起こすときには境界温度が低 EFT 物質の EFT に固定されて境界が移動する。すなわち、境界面の移動が起こっている場合の境界温度の値が異なっているだけで、本質的には一樣な EFT の場合とほとんど同じことが起こる。ただし、液と固体の EFT が等しい場合に現れなかった状態として、第 2A 図の b と c の間または d と e の間に、境界温度が両 EFT の間の値をもち、境界が移動しない状態が生じ得る (第 2B 図)。

## (2) 液層が対流しない場合

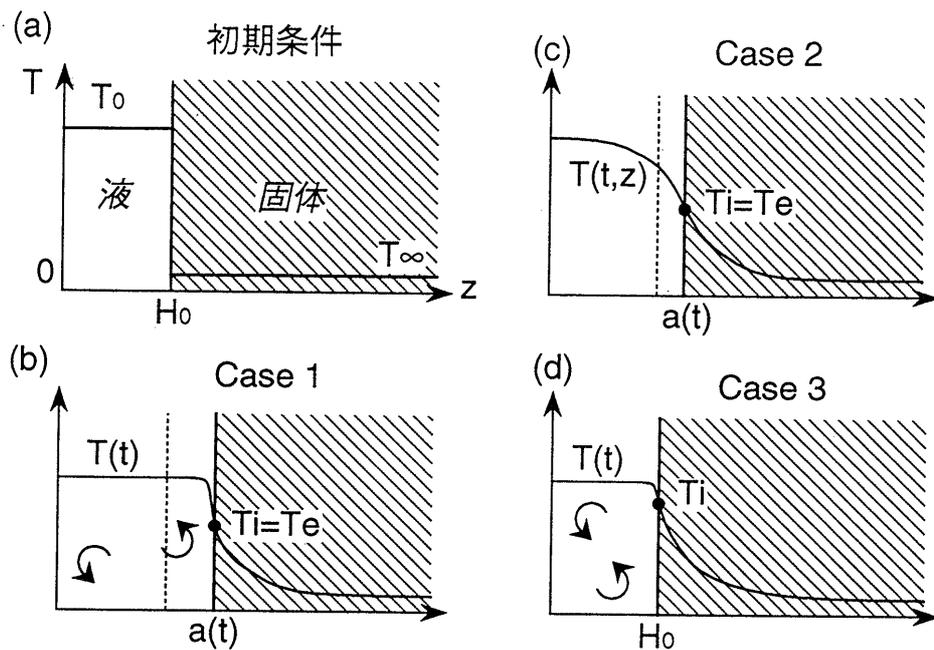
系全体の熱移動が熱伝導過程によっている場合も、EFT の違いによって、液が対流する場合と同様の境界面の移動様式の変化が予想される。しかしながら、この場合、そもそも液体であるか固体であるかということによって、熱の移動様式に違いがないので、EFT 変化が系全体の温度プロファイルや熱的進化の様式に定性的な変化与えるとは考えがたい。

## 2. 2. 一次元モデルによる数値計算

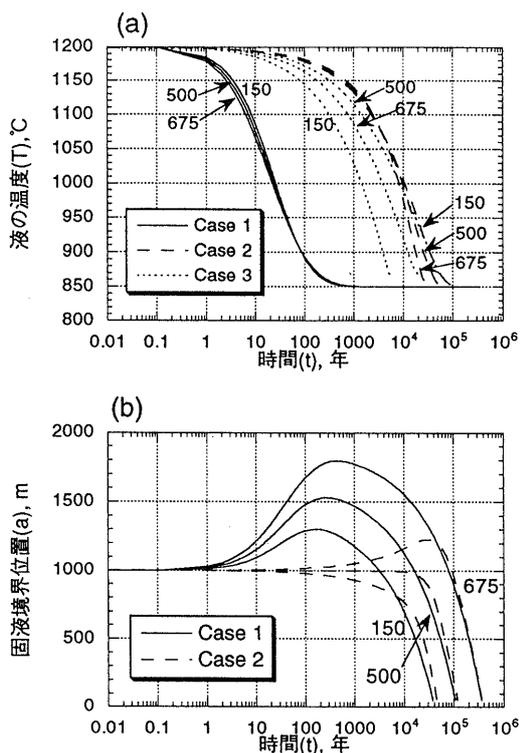
これまでの議論から、「境界の移動」と「液体の対流」という 2 つの要因がマグマシステムの熱的進化を支配していることが推察される。そこでこの節では

- (i) 境界が移動し、液が対流する場合 (Case 1; 第 3b 図)。
- (ii) 境界が移動し、液が対流しない場合 (Case 2; 第 3c 図)。
- (iii) 境界が移動せず、液が対流する場合 (Case 3; 第 3d 図)。

という 3 つの場合について、一次元のモデル計算をおこない、各々の効果を定量的に評価する。初期状態において、 $z$  軸方向に厚さが  $H_0$ 、一樣な温度  $T_0$  の液体の層が、一方の面で半無限の一樣な温度  $T_\infty$  の固体と接し、もう一方の面は断



第3図 数値計算を行った一次元モデルの概念図。a: 初期状態。b: 境界が移動して液が対流する場合 (Case 1)。c: 境界が移動して液が対流しない場合 (Case 2)。d: 境界が移動せず液が対流する場合 (Case 3)。

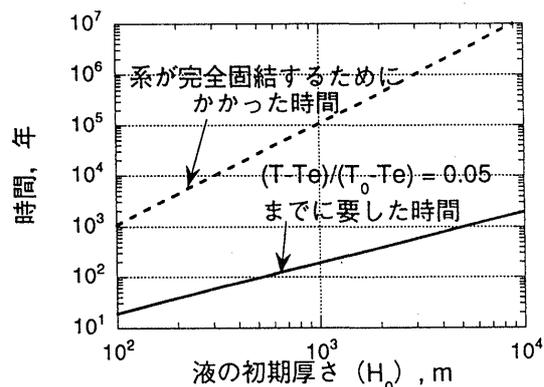


第4図 一次元モデルによる数値計算の結果。液の初期状態での厚さを1000m、温度を1200°C、固体の初期温度(図中の数字)を675°C、500°C、150°Cとして計算した。実線、破線、点線はそれぞれCase 1, 2, 3による計算結果を表す。a: Case 1, 2, 3における液温度(T)の時間変化。冷却によって、液の温度は融点温度(850°C)に収束する。Case 2では、平均液温度を示した。b: Case 1と2における、固液境界位置(a)の時間変化。

