

ウラン系列短寿命核種を用いた地殻下におけるマグマ進化の
時間スケールの解明—研究の現状と課題—

栗谷 豪***

Timescales of magmatic evolution in crustal magma chambers constrained
from U-series radioactive disequilibria: A brief review

Takeshi KURITANI*

1. はじめに

低温の地殻内に高温のマグマが定置すると、マグマは周縁部から冷却されて結晶化が進行する。このような、マグマから地殻への不可逆的な熱輸送の結果、マグマ溜まり内やその周辺部では様々な密度不安定が生じ、熱対流・組成対流・結晶とメルトの相對運動・地殻の部分熔融及び熔融メルトの輸送といった、熱や物質の移動が自発的に起きる (Fig. 1)。そして、それらの過程が互いに結合しながら、その結果としてマグマは熱や物質的に進化する (例えば、Jaupart and Tait, 1995)。マグマ溜まり内におけるマグマの進化過程は、地表に噴出するマグマの多様性の形成過程を理解するためだけでなく、火山噴火予知を念頭に、活火山下のマグマ溜まりの状態変化を理解する上でも重要である。そこで、マグマの熱・物質進化過程を定量的に理解するため、マグマのダイナミクスについての流体力学的研究がこれまで活発に行われてきた (例えば、Campbell and Turner, 1987; Jellinek and Kerr, 1999; Kaneko and Koyaguchi, 2000; Kerr and Tait, 1985; Tait and Jaupart, 1989; Turner *et al.*, 1986)。またその一方で、天然から直接マグマの進化を支配する要素を抽出するべく、主に貫入岩体を対象とした物質科学的研究も古くから行われている (例えば、Hess, 1972; McBirney, 1995; Shirley, 1987; Simura and Ozawa, 2006)。

このように、マグマ溜まり内におけるマグマの進化過

程の理解を目指した研究はこれまで盛んに行われてきたが、残念ながら、今のところ定量的な理解が十分に進んでいるとは言い難い。これは、流体力学的研究に基づくモデルの、物質科学的研究による検証が十分に行われていないことが一つの大きな要因であると考えられる。このため著者は、物質科学的研究の対象として、マグマ溜まりの固結過程の積分的情報しか与えない貫入岩体ではなく、マグマ溜まり内におけるマグマの状態を凍結し、かつマグマ進化の時間スケールについての直接的な情報を与えうる火山噴出物に着目して、これまで研究を進めてきた (例えば、Kuritani, 1999; Kuritani *et al.*, 2005)。その一方で、火山噴出物の時間分解能の高さに着目し、ウラン系列短寿命核種を用いてマグマ溜まり過程に時間軸を挿入する試みが、近年おもに地球化学の分野で注目を集めている。このような、物質科学的手法に基づいて明らかにされるマグマプロセスの時間スケールは、流体力学的モデルの検証において決定的に重要な役割を果たすことが期待される。そこで本稿では、ウラン系列核種の放射非平衡を利用して、マグマ進化の時間スケールの理解を目指して行われてきた研究について、それらの手法を簡単に紹介し、また「流体力学的モデルの検証に使える時間的情報の抽出」を強く意識した視点から、研究の現状や問題点などについてまとめる。

* 〒874-0903 大分県別府市野口原
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設
Institute for Geothermal Sciences, Graduate School
of Science, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu,
Oita 874-0903, Japan

** 現所属: 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
東北大学大学院理学研究科地学専攻

Present address: Department of Earth and Planetary
Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku
University, Aoba 6-3, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
980-8578, Japan.

e-mail: kuritani@mail.tains.tohoku.ac.jp
平成 17 年度日本火山学会研究奨励賞受賞

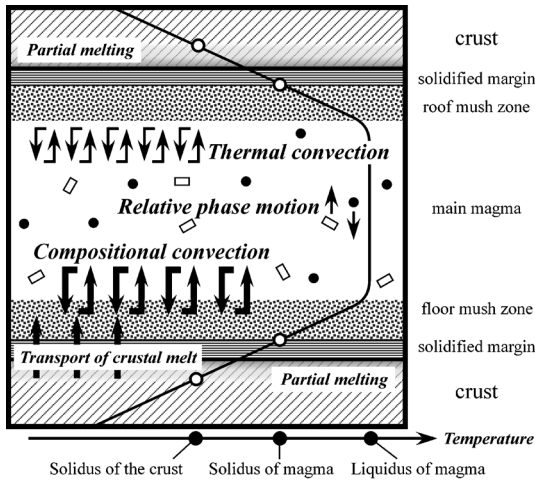


Fig. 1. Schematic illustration of a magma chamber, showing the inferred mechanisms of magmatic processes. Schematic temperature profile is also shown.