熱されているという系で、温度プロファイルと固液境界の位置の時間変化を式(1)から(4)までの熱バランスの関係式に基づいて計算した(第3a図)。計算に用いた物性値および定数は第1表に示す。なお、「境界の移動」と「液体の対流」が液の温度の時間変化に与える影響を明確にするために、Case 1, 2ではある特定の融点において液体と固体との間の完全な相転移が起こるという条件のもとで行い、また Case 3では境界の溶解や液体の結晶化がおこらないような十分に高融点の固体と十分に低融点の液体が接した場合を仮定した。

最も重要な結果は、液体が対流するという条件と溶解によって固液境界が移動するという両方の条件がそろった場合(つまり Case 1)に限って、液体の冷却の時間スケールが著しく短いということである。たとえば、初期状態での液層の厚さが1kmの場合、100年程度の短い時間スケールで融点付近まで冷却した後ゆっくりと約 $10^5$ 年かけて冷却固結を進行させていく(第4a図)。この際の境界面の移動をみると、最初、瞬間的に結晶化が進むが、すぐに溶解が始まり、液体の温度が融点まで冷却している期間、溶解が進行し続ける。液体の温度が融点まで達したときに、最大の溶解量に達し、その後ゆっくりと結晶化が進行する(第4b図)。Case 1における液体の温度が融点まで冷却する時間スケールは、境界が移動して液が対流しない場合(Case 2)や境界が移動せずに液が対流する場合(Case 3)に比べて1~2桁以上短い。第4図には、固体の初期温度を150度から675度まで大きく変化した計算結果を示しているが、対流と固液境界の移動の効果は、初期の固体の温度の変化の効果に比べると、はるかに重要であることがわかる。

ここで注意しなければならないことは、Case 1において液体部分の温度が急速に減少したのは、液体が元々もっていた熱がうばわれ、周辺の固体部分へ散逸したためではなく、液体の熱が固体の溶解に使われ、かつ融点温度をもった液が生産されたため、液体部分の平均温度が減少したためである



第5図 液の初期厚さ ( $H_0$ ) と、液がほぼ融点温度まで冷却する時間および液が固結する時間の関係。実線は、液の温度 ( $T$ ) と融点温度 ( $850^\circ\text{C}$ ) の差が、液の初期温度 ( $T_0$ ) と融点温度の差の5%になるまでに要した時間を示す。破線は、元の液が完全に固結するのに要した時間を示す。液と固体の初期温度はそれぞれ  $1200^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$  とした。

ということである。Case 2 と Case 3 の冷却過程、および Case 1 において融点に達した後の冷却過程は、基本的に固体の中を熱が伝導によって散逸する過程が律速しており、これらは条件の違いにかかわらずいずれも非常に遅い過程（液層の厚さが  $1\text{km}$  の時には  $10^{16}$  年）である。このことは、液が対流するか否かという違いは、固体中の熱伝導についてみれば境界面での温度を上昇させるという効果を与えるだけであり、固体中での熱の散逸の時間スケールを根本的に変化するものではないことを示唆している。

最初にも述べたように、ここでの思考実験やモデル計算は、かならずしも実在するマグマシステムにおける熱物質移動を完全に記述するものではない。従って、計算結果の詳細にこだわるよりも、現象を支配する大局的な法則を学びとることが大切であろう。Case 1 から 3 までの計算結果からえられる一般的知見は、以下の3点にまとめることができる。

- (1) 液体部分から熱をうばう過程は固体中の熱伝導によって律速されており、その過程は初期に液体と固体が接した直後を除くと固体の溶融・非溶融によらず非常に遅い過程である。
- (2) 液体が激しく対流している場合、溶融は液体から境界への熱流によって律速される。
- (3) 液体部分の平均温度は、もともと液体が持っていた熱量が溶融に使われることと溶融によって融点温度をもった液体が生産されることの2つの効果によって減少する。

以上の3点を考慮にいと、地殻中でのマグマの温度の時間変化は、大きく見て2つのモードに分かれることが推定される（第2表）。1つは、溶融と液の活発な対流という2つの条件が満たされて液体部分の温度が急速に減少する期間で、これを以降、急冷期 (Rapid cooling stage) と呼ぶ。またもう1つは、溶融が起こらないかまたは液が対流しない場合に、固体中の熱伝導に律速されて液体部分の冷却や固結が進行する期間で、これを以降、徐冷期 (Slow cooling stage) と呼ぶ。急冷期のマグマの温度は供給された時のマグマの温度と地殻の融点の間で変化するが、徐冷期のマグマは地殻の融点付近の温度の値をもつ。それぞれのステージの時間の長さやマグマシステムのスケールの関係を第5図に示す。第5図における実線は Case 1 の条件で液の温度と融点温度の差が、初期状態における液の温度と融点温度の差の5%になるまでの冷却に要した時間を示しており、概ね急冷期

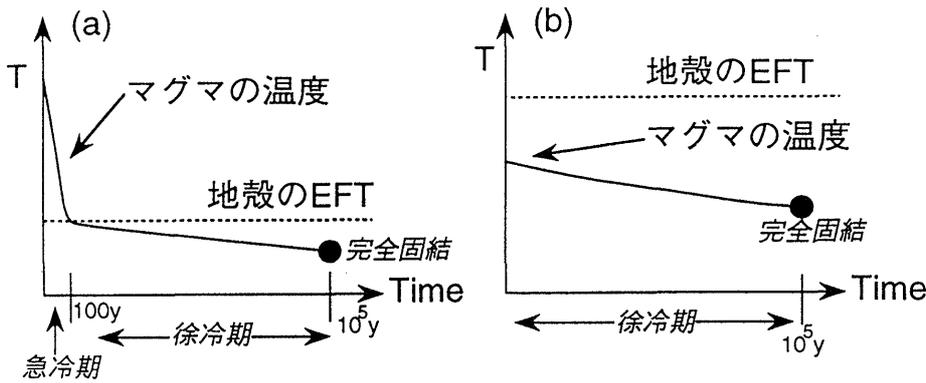
第2表 急冷期と徐冷期の特徴のまとめ

	急冷期	徐冷期
条件	固体の溶解 かつ 液の活発な対流	固体の溶解が起こらない または 液が対流しない
マグマの温度 ( $T$ )	地殻の $\text{EFT} < T <$ マグマの初期温度	$T \leq$ 地殻の $\text{EFT}$

にある時間を表すであろう。また、破線は元の液が完全に固結するのに必要な時間を示し、実線と破線の間がマグマシステムが徐冷期にある時間の長さを表す。急冷期の長さは液の初期量 ( $H_0$ ) にほぼ比例している。また、徐冷期の長さは固体の熱伝導に律速されているため液の初期量のほぼ2乗に比例している。このため、液の量が大きくなるにつれて、急冷期と徐冷期の時間の差が大きくなる傾向をもつ。

### 2. 3. 思考実験のまとめ

本節の思考実験に基づいて、あるマグマが「なぜその温度なのか？」あるいは「なぜその組成なのか？」という疑問に完璧に答えることはできないまでも、地殻中に長時間存在するマグマの温度や組成について、「マグマの温度」と「地殻の EFT」という観点から、ある程度指針を得ることができる。初期において、マグマの温度  $>$  地殻の EFT の関係が成り立つ場合（たとえば、玄武岩質マグマがカコウ岩質地殻に貫入した場合など）、まず急冷期の状態で地殻の溶融とマグマの冷却が進行し、マグマの温度が地殻の EFT に達した時点でマグマが固結していなければ、その後マグマシステムは徐冷期の状態で進化することができる（第6a図）。一方、なんらかの条件でマグマの温度  $<$  地殻の EFT という関係が成り立つ場合（例えば、デイサイト質マグマとハンレイ岩質地殻からなるマグマシステム）、マグマシステムは徐冷期の状態で進化し、長時間にわたって液体マグマを維持することができる（第6b図）。第5図の結果によると、地球科学的に妥当と思われる規模のマグマシステムでは、急冷期の長さは徐冷期に比べると瞬間的といって良いほど短い。したがって、地殻中に長時間存在するマグマの温度や組成の性質を決定するもっとも重要な要因は地殻の EFT であると結論づけられる。なお、この考え方を、地表に現れる火山噴出物の成因論と組み合わせるためには、さらに火山噴火のタイム



第6図 マグマの温度と地殻のEFTの関係によるマグマの温度の時間変化の概念図. a: マグマの温度>地殻のEFTの場合. b: マグマの温度<地殻のEFTの場合.

グや間隔を考慮する必要がある.

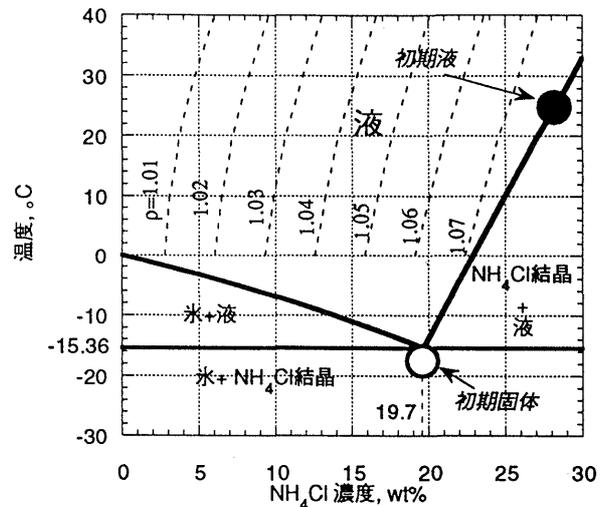
以上の考察から、マグマの分化について時間軸を考慮において論ずる際には、マグマだけでなく地殻を含めたマグマシステムの進化を総合的に考えることが不可欠であることがわかった。特に、重要なのは、具体的にどのようなマグマと地殻の組み合わせが徐冷期のマグマシステムとして実現可能か、という問題であろう。この問題を解決するためには、「マグマの温度が地殻のEFTに達した時点でマグマはどのような組成を持っているか?」とか「マグマと部分溶融した地殻の境界でどのような対流が発生するのか?」という、思考実験の段階で考慮しなかった、境界部での固液分離にともなう熱物質移動が本質的な役割を果たす現象を問題にしなければならない。以下の節では、水溶液を用いたアナログ実験に基づいて、これらの問題について議論する。

### 3. マグマシステムの熱物質進化のアナログ実験

前節で明らかになったように、マグマシステムの熱物質進化についての議論を進めていくために、マグマシステムの固液境界部における固液分離や対流の発生機構を理解する必要がある。大陸地殻に玄武岩質のマグマ溜まりが形成した場合、マグマ溜まりの上面と下面ではメカニズムの全く異なる対流が発生する。マグマ溜まり上面では上方からの冷却によって境界面付近でマグマの温度が低下する。この温度低下したマグマの密度の増大による密度不安定によって、「熱対流」が発生する。一方、マグマ溜まり下面からの冷却では、温度は下方向に向かって減少し、温度的には安定な密度構造になる。しかし、結晶化と溶融によって化学組成の異なる密度の小さい液が生成されるため、「組成対流」が発生する。これらの発生機構の違う対流について、それぞれの熱物質移動に果たす役割や相互作用を検討するために、本節ではマグマが上面と下面で地殻と接したときの熱物質移動現象を再現するアナログ実験にもとづいて考察していく。

#### 3. 1. 実験装置

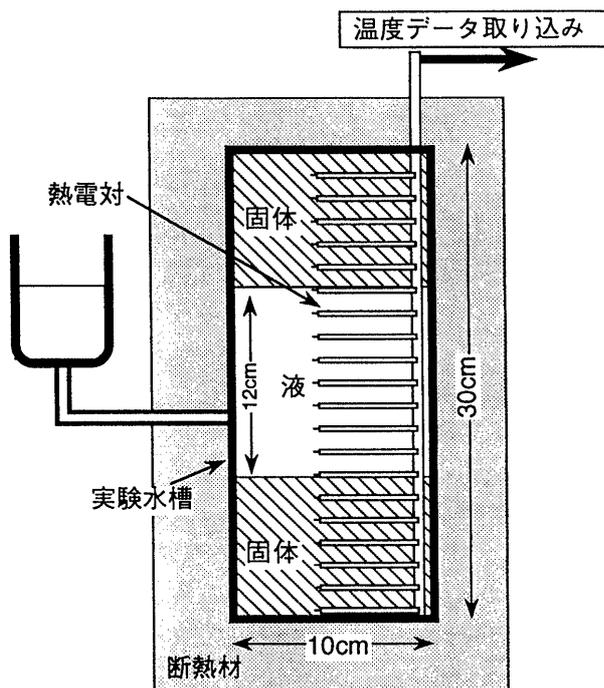
天然のマグマと地殻は多成分系であり、溶融や結晶化の相関係は複雑である。本研究では、単純な二成分共融系であるH<sub>2</sub>O-NH<sub>4</sub>Cl系(第7図)を用いてアナログ実験を行った。この系は、(1) 固体と液体が共存する温度範囲が存在するという点と、(2) 液体の密度が温度と組成の両方の関数になっ