2. ウラン系列短寿命核種を用いたマグマ進化の時間スケールの理解

2-1 原理

^{238}U , ^{235}U 及び ^{232}Th といった長寿命の放射性核種から始まる放射壊変は、いくつかの種類の元素を経て鉛同位体に至る。それらの放射壊変系列において、娘核種の半減期が親核種の半減期よりもはるかに短いという条件を満たす親核種・娘核種のペアについて、定常状態が成立（娘核種の半減期の約 6 倍以上の時間が経過）していれば、両者の放射能（ $=\lambda N$; λ : 壊変定数, N : 原子数）が等しくなる（放射平衡）。しかし、マントルや地殻の部分溶融・マグマの結晶化などで、親核種と娘核種との分別が引き起こされると、放射平衡の状態が崩れる。そして、娘核種の半減期の約 6 倍程度の時間をかけて、再び放射平衡の状態へ戻ろうとする。そこで、この「放射平衡への戻り具合」を利用して年代測定を行うことができる。例えば、 ^{238}U - ^{230}Th の親核種-娘核種のペア（実際にはその間にいくつかの核種が存在する）の場合、その移行状態を記述する式は

$$\left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}\right) = \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{232}\text{Th}}\right) (1 - e^{-\lambda_{230\text{Th}} \cdot t}) + \left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}\right)_0 e^{-\lambda_{230\text{Th}} \cdot t} \quad (1)$$

と表現される。この式において、 $\lambda_{230\text{Th}}$ は ^{230}Th の壊変定数、下つきの 0 は U と Th の元素分別が起きた時点をあらわす（分母の ^{232}Th は ^{238}U - ^{230}Th 系の時間スケールでは安定同位体とみなせるため、reference として用いられ

る）。なお、括弧は放射能をあらわし、例えば $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ は ^{230}Th と ^{232}Th の原子数の比であるのに対し、 $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ は ^{230}Th と ^{232}Th の放射能比である。ここで例えば、 t が次第に大きくなると $e^{-\lambda_{230\text{Th}} \cdot t}$ は 0 に漸近し、半減期の 6 倍程度の時間が経過すると ^{230}Th と ^{238}U の放射能がほぼ等しくなることがわかる（半減期 $= \ln 2 / \lambda$ であることに留意）。

ウラン系列短寿命核種がマグマプロセスの時間軸の挿入において注目される理由は、その半減期にある。例えば、 ^{238}U - ^{230}Th のペアの場合、 ^{230}Th の半減期が約 7 万 5 千年であるため、約 1 万年～40 万年前のマグマのイベントに対応することができ、これは一般的な火山の一生の時間スケールと同じオーダーである。また ^{230}Th - ^{226}Ra のペアは、現在から遡って、さらに短い時間スケール（100～8000 年前）のマグマプロセスの時間軸挿入に利用することが可能である。また、これら以外に ^{226}Ra - ^{210}Pb 法や ^{232}Th - ^{228}Ra 法などは原理的には 100 年以下のプロセスに対応することができる。なお、ウラン系列放射非平衡の原理のさらなる詳細については、例えば Bourdon *et al.* (2003) などを参照していただきたい。また邦文では、ウラン系列放射非平衡の原理に加え、マントルプロセスへの応用や分析法などについて、横山 (2005) に簡潔にまとめられている。

2-2 鉱物アイソクロン年代

マグマ溜まり内のマグマがどのように熱・物質的に進化するかを明確に理解する上で最も理想的である研究対象のひとつは、はじめに地殻内に位置したマグマが、基本的に閉鎖系として一連の冷却過程で進化し、さらにマグマ溜まり内のマグマが噴火活動を通して時々地表に「サンプリング」される、というようなケースであろう。その際、個々の噴火活動の年代を知ることができれば、マグマの進化を時間の関数として理解するための大きな手がかりを得ることができる。