第7図 アナログ実験に用いたH<sub>2</sub>O-NH<sub>4</sub>Cl二成分共融系の相図。破線は液の等密度線で、添えられている数字は密度(g cm<sup>-3</sup>)を表す。●と○はそれぞれ実験の初期状態における固体と液それぞれの温度と組成を示す。

ているという点において、多成分系熱物質移動の本質的な性質を十分に備えている。実験においては、NH<sub>4</sub>Clの水溶液と共融点温度以下に冷却したNH<sub>4</sub>Cl結晶と氷の混合物を水平な境界面をもつように接触させて、その後の境界面の様子、液体の運動、温度プロファイル、液組成プロファイルの時間変化を観察測定した。本稿で紹介する実験結果では、初期固体として共融点組成で共融点温度よりわずかに低い温度(19.7% -16°C)の混合物、初期液体として共融点組成よりも濃いNH<sub>4</sub>Cl濃度をもつ飽和水溶液(28wt%, 24.5°C)を用いた。この系は、液の結晶化によって残液密度が減少する点と固体の溶融によって低密度、低温の液ができるという点で、玄武岩質マグマと花崗岩質～閃緑岩質地殻の組み合わせの系を再現するものと考えられる。

第8図には実際に実験に用いた装置の概要を示した。厚さ10mmのアクリル板よりなる水槽(D100W100H300mm)中に、熱電対を垂直方向1cm間隔で埋め込んだ固体層と液体層を設置し、水槽全体を発泡スチロールによって断熱した。その後、およそ10分置きに断熱材を瞬間的にはずして、境界面と流体運動を観察した。初期の水溶液を食紅によって着色することによって、初期溶液と溶融によって生成した溶液



第8図 実験装置の概念図。この図では、両面実験の例を示す。

との混合状態を観察した。また液組成は水槽中の数点の異なった高さから注射器を用いて液を採取することによって測定された。

### 3. 2. アナログ実験の結果

本節では、まず、マグマ溜まりにおける上面と下面の素過程の役割を調べるため、水槽中の上方または下方に片方にだけ固体を設置した実験（以下、それぞれ上面実験、下面実験と呼ぶ）の結果を紹介し、さらに、上下面の過程の相互作用を調べるため上下の両方に固体をおいた実験（以下、両面実験と呼ぶ）の結果を紹介する。

#### (1) 上面実験と下面実験の比較

先にも述べたように固体が上面から接した場合と、下面から接した場合では本質的に全くことなるメカニズムによって対流が発生する。上面実験と下面実験を比較することによって、これらの境界面における熱物質移動過程のちがいを明確にしよう。

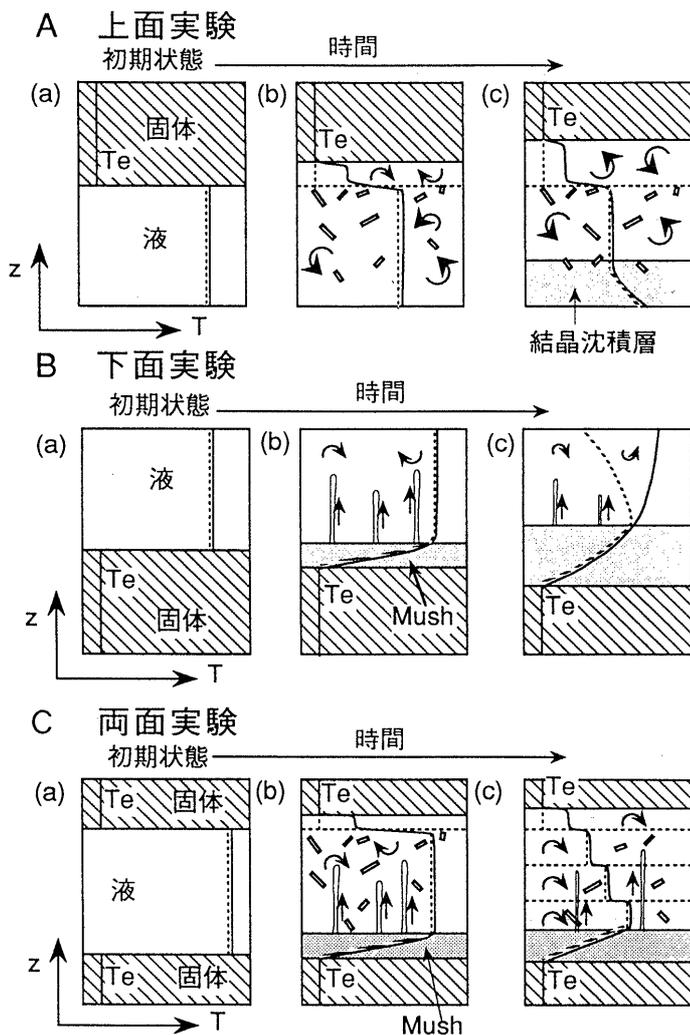
上面実験では、実験開始直後から、液体から供給される熱によって上面の固体が溶融し、同時に初期の飽和水溶液からは結晶が晶出する（第9Ab図）。溶融によって形成される液は、共融点の組成と温度をもち、初期の液と比較すると温度は低く、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度が低い。組成差のため密度が小さくなる効果の方が温度差によって密度が増加する効果よりはるかに大きいため、溶融によってできた液は、初期の液体と対流によって混合せずに、分離したまま共融点組成の上部液層を形成する。一方、初期の飽和水溶液は、下部液層を形成し、上部液層から物質的な影響を受けずに、自分自身の結晶化のみによって液の $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度が減少する（第9Ac図）。以上

のように上面で固体と接した液体は二層構造を形成するという特徴がある。上部液層と下部液層はともに、各層内部では活発に熱対流して、温度、組成はそれぞれの液層中で均質になっている。上面の溶融境界の位置の時間変化について、実験結果とモデル計算結果を比較すると、実験の溶融境界の進行は、対流が全く起こらずに伝導によってのみ熱が移動する場合の計算結果よりはるかに速いことがわかる（第10a図）。つまり、液の上面で固体が接した場合の溶融過程は、液体中を対流によって運ばれる熱流量によって律速されていると考えられる。第10a図では、実験結果の溶融速度が、実験開始直後から各層に乱流対流が発生する場合のモデル（Huppert and Sparks, 1988a, b）の予想より有意に遅いように見える。この食い違いの原因としては、実験においては上部液層がある程度厚くなるまで乱流対流が発生しないことなどが考えられるが、現在のところ十分な解答は得られていない。

下面実験では、液層と固体層の境界部に液体の結晶化で形成される固液混合層（mush）が形成されるのが特徴である（第9Bb図）。固体の溶融でできた液とmush内部の結晶成長により形成される密度の小さい粒間液は、mushの上にある液層中をブルーム状の形状で上昇し混合する。これらの溶融、結晶化、混合の影響によって液層中の $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度は減少する。実験開始から40分程たつと、液層内部では上に向かうほど $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度は減少するという組成勾配をもつようになる（第9Bc図）。固体層とmushの境界は、固体の溶融にともなって、下方向に移動する。一方、mushと液層の境界部は、実験初期においてはmush先端での結晶の成長によって上方へ移動するが、その後液層の $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度が十分低くなるとmush先端で溶融がおこり、再び下方へ移動する。

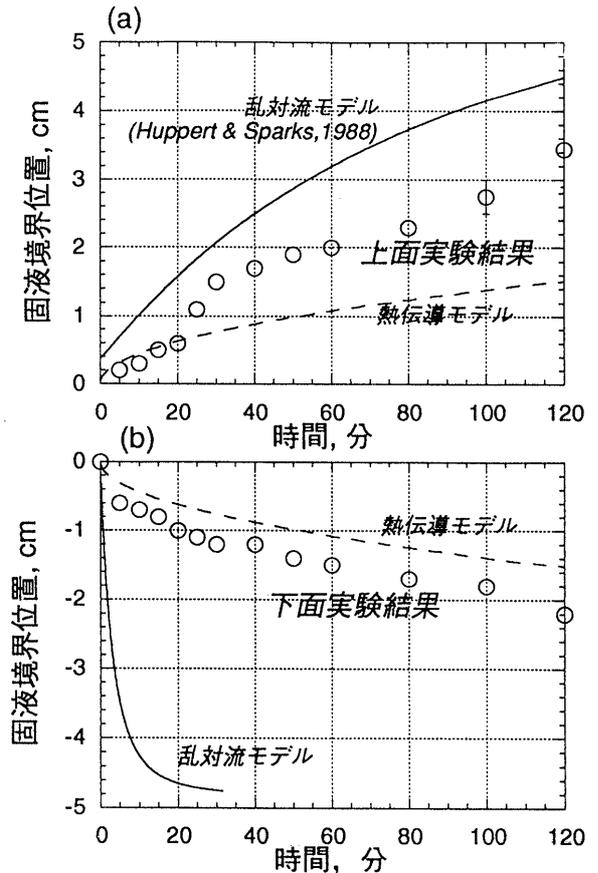
これらの境界の位置は、固体層、mush、液層間での熱と物質のバランスによって決まっている。とくに、液層とmushの境界では、前節の式(1)-(4)で示されたような熱バランスに加えて、液層の組成変化によって結晶化する温度が変化することが重要な役割を果たすことになる。現在のところ液層中の組成勾配を含めた全ての現象を記述するモデルをたてることには成功していない。一方、固体層とmushの境界の位置はmushから固体層への熱流によって決定される。mush/固体層の境界位置の時間変化について実験結果とモデル計算結果を比較すると、実験での溶融速度は、伝導のみによって熱が運ばれる場合の計算結果に近い値を示し、組成対流によってmushと液層内の温度が十分に均質化されると仮定したときの計算結果に比べてはるかに遅くなる（第10b図）。実際に実験において測定される水槽内の温度勾配は、mush/固体層境界付近で時間とともに緩やかになり、この点は熱伝導モデルから得られる温度プロフィールの時間変化に類似している。

組成対流が活発に起こっているにも関わらず熱が対流によって運ばれないという現象は、拡散係数の小さい「組成」の方が拡散速度の大きい「熱」よりも速く均質化するという、一見不思議な結果をもたらす。実は、この現象は、二重拡散対



第9図 実験結果の概要。縦軸に位置，横軸に温度をとって，固液境界面の移動の様子と，温度および液組成の変化の様子の対応関係を示す。実線は温度，破線はその場所の液組成におけるリキダス温度を示す。A: 上面実験。(a) 初期状態。(b) 活発の二対流層の形成。(c) 対流の継続と，水槽下面に結晶沈積層の形成。B: 下面実験。(a) 初期状態。(b) mush 層の形成と組成対流によるプリューム状対流の発生。(c) 組成対流によって液の温度がリキダス以上になっていく。C: 両面実験。(a) 初期状態。(b) 実験開始後～40分。(c) 40分以降、二重拡散対流による複数の対流層が形成する。

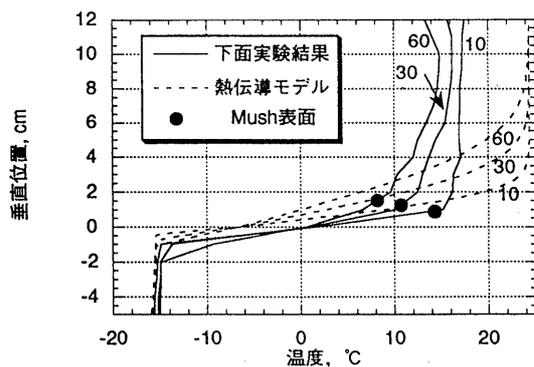
流（密度を変化させる要素が2種類ある場合の対流）のうち，密度を不安定化させる成分の拡散係数の方が小さい場合に普遍的な現象であり，これまでも多くの二成分共融系の下面からの結晶化実験などで報告されている（例えば，Chen and Turner, 1980; Tait and Jaupart, 1989, 1992; Chen and Chen, 1991; Chen et al., 1993 など）。この現象を理解するために，そもそも対流によって熱が運ばれるメカニズムについてもう少し考えてみよう。一般に対流している系では，上昇流と下降流で温度が違い，この温度差が対流による熱流を生み出すことになる。例えば，今回の実験のように密度を不安定化させる「組成」成分の拡散係数の方が密度を安定化させる「熱」の拡散係数よりはるかに小さい場合，細長いフィンガー状の低濃度低温プリュームが上昇する形で対流