このことから、Rb-Sr 系や Sm-Nd 系と同様、鉱物アイソクロンを用いた火山岩の噴出年代の推定が、ウラン系列放射非平衡を用いた研究の初期から期待されてきた (Allègre, 1968; Kigoshi, 1967)。例として、 ^{238}U - ^{230}Th 系の鉱物アイソクロンの模式図を (Fig. 2) に示す。 $T=0$ において、マグマ（黒丸）からメルト-結晶間の U/Th 比の分配が異なる結晶 (A, B, C) が晶出したとする。その際、マグマのような高温条件下ではトリウム同位体の分別は起きないため、 $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ 比は変化せずに $(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})$ 比のみが分別して、鉱物組成は図に示すようにマグマの組成とともに水平線上に並ぶ (A_0, B_0, C_0)。その後、トリウム同位体比は式 (1) に従って時間変化するが、その一方で U/Th 比は、 ^{230}Th の半減期のオーダーの

準備において鉍物分離が必要でなく、多量の試料を用いて高精度の分析データを容易に得ることができるため、鉍物アイソクロンに基づく手法に比べてはるかに優れた方法であるといえる。しかし実際には「噴火前後にU/Th比を変化させる過程」に限られるため、ほとんど利用されていない。

数少ないケースとして、噴火直後の溶岩流からの脱ガスに伴うU-Th分別(Uの選択的分別)を利用して、無斑晶質な安山岩質溶岩流の噴火年代を得た例がある(Kuritani *et al.*, submitted)。また、粘性が低く比較的厚い溶岩流には、固結中に分化体が形成されることがあるが(例えば、Kuno, 1965; Philpotts *et al.*, 1996; 吉田ほか, 1981)、その形成過程において引き起こされる可能性がある親核種-娘核種間の分別も、将来的に噴火年代の決定に利用できるかもしれない。噴火年代を与えるわけではないが、マグマ溜まり内におけるマグマと熱水等の流体との混合によって引き起こされるU/Th比の変化(Villemant and Fléhoc, 1989)や、長石の分別によって引き起こされるRa/Th比の変化(Evans, 1999)などによって形成される全岩アイソクロンから、それらの過程がおきた年代値を推定した例が存在する。

2-4 モデル年代

上述のように、火山岩からマグマ進化の時間スケールを理解するには、同一のマグマ溜まり内において一連の冷却過程で進化した、未分化マグマ(親マグマ)と分化マグマ(娘マグマ)の両方を火山噴出物として手に入れることができる、という研究対象が理想的であるが、実際にはそのようなケースは少ない。そこで、例えば分化マグマのみが噴出している場合には、本来の親マグマの同位体比($^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ 系の場合には $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比)は、分化マグマの噴出後に新たに噴出した(つまり、真の親子関係ではない)始源的な特徴をもつ玄武岩マグマの同位体比と等しかったと考えて、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比の変化から分化に要した時間スケールを推定する試みが行われている(Bourdon *et al.*, 1994; Widom *et al.*, 1992)。また同じ原理を利用して、過去に噴出した玄武岩マグマの年代の推定も行われている(Condomines *et al.*, 1988)。

例えば、 $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ 系におけるモデル年代の模式図を(Fig. 3)に示す。最も単純なケースとして、放射平衡の状態にあるソースマントル(黒ダイヤ)の部分熔融によって、マントルとはトリウム同位体比が常に等しいがU/Th比は異なるマグマ(黒丸)が生成される、という場合を考える。マントルから地殻へのマグマの上昇速度が ^{230}Th の壊変に比べて無視できるほど速ければ(Turner *et al.*, 2001)、地殻内における始源的マグマの組成も黒丸で近似することができる。ここで、噴出年代が既知であ

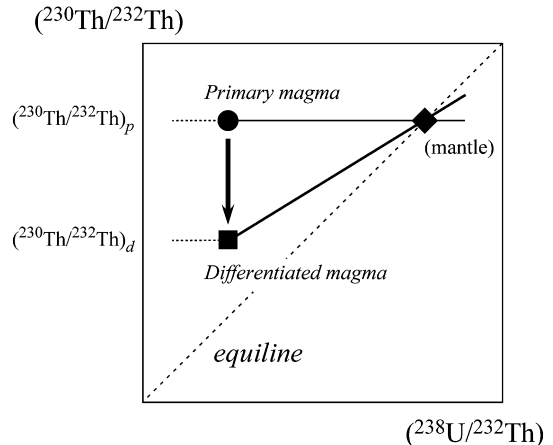


Fig. 3. A U-Th equiline diagram, illustrating the principle to obtain a model age. See text for details.