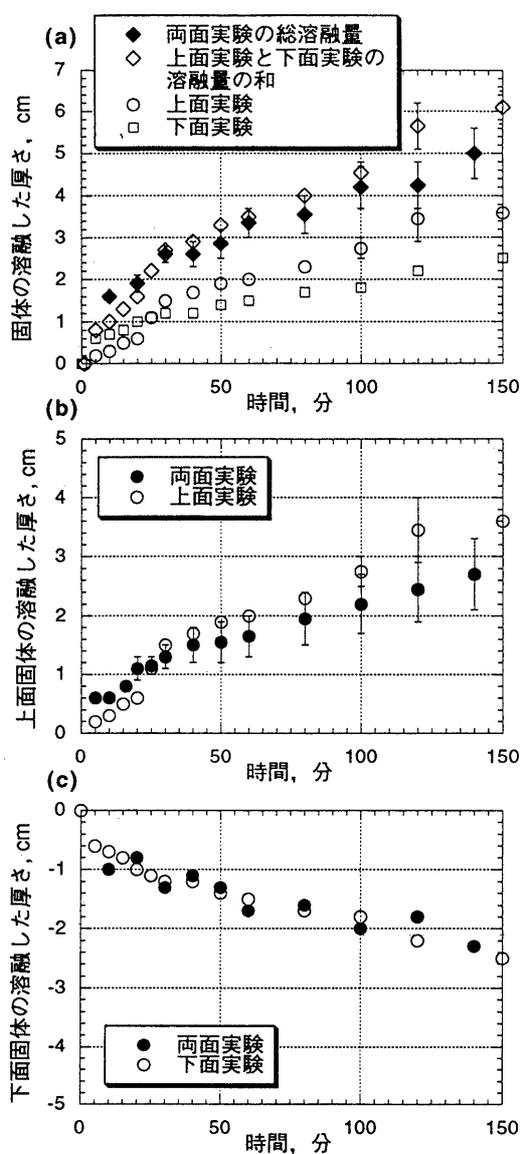
第10図 上面実験と下面実験の固液境界位置の時間変化とモデルの計算結果。○は実験結果。実線は活発な対流が起こっている場合，破線は熱伝導のみによる熱移動が起こっている場合のモデルの計算結果。(a) 上面実験。エラーバーは境界面の凹凸による測定の誤差を示す。実線は，元の液と固体の溶融によってできた液が分離した2液層を形成し，それぞれが活発に対流している場合のモデルの計算結果 (Huppert and Sparks, 1988b)。対流は上方からの冷却によって駆動される。(b) 下面実験。実線は，固体の溶融によってできた液が元の液と混合しつつ活発に対流している場合のモデルの計算結果。対流は溶解液の組成的な密度不安定によって駆動される。

が発生し，垂直方向の熱輸送をもたらす (Turner, 1979)。プリュームによって運ばれる熱は，プリュームの上昇速度と水平方向の熱の拡散のバランスで決まっており，プリュームの間隔や形態（特に径）などに依存する。プリュームの径が小さく，水平方向の温度不均質が伝導によって急速にならされると，プリュームによって熱を輸送することができなくなる。

今回の実験において mush 表面におけるプリュームの温度と周囲の液体の温度を比較したところ，プリュームの温度は周囲の温度よりわずかに (1~2°C) 低い。この温度差は mush/固体層境界と液体の平均的の温度の差 (約 25°C) に比べるとはるかに小さく mush 内部で急速に水平方向の温度の均質化がすすんでいることを示している。実験の温度プロ



第11図 下面実験における系の温度プロファイル。実線は実験結果、破線は熱伝導モデルによる予測を示す。数字は事件開始からの経過時間(分)、●はmush表面の位置を表す。



第12図 両面、上面、下面実験の溶融境界位置の時間変化の比較。エラーバーは境界面の凹凸による測定の誤差を示す。(a) 総溶融量の時間変化。(b) 両面実験と下面実験における上面溶融量の時間変化。(c) 両面実験と下面実験の下面溶融量の時間変化。

ファイルを見てみると、mush/固体層境界付近の温度勾配が熱伝導モデルから得られる温度プロファイルの時間変化に類似しているのに対して、液中では温度が一樣なままで時間とともに低下する(第11図)。このことは、組成対流は少なくとも液層中ではある程度熱を運んでいることを示している。

以上の結果から、上面実験と下面実験における熱物質移動の違いを整理すると、以下の2点にまとめることができる。

- (1) 上面の溶融によって生じた液は初期の液体とは混合せずに分離した液層を形成するが、下面境界の溶融によってできた液は初期の液体と混合し液層の組成全体が時間と共に変化する。
- (2) 上面では熱対流によって、下面では組成対流によって対流が駆動される。この違いは上面と下面の熱輸送メカニズムを根本的に変える。組成対流では、水平方向の温度の均質化が密度不安定をむしろ助長することになるので、垂直方向の熱輸送を伴わない対流運動を維持することができる。これに対して、熱対流では、下降流と上昇流の温度差そのものが対流を引き起こす原動力となっている。したがって、下降流と上昇流の温度差がなくなることは即ち対流が停止することを意味する。逆にいえば熱対流はかならず熱を輸送する。上面境界での溶融は主に熱対流による熱流量によって律速されるが、下面境界での溶融速度は対流が全くない場合の熱流量から予想されるものとそれほど違いがないのはこのためである。