る娘マグマに相当する火山岩の、噴火時の $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ 比を $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_d$ とする(黒四角)。また、同じく噴出年代が既知である、始源的な特徴をもつ手持ちの玄武岩の、噴火時における $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ 比を $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_p$ として、娘マグマの実際の(活動年代が未知で、かつ火山岩として手に入らない)親マグマ(=始源的マグマ)も過去には同じトリウム同位体比を持っていたとする。閉鎖系の結晶分化作用でマグマが組成進化した場合、一部の例外を除いてU/Th比はほとんど変化しないため、親マグマの $(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})$ 比は娘マグマのそれと等しかったと考える(黒丸)。この場合、式(1)の $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ に $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_d$ を、 $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_0$ に $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_p$ を代入して解くことにより、トリウム同位体比の変化に要する時間(=分化の時間スケール)を得ることができる。

なお、この手法を用いるにあたっては、娘マグマが実際に閉鎖系での結晶分化作用で形成されたかということについて、岩石学的・地球化学的に慎重に検討する必要がある。また、モデルの前提である、同一火山では始源的マグマは同じトリウム同位体比をもつという仮定について、現在のところ明確に否定するような事例は報告されていないようであるが、議論の余地が残るところである。この仮定には、ソースマントルが地球化学的に均質であり、さらにマグマの発生メカニズムが同じであるという条件が暗に含まれている。しかし、島弧に限っても、ソースマントルのトリウム同位体比がどのように獲得されたのかについては、現在も議論が続いている(例えば、Elliott *et al.*, 1997; Kessel *et al.*, 2005; Yokoyama *et al.*, 2003)。また、発生したマグマの、マントルからの分離・上昇中に、そのメカニズムに依存してトリウム同位体比

が変化する可能性があるが (Iwamori, 1994; McKenzie, 1985; Spiegelman and Elliott, 1993), 島弧の個々の火山下で具体的にどうなっているかについてはよく分かっていない。

2-5 全岩の化学組成バリエーション

上記以外にマグマ進化の時間スケールを考察する手法の例として, 放射壊変の効果を考慮した結晶分化作用の質量保存モデルを構築し, 実際に観察される火山岩の組成トレンドとモデル計算とを比較して, 結晶分化の速さを推定するという方法がある (Blake and Rogers, 2005; Rogers *et al.*, 2004; Vigier *et al.*, 1999). 例として Fig. 4 には, ^{230}Th - ^{226}Ra 系における本手法の概略図を示してある. 親マグマの ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) を 2 とし, その他の火山岩試料の組成を F 値 (各マグマと初期マグマの質量比) の関数として示してある. 斜長石が重要な分別相の一つである場合, Ra は比較的斜長石に分配されやすいため, Ra の放射壊変を無視した場合でも結晶分化作用により ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 比は減少することになる (図の F.C. のトレンド). ここで例えば, 結晶分別の速さが Ra の放射壊変の速さ (半減期: 約 1600 年) に比べて十分に遅い場合, 過剰の ^{226}Ra は斜長石結晶に取り込まれる前に壊変してしまうので, マグマの分化の初期に ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 比は放射平衡 (=1) に漸近する. 一方, 結晶分別の速さが Ra の放射壊変の速さに比べて十分に速い場合は, Ra の放射壊変を無視したトレンドに近づくため, マグマの分化を通して, ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 比はさほど減少しない. そこで, このような特徴を利用して, 観察データに最もよく適合する結晶分別速度を推定することができる (例えば, 図の点線).

この手法は巧妙で魅力的であるが, その一方で, 意味のある情報を抽出するには, モデルを適用する際の条件について, 十分に吟味する必要がある. 例えば, 閉鎖系の結晶分化作用のモデルを適用する際には, 当然のことながら, 地殻等との物質的なやりとりの有無について慎重に評価しなければならない. しかし, マグマの Sr , Nd , Pb 同位体比が均質であり, これらの同位体からは地殻物質の混入が検知できない場合であっても, 実際にはマグマとは異なった ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 比をもつ地殻物質が混入しているケースもあり (Yokoyama *et al.*, 2006), その評価は簡単ではないことが多い. もちろん, 放射壊変を考慮した結晶分化モデルを拡張して地殻物質の混入を組み込むことは可能であるが (Yokoyama *et al.*, 2006), その場合には地殻物質の ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 比やその混入量など, 新たに推定すべき変数が増えることになる. また, マグマが閉鎖系の結晶分化作用で組成進化したことが明らかであっても, そもそも観察データが何を表している

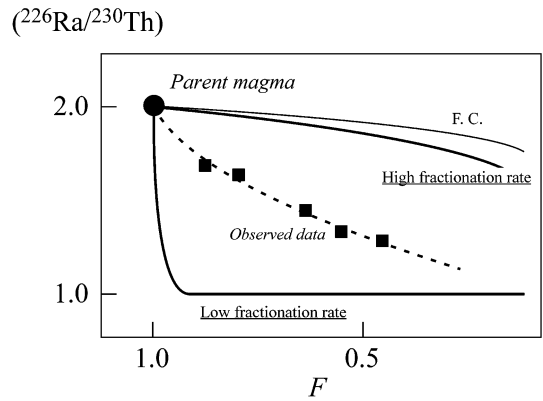


Fig. 4. A schematic ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) - F (the mass of remaining magma relative to the initial mass of magma) diagram, in which possible fractionation curves are shown. Filled circle indicates a parental magma, and filled squares represent observed lava compositions. A model curve for the observed compositions is schematically shown with a broken line. A fractionation curve indicated with F.C. is for the case of instantaneous fractional crystallization.

のかを吟味することが非常に重要である. 例えば, 図4で示したような観察データの組成トレンドが, マグマ溜まり内の均質なマグマの時間変化を表しているのか, ある固定された時間における不均質なマグマの, マグマ溜まり内での空間変化を表しているのかで, モデル計算から得られる情報の意味合いが全く異なる.

3. マグマ進化の時間スケール

本節では, 上述の問題点と照らし合わせた上で, 比較的明確にマグマ進化の時間スケールを与えている研究例をいくつか紹介する. まず Widom *et al.* (1992) は, Azores 諸島の Sao Miguel 島に産するトラカイト (噴出量: $0.6\text{--}0.7\text{ km}^3$) について, 仮想的な親マグマ (アルカリ玄武岩) からの組成分化 (分別結晶量: 72 wt.%) に約 9 万年の時間を要していたことを, 上述のモデル年代を用いた手法で明らかにした. 親マグマから娘マグマを導くのに必要な分別結晶量を分化に要する時間で割った値を「結晶分別率= α 」と定義すると, その値は $8 \times 10^{-6}\text{ y}^{-1}$ となる. Bourdon *et al.* (1994) はドイツの Laacher See 地域に産する phonolite (約 5 km^3) について, 同じくモデル年代を用いた手法により, 想定される親マグマ (basanite) からの分化 (分別結晶量: 約 70 wt.%) に 10 年以上の時間が必要であったことを示した ($\alpha < 7 \times 10^{-6}\text{ y}^{-1}$). ただし, 地殻深部に存在したマグマ溜まりと浅部に存在し

たマグマ溜まりにおいて2段階で組成進化したと考えられるため、得られた時間スケールの解釈は簡単ではない。Turner *et al.* (2003b) は、インドネシアの Sangeang Api 火山に産する安山岩 (0.01–0.1 km³) について、玄武岩からの組成進化 (分別結晶量: 約 70 wt.%) に 2000 年程度要していたことを全岩の (²²⁶Ra/²³⁰Th) 比の変化を用いて示した ($\alpha = 4 \times 10^{-4} \text{y}^{-1}$)。Johansen *et al.* (2005) は、カナリア諸島の La Palma において、同じく全岩の (²²⁶Ra/²³⁰Th) 比の変化の制約を用いて、basanite から phonolite (約 0.03 km³) への組成進化 (分別結晶量: 約 60 wt.%) に 1550–1750 年を要していたと考えた ($\alpha = 4 \times 10^{-4} \text{y}^{-1}$)。Kuritani *et al.* (submitted) は利尻火山において、アルカリ玄武岩質溶岩流 (約 3 km³) の ¹⁴C 法に基づく噴出年代 (2 万 9 千年前) と安山岩質溶岩流 (約 0.1 km³) の ²³⁸U-²³⁰Th 系の全岩アイソクロンに基づく噴出年代 (2 万年前) との差から、マグマ進化 (分別結晶量: 62 wt.%) に 9 千年程度の時間を要していたことを明らかにした ($\alpha = 7 \times 10^{-5} \text{y}^{-1}$)。