## (2) 両面実験

両面実験では、上下両方の境界で同時に溶融が進行する。上面で溶融した液は下部の液体とは混合せずに分離したまま上部液層を形成し、2層構造をつくる(第9Cb図)。一方、下面境界では著しい温度勾配をもつmushが形成される。上部液層、下部液層はそれぞれの液層内部で活発な対流を行い、液の温度と組成は各層内部ではほぼ均質になっている。下部液層はリキダス温度に達しているため、結晶化はmushの内部や先端のみならず、下部液層内部からも進行し、液層内部で晶出した結晶はmush上に沈積する。実験開始から約40分程度のあいだは、液層中に2層構造を保ったまま系が進化する(図9Cb)。その後、下部液層において厚さ1~2cmの複数の二重拡散対流層が形成され、上位の対流層から徐々に温度が下がりはじめ、やがて全体で上部ほど低い温度分布を示す様になる(第9Cc図)。この二重拡散対流層は、密度の変化を与える複数の成分のうち、拡散係数が小さい方が密度を安定化させる方向に、また、拡散係数が大きい方が密度を不安定化させる方向に勾配を持った際に形成される(Turner, 1979)。全体としては安定な密度勾配を持つ系が、いくつかの層にわかれ、それぞれの層の内部では活発な対流によって各成分が均質に混合し、各層の間では各々の成分が拡散によって移動する。下面実験において上方にむかってNH<sub>4</sub>Cl濃度が減少する濃度勾配が生じたことを考慮に入れると、両面実験において、二重拡散対流層が形成される条件が満たされていることが理解される。

両面実験でみられる現象は、大局的には、前述した上面実

験と下面実験の結果を重ね合わせた現象としてとらえることができる。ここでは、上面冷却と下面冷却の相互作用について、「固体の溶融速度」という観点から整理する。実験ごとの溶融量を比較すると、両面実験の溶融量は上面実験と下面実験の各々の溶融量に比べると多いが、上面実験と下面実験の固体溶融量の和に比べると有意に少ない（第12a図）。内訳をみると、両面実験の下面固体の溶融速度は下面実験の溶融速度に比べて変化がないのに対して（第12c図）、両面実験における上面固体の溶融量は、上面実験に比べて溶融量は減少している（第12b図）。下面における固体の溶融量に変化が見られないことは、両面実験において、(1) 下面実験と同様、下面境界で発生する組成対流の熱輸送に対する寄与が重要でなかったこと、(2) 上面の冷却によって形成される熱対流が mush を越えて下面まで到達できなかったこと、の2点によって説明できる。このような状況下では、液層内部の対流状態の違いによる温度変化の影響は、下面付近（具体的には mush 内部およびその下方）では、熱の拡散のみによって伝達される。この過程は非常に遅いため、実験時間の範囲で、mush/固体層境界の熱流量に影響をあたえることができなかったものと考えられる。一方、両面実験における上面固体の溶融は、上面実験と同様、上面境界への熱対流による熱流量によって律速されている。液から境界への熱流量は境界における固液の温度差によって決まっている（式(4a)参照）。従って、上面での溶融量が減少していることは、両面実験で相対的に上部液層の温度が低下していることに対応している。上部液層の温度が低下した原因としては、下面からの冷却によって下部液層の温度が全体として下がったことに加えて、二重拡散対流によって下部液層に温度の低い中間層が形成されたこと、の2つが考えられる。先にも述べたように、二重拡散対流層は下面で発生した組成対流によって液層内部に組成勾配ができたことによって形成されたものである。つまり、下面で発生した組成対流は、直接的に熱を輸送することに対する寄与は小さいが、間接的に上面での熱移動に対して影響を与えていると考えることができる。

#### 4. 実験結果のマグマシステムへの応用

アナログ実験の結果にもとづいて上面と下面の熱物質移動がそれぞれマグマシステムの進化においてどのような役割をはたすか簡潔に整理してみよう。思考実験の結果によるとマグマシステムの熱進化は急冷期と徐冷期にわかれる。また、急冷期になるか徐冷期になるかは、溶融が活発な対流による熱流に律速されて進行するか否かによる。この基準を実験結果にあてはめると、マグマシステムが急冷期の状態で進化するのは、マグマの温度が上面の地殻の融点より高い場合に限られることがわかる。下面で発生する組成対流は、有効な熱の輸送メカニズムではない。そのため、下面への熱流量は、マグマと地殻が接した直後において下面付近に生ずる大きな温度勾配ゆえ大きな値を持つが、時間とともに温度勾配が緩やかになるにつれ急速に減少する。したがって、急冷期全体では、下面への熱移動は、急速な溶融やマグマの冷却には貢献しないであろう（第2節、第4図参照）。アナログ実験の

結果では、上面固体と下面固体の溶融量が一見大きく違わないように見える（第12図）。これは、アナログ実験における液量が少なかったためである。液量が少ない程、液から上面への同じ熱流量に対して、液の温度は大きく低下し、それに対応して上面への熱流量は減少する（式(4a)参照）。アナログ実験では、液温度の低下に対応して減少する上面への熱流量が、初期に大きな値をもち時間とともに急速に減少していく下面への熱流量と大きく変わらなかったと考えられる。マグマシステムの下面地殻における溶融の最も重要な役割は、溶融液がマグマと混合することによって、マグマの組成の分化経路に影響を与えることである。また、マグマ溜り中に組成勾配をつくることによって二重拡散対流層の形成を促し、上面境界への対流による熱流を減少させる効果がある。

ここで重要なことは、徐冷期におけるマグマシステムの中でどのようなマグマが液体状態として存在しうるかという問題である。いま最もありそうな状況として、高温マグマ（例えば玄武岩質マグマ）が低 EFT 地殻（例えば花崗岩～閃緑岩質地殻）に貫入した後の進化について考えてみよう。高温マグマが地殻に貫入すると、地殻の温度はマグマからの熱の供給によって上昇し、上面の地殻が EFT に達すると地殻は溶融し、珪長質マグマを形成する。この珪長質マグマは供給されたマグマと混合せずに分離したマグマの対流層を形成するであろう。珪長質マグマの温度が地殻 EFT 以上にある間は、対流によって急速に溶融が進行し、また、マグマの温度は急速に減少する（急冷期）。マグマの温度が地殻の EFT に達すると、急速な溶融がおわり徐冷期に入る。従って、徐冷期のマグマの状態を知るためには、このシナリオの中でマグマの温度が上面の地殻の EFT に達したときの状態を知ればよい。