これらの限られた情報を用いて、マグマ進化の時間スケールについて一般的な議論を行うのは難しい。しかし、娘マグマの噴出量と結晶分別率には負の相関があり、噴出量が大いほど結晶分別率が減少する傾向がある。実際にはマグマ溜まり周囲の地殻の温度やマグマそのものの物性にも大きく依存するため解釈は簡単ではないが、大きなマグマ溜まりほどマグマの冷却速度が小さいことを反映しているのかもしれない。今後は、このような観察事実をさらに積み重ねることで、マグマ溜まり内におけるマグマの進化を支配するダイナミクスについて、定量的な理解がさらに進むと期待される。

ウラン系列短寿命核種を用いてマグマ進化の時間スケールを理解する試みは、分析技術が向上した約 20 年前から特に活発に行われるようになってきているが、現在のところ、研究の量・質ともに、まだまだ十分であるとは言いがたい状況である。研究の量が限られる原因は、ウラン系列短寿命核種の分析を行うことができる研究施設が世界中でもまだ少ないことや、マグマ溜まり過程が一般に複雑であるため、マグマ進化の時間スケールの理解に適した調査対象が少ないことなどが挙げられる。非常に小規模なマグマ溜まりを除くと、地殻内におけるマグマ溜まりの固結の時間スケールは 10³–10⁵ 年程度であると考えられる。しかし、その時間スケール内に新たなマグマの貫入イベントが複数回起きると、噴出物の解析が複雑になり、マグマの進化について、意味のある時間スケールの情報を抽出することが著しく困難になる。一方で、研究の質が限られる原因は、ウラン系列短寿命核種の制約を適用する火山噴出物の対象において、本来あら

かじめ行っておくべき詳細な地質学・岩石学・鉱物学・地球化学的検討が明らかに欠如しているケースが多いことである。そのため、ウラン系列短寿命核種について高精度のデータが得られても、データの誤った解釈を行い、結果として混乱を引き起こすケースが多々見られる。

このようにウラン系列短寿命核種を用いた研究には乗り越えるべき問題や課題も多いが、ウラン系列核種の放射非平衡は、物質科学的手法でマグマ進化の時間スケールを解明するにあたっては、絶対時間を与えうるという点で、まぎれもなく強力な魅力的な武器である。今後も引き続き、明確な目的意識をもって天然の調査対象の取捨選択を行い、かつ噴出物の詳細な岩石学的・鉱物学的・地球化学的解析を組み合わせ、ウラン系列短寿命核種を用いたマグマ進化の時間スケールの研究がさらに活発に行われることを期待したい。

謝 辞

本稿は、平成 17 年度日本火山学会研究奨励賞の受賞を機に執筆の機会を与えて頂いたものである。受賞にあたり、岩森光助教授及び日本火山学会の関係者の皆様には大変お世話になりました。また、受賞の対象となった研究の遂行にあたり、小澤一仁教授、永原裕子教授、中村栄三教授、佐藤博明教授、宮本英昭助教授、田中亮吏博士、横山哲也博士をはじめ、多数の方々にご指導や議論を通してお世話になりました。ここに御礼申し上げます。岡山大学地球物質科学研究センターや東京大学大学院理学系研究科地質学専攻の在籍時には、先輩方、同僚、学生、支援員の皆様と、研究上の議論や励まし等を通してお世話になりました。深く感謝致します。研究の遂行において、日本学術振興会特別研究員奨励費、21 世紀 COE 研究拠点形成補助金 (岡山大学地球物質科学研究センター)、科学研究費補助金 (課題番号 17740351) などの研究費を使用しました。感謝致します。また、小澤一仁教授、横山哲也博士、査読者の方々には、本稿を改善する上で有益なコメントを頂きました。御礼申し上げます。

引用文献

- Allègre, C.J. (1968) ²³⁰Th dating of volcanic rocks. a comment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **5**, 209–210.
- Black, S., Macdonald, R., DeVivo, B., Kilburn, C.R.J. and Rolandi, G. (1998) U-series disequilibria in young (A.D. 1944) Vesuvius rocks: preliminary implications for magma residence times and volatile addition. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **82**, 97–111.
- Blake, S and Rogers, N. (2005) Magma differentiation rates from (²²⁶Ra/²³⁰Th) and the size and power output of magma chambers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 654–669.

- Bourdon, B., Zindler, A. and Wörner, G. (1994) Evolution of the Laacher See magma chamber: evidence from SIMS and TIMS measurements of U-Th disequilibria in minerals and glasses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **126**, 75–90.
- Bourdon, B., Turner, S., Henderson, G.M. and Lundstrom, C.C. (2003) Introduction to U-series Geochemistry. In Uranium-Series Geochemistry (Bourdon, G.M., Henderson, G.M., Lundstrom, C.C. and Turner, S.P. eds), 1–21, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **52**, Geological Society, Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Campbell, I.H. and Turner, J.S. (1987) A laboratory investigation of assimilation at the top of a basaltic magma chamber. *J. Geol.*, **95**, 155–172.
- Charlier, B. and Zellmer, G. (2000) Some remarks on U-Th mineral ages from igneous rocks with prolonged crystallization histories. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **183**, 457–469.
- Condomines, M. (1997) Dating recent volcanic rocks through ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium in accessory minerals: example of the Puy de Dôme (French Massif Central). *Geology*, **25**, 375–378.
- Condomines, M., Hemond, C. and Allègre, C. J. (1988) U-Th-Ra radioactive disequilibria and magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **90**, 243–262.
- Condomines, M., Gauthier, P.-J., and Sigmarsson, O. (2003) Timescales of magma chamber processes and dating of young volcanic rocks. In Uranium-Series Geochemistry (Bourdon, G. M., Henderson, G. M., Lundstrom, C. C. and Turner, S. P. eds), 125–174, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **52**, Geological Society, Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Cooper, K.M., Reid, M.R., Murrell, M.T. and Clague, D. A. (2001) Crystal and magma residence at Kilauea Volcano, Hawaii: ^{230}Th - ^{226}Ra dating of the 1955 east rift eruption. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 703–718.
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W. and Bourdon, B. (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.*, **102**, 14991–15019.
- Evans, P. (1999) A U-series disequilibrium study of the Longonot trachyte magma chamber, Kenya. Ph.D. Thesis, The Open University, Milton Keynes.
- Hawkesworth, C., George, R., Turner, S. and Zellmer, G. (2004) Time scales of magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **218**, 1–16.
- Heath, E., Turner, S.P., Macdonald, R., Hawkesworth, C. J. and van Calsteren, P. (1998) Long magma residence times at an island arc volcano (Soufrière, St. Vincent) in the Lesser Antilles: evidence from ^{238}U - ^{230}Th isochron dating. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 49–63.
- Hess, G. B. (1972) Heat and mass transport during crystallization of the Stillwater Igneous Complex. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **132**, 503–520.
- Iwamori, H. (1994) ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra and ^{235}U - ^{231}Pa disequilibria produced by mantle melting with porous and channel flows. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **125**, 1–16.
- Jaupart, C. and Tait, S. (1995) Dynamics of differentiation in magma reservoirs. *J. Geophys. Res.*, **100**, 17615–17636.
- Jellinek, A.M. and Kerr, R.C. (1999) Mixing and compositional stratification produced by natural convection 2. Applications to the differentiation of basaltic and silicic magma chambers and komatiite lava flows. *J. Geophys. Res.*, **104**, 7203–7218.
- Jicha, B.R., Singer, B.S., Beard, B.L. and Johnson, C. M. (2005) Contrasting timescales of crystallization and magma storage beneath the Aleutian Island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 195–210.
- Johansen, T.S., Hauff, F., Hoernle, K., Klügel, A. and Kokfelt, T.F. (2005) Basanite to phonolite differentiation within 1550–1750 yr: U-Th-Ra isotopic evidence from the A.D. 1585 eruption on La Palma, Canary Islands. *Geology*, **33**, 897–900.
- Kaneko, K. and Koyaguchi, T. (2000) Simultaneous crystallization and melting at both the roof and floor of crustal magma chambers: experimental study using NH_4Cl - H_2O binary eutectic system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **96**, 161–174.
- Kerr, R. C. and Tait, S. R. (1985) Convective exchange between pore fluid and an overlying reservoir of denser fluid: a post-cumulus process in layered intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 147–156.
- Kessel, R., Schmidt, M. W., Ulmer, P. and Pettke, T. (2005) Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*, **437**, 724–727.
- Kigoshi, K. (1967) Ionium dating of igneous rocks. *Science*, **156**, 932–934.
- Kuno, H. (1965) Fractionation trends of basalt magmas in lava flows. *J. Petrol.*, **6**, 302–321.
- Kuritani, T. (1999) Boundary layer fractionation constrained by differential information from the Kutsugata lava flow, Rishiri Volcano, Japan. *J. Geophys. Res.*, **104**, 29401–29417.
- Kuritani, T., Kitagawa, H. and Nakamura, E. (2005) Assimilation and fractional crystallization controlled by transport process of crustal melt: implications from an alkali basalt-dacite suite from Rishiri Volcano, Japan. *J. Petrol.*, **46**, 1421–1442.
- McBirney, A. R. (1995) Mechanisms of differentiation in the Skaergaard Intrusion. *J. Geol. Soc. London*, **152**, 421–435.
- McKenzie, D. (1985) ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium and the melting processes beneath ridge axes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **72**, 149–157.
- Philpotts, A. R., Carroll, M. and Hill, J. M. (1996) Crystalline compaction and the origin of pegmatite segregation sheets in a thick flood-basalt flow in the Mesozoic Hartford Basin, Connecticut. *J. Petrol.*, **37**, 811–836.
- Rogers, N.W., Evans, P.J., Blake, S., Scott, S.C. and Hawkesworth, C.J. (2004) Rates and timescales of fractional crystallization from ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibria in trachyte lavas from Longonot Volcano, Kenya. *J. Petrol.*, **45**, 1747–1776.
- Shirley, D.N. (1987) Differentiation and compaction in the Palisades Sill, New Jersey. *J. Petrol.*, **28**, 835–865.