天然の地殻の EFT としては部分溶融量が増加し事実上液体として振る舞う温度に設定するのが合理的であろう（Huppert and Sparks, 1988b; 第2節参照）。一般に部分溶融した地殻（あるいは結晶化しつつあるマグマ）の温度と結晶量の関係はバルクの化学組成を決定した場合一意的に決まる。したがって、もし、地殻の溶融の際に固液が分離せず、さらに、溶融でできたマグマがその後全く分化しなかった場合には、そのマグマの EFT は地殻の EFT と同じ値を持つことになる。つまり、マグマの温度が地殻の EFT まで低下したときには、EFT の定義により、マグマは事実上固結していることになる。実際には、溶融の際や溶融後に必ずなんらかの分化が起こる筈であるから、溶融でできたマグマの EFT は地殻の EFT よりかならず低くなるであろう。つまり徐冷期のマグマの性質を第一次近似的に決定しているのは、供給されたマグマの分化ではなく、溶融してできたマグマの地殻の溶融の際やその後の分化である、と結論づけることができる。

上記の考え方にはあてはまらない、やや例外的ではあるが、重要な場合として、地殻が厳密な意味で共融点組成をもっているような状況がある。この場合、溶融によって形成したマグマの結晶量は共融点温度で0から100%まで変化する。つまり、このような溶融によって形成されたマグマは徐冷期に

達した時点で100%液体状態であることになる。このことは共融点組成の流紋岩質（花崗岩質）マグマは地殻内で液体状態で長時間存在し続けることができるということを意味する。

### 5. 結 語

我々は、今回の一連の研究によって「何か問題を解決した」という達成感を得るにはいたっていない。最大限に甘い自己評価をくださったところで、「地殻の進化を考察するうえで重要な課題をそれなりに明確な形で示すことができた」といったところであろう。具体的に最も歯痒いことは、今回の実験では共融点組成の固体をつかったため、最も本質的である「溶融の際の分化の影響」を議論することができなかったことである。実は、このような実験が進行していないのは、我々の怠慢のせいであるばかりではなく、問題が質的に新しい困難に直面しつつあるせいでもある。部分溶融しつつある境界での分化過程は地殻物質の結晶組織などにも大きな影響を受けると考えられるため（例えば、Campbell and Turner, 1987）、仮にアナログ実験を行ったとしても、定量的評価が非常に難しい。同様な困難は、下面冷却などの実験で観察された mush 中での組成対流の形状（たとえばプリュームの径）の影響を見積る際にすでに表面化している。これらの問題を解決するためには、小手先の工夫だけではなく、現在我々が用いている実験的理論的方法論について、もっと根本的なレベルでの見直しが必要となるであろう。

### 謝 辞

本論文をまとめるに際し、神戸大学の佐藤博明教授、地質調査所の高田亮博士、および匿名の査読者の方から、有益なコメントをいただきました。本研究を行うに当たって、文部省の科学研究費補助金重点領域研究マグマ（課題番号07211206）と日本学術振興会特別研究員科学研究費補助金を使用した。

### 文 献

- Campbell, I.H., 1986, A fluid dynamic model for potholes of the Merensky Reef. *Econo. Geol.*, **81**, 1181-1125.
- Campbell, I.H. and Turner, J.S., 1987, A laboratory investigation of assimilation at the top of a basaltic magma chamber. *Jour. Geology*, **95**, 155-172.
- Chen, C.F. and Turner, J.S., 1980, Crystallization in a double-diffusive system. *Jour. Geoph. Res.*, **74**, 7531-7542.
- Chen, C.F. and Chen, F., 1991, Experimental study of directional solidification of aqueous ammonium chloride solution. *Jour. Fluid Mech.*, **227**, 567-586.
- Chen, F., Yang, T.L., and Lu, J.W., 1993, Influence of convection on solidification of binary solutions cooling from below. *Jour. Appl. Phys.*, **74**, 7531-7542.
- Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J., 1988a, Melting the roof of a chamber containing a hot, turbulently convecting fluid. *Jour. Fluid Mech.*, **188**, 107-131.
- Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J., 1988b, The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Jour. Petrol.*, **29**, 599-624.
- Kerr, R.C., 1994, Melting driven by vigorous compositional convection. *Jour. Fluid Mech.*, **280**, 255-285.
- Marsh, B.D., 1981, On the crystallinity, probability of occurrence and rheology of lavas and magma. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 85-98.
- Molen, van der, I. and Paterson, M.S., 1979, Experimental deformation of partially-melted granite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 299-318.
- Shaw, H.R., 1980, The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. In: Hargreaves, R.B., ed., *Physics of Magmatic Processes*. Princeton University Press 201-64.
- Tait, S. and Jaupart, C., 1989, Compositional convection in viscous melts. *Nature*, **338**, 571-574.
- Tait, S. and Jaupart, C., 1992, Compositional convection in a reactive crystalline mush and melt differentiation. *Jour. Geoph. Res.*, **97**, 6735-6756.
- Turner, J.S., 1979, *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press. p 368
- Woods, A.W., 1991, Fluid mixing during melting. *Phys. Fluids*, **A3(5)**, 1393-1404.

## (要 旨)

金子克哉, 小屋口剛博, 1996, マグマ供給システムの自己制御機構 — 観測量と力学的モデルとの比較 —, 地質学論集, 46, 29-41. (Kaneko K. and Koyaguchi T., 1996, Evolution of magma system in the crust - Investigations based on thought experiments and analogue experiments -. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 46, 29-41.)

大陸地殻中のマグマの熱物質進化は、地殻の溶融とマグマの対流によって大きな影響を受ける。高温液と低温固体間の熱移動について数値計算を行った結果、活発な対流による溶融が進行している場合、それ以外の条件にくらべて、液の冷却速度が著しく大きくなることが分かった。マグマ溜まりの上面と下面において地殻の溶融やマグマの対流が起こる条件を決定するために、 $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$  の二成分共融系を用いてアナログ実験を行った。その結果、上面では、急速な溶融と活発な熱対流が起こるのに対し、下面では、熱が効果的に輸送されず、相対的にゆっくりした溶融と組成対流が起こることがわかった。また、上面の溶融によって生成した密度の小さい液は、その下の液とは混合せずに分離した液層を形成するのに対し、下面の溶融で生成した液は上の液と混合する、という違いが観察された。これらの結果を大陸地殻中に貫入した玄武岩質マグマに応用すると、(1) 貫入直後に、上面固体の溶融によって玄武岩マグマとは化学的に分離した珪長質マグマが急速にできる、(2) 両方のマグマは、地殻の融点に達するまでは急冷するが、その後、冷却速度が遅くなる、(3) 玄武岩マグマは下面での溶融液と混合するため分化経路が変化する、などの熱物質進化がおこることが予想される。