- Simura, R. and Ozawa, K. (2006) Mechanism of crystal redistribution in a sheet-like magma body: constraints from the Nosappumisaki and other shoshonite intrusions in the Nemuro Peninsula, northern Japan. *J. Petrol.*, **47**, 1809–1851.
- Spiegelman, M. and Elliott, T. (1993) Consequences of melt transport for uranium series disequilibrium in young lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **118**, 1–20.
- Tait, S. and Jaupart, C. (1989) Compositional convection in viscous melts. *Nature*, **338**, 571–574.
- Turner, J.S., Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J. (1986) Komatiites II: experimental and theoretical investigations of post-emplacement cooling and crystallization. *J. Petrol.*, **27**, 397–437.
- Turner, S., Evans, P. and Hawkesworth, C. (2001) Ultrafast source-to-surface movement of melt at island arcs from ^{226}Ra - ^{230}Th systematics. *Science*, **292**, 1363–1366.
- Turner, S., George, R., Jerram, D.A., Carpenter, N. and Hawkesworth, C. (2003a) Case studies of plagioclase growth and residence times in island arc lavas from Tonga and the Lesser Antilles, and a model to reconcile discordant age information. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **214**, 279–294.
- Turner, S., Foden, J., George, R., Evans, P., Varne, R., Elburg, M. and Jenner, G. (2003b) Rates and processes of potassic magma evolution beneath Sangeang Api Volcano, east Sunda arc, Indonesia. *J. Petrol.*, **44**, 491–515.
- Vigier, N., Bourdon, B., Joron, J.L. and Allègre, C.J. (1999) U-decay series and trace element systematics in the 1978 eruption of Ardoukoba Asal rift: timescale of magma crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **174**, 81–97.
- Villemant, B. and Fléhoc, C. (1989) U-Th fractionation by fluids in K-rich magma genesis: the Vico volcano, Central Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **91**, 312–326.
- Volpe, A.M. (1992) ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibrium in young Mt. Shasta andesites and dacites. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **53**, 227–238.
- Volpe, A.M. and Hammond, P.E. (1991) ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibria in young Mount St. Helens rocks: time constraint for magma formation and crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 475–486.
- Widom, E., Schmincke, H.-U. and Gill, J.B. (1992) Processes and timescales in the evolution of a chemically zoned trachyte: Fogo A, Sao Miguel, Azores. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **111**, 311–328.
- 横山哲也 (2005) ウラン系列短寿命核種の精密分析法の開発とマグマプロセス解明への応用. 地球化学, **39**, 27–46.
- Yokoyama, T., Kobayashi, K., Kuritani, T. and Nakamura, E. (2003) Mantle metasomatism and rapid ascent of slab components beneath island arcs: evidence from ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibria of Miyakejima volcano, Izu arc, Japan. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi: 10.1029/2002JB002103.
- Yokoyama, T., Kuritani, T., Kobayashi, K. and Nakamura, E. (2006) Geochemical evolution of a shallow magma plumbing system during the last 500 years, Miyakejima volcano, Japan: constraints from ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra systematics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 2885–2901.
- 吉田武義・山口輝彦・川崎泰照 (1981) 利尻火山・沓形溶岩流の内部構造. 岩石鉱物鉱床学会誌, **76**, 181–194.