

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540555

研究課題名(和文)大陸地殻を持つ沈み込み帯における地殻溶融によるマグマ発生過程の解明

研究課題名(英文) Magma generation processes by crustal melting at subduction zone with continental crust

研究代表者

金子 克哉 (Kaneko, Katsuya)

京都大学・人間・環境学研究科(研究院)・助教

研究者番号：40335229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：大陸地殻縁の沈み込み帯において、地殻溶融により発生するマグマの生成量、組成、生成時間を理解し、マグマの多様性生成の物理プロセスを定量的に理解するため、高温マグマの地殻貫入による地殻溶融マグマ生成の物理モデルに基づく数値実験を行った。その結果、地殻溶融マグマの総生産量は、熱源マグマの貫入率と地殻初期温度によりほぼ支配されること、地殻初期温度と一回の熱源マグマ貫入量により地殻溶融マグマの組成が影響を受けること、1km³程度以上のマグマ生成が起こるためには、数万年の時間スケールが必要であること、などを明らかにした。以上の結果は、実際の火成活動の性質と整合的である。

研究成果の概要(英文)：We carried out numerical experiments of magma genesis by crustal melting on the basis of physical model where hot magmas injecting into crust repeatedly melt the crust and produce magmas, in order to clarify amount, composition, and generation timescale of magma produced by crustal melting and understand variety of igneous activities in continental margin. The results of the numerical experiments indicate that (1) the initial crustal temperature and injection rate of the hot magmas govern total amount of crustal melt, (2) composition of crustal melt is dominantly affected by the initial crustal temperature and injection thickness of the hot magma, and (3) generation timescale for magmas with more than 1 km³ volume is several ten thousands years. These results are consistent with features of natural igneous activity.

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：大陸地殻 地殻溶融 大規模珪長質マグマ活動 カルデラ火山 島弧火山

1. 研究開始当初の背景

日本のような大陸地殻をもつ沈み込み帯においては、玄武岩質から流紋岩質まで幅広い組成のマグマが活動し、また多様な火山活動として地表に発現する。岩石学および地球化学的側面から、SZCにおいて、広い組成範囲のマグマが活動を行うことは、古くから認識され、それゆえ、マントルで発生した高温玄武岩質マグマが、大陸地殻に貫入することによる地殻の溶融やその同化作用が重要な役割を果たしていると考えられてきた (e.g., Hildreth, 1981)。

マグマの地球化学的多様性は、基本的には、Assimilation with Fractional Crystallization 過程 (DePaolo, 1981) や混合過程といった岩石学的過程に基づき解釈されてきた。多くの火山が個別に研究され、マグマの化学的性質が詳しく調べられ、その組成バリエーションを説明できる岩石学的過程が明らかにされた。その一方で、個別の火山におけるマグマの量的および組成的多様性を生む過程の理解は大きくは進んでいない。例えば、大規模珪長質マグマ活動はどのような条件で起こるのか、なぜある火山では安山岩質マグマの活動が主体であるのか、なぜこの火山はもっぱら玄武岩質マグマの活動のみが起こるのか、という問題があげられる。

一方、物理過程の研究において、地殻に貫入したマグマが引き起こす地殻溶融の規模、や時間に関して基本的なモデルが提出されている (e.g., Huppert & Sparks, 1988; Koyaguchi & Kaneko, 2000)。これらのモデルは、実際の火成活動におけるマグマの量および組成的な性質とともに検討され、その妥当性が検証される必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、上記地殻溶融の物理モデルを進展させ、大陸地殻中にマントルから高温マグマが繰り返し貫入した場合に地殻溶融により生成するマグマの量、組成、生成時間スケールを明らかにし、実際の火成活動の性質を参照し、モデルの検討を行う。

3. 研究の方法

本研究における最も重要な点は、地殻溶融の一次元物理モデルを用いた数値実験である。本研究では、Koyaguchi and Kaneko (2000) をもとに、それを発展させたモデルを使用した。このモデルの特徴は、マグマが、臨界液相分率 (部分溶融体が全体として対流可能か不可能かの状態を決定する液相分率) より大きいか否かにより、対流状態と非対流状態における熱移動の変化を考慮していることである。地殻の溶融温度以上の高温マグマが貫入した場合 (図 1, A 点)、熱対

流による大きな熱流が上面に対して与えられるため、貫入した高温マグマの上部の地殻で溶融が急速に進行する (100 年の時間スケール)。この地殻溶融マグマは、継続して下の高温マグマから熱を得るとともに、対流・均質化し、さらに周囲の地殻を溶融して、溶融領域を広げる (図 1, B 点)。時間とともに、熱源となった高温マグマは、冷却し、熱源としての能力を失う。地殻溶融マグマは周辺地殻を溶融しつつ、自分自身は冷却結晶化していくため (図 1, C, D 点)、やがて臨界結晶分率 (~50%) に達して、マグマと結晶の混合物のバルクの粘性が急上昇し、対流が不可能なマッシュとなり、対流が停止する (図 1, E 点)。この状態になると、系全体は、熱移動が熱伝導により支配され、時間的な変化が非常にゆっくり進むステージに移行する (10 万年の時間スケール)。このマッシュ領域に、再度高温マグマが貫入した場合、結晶量がわずかに減少するだけで対流可能な状態 (再び図 1 A 点) となり、その対流可能な溶融領域がマッシュ領域内で拡大する。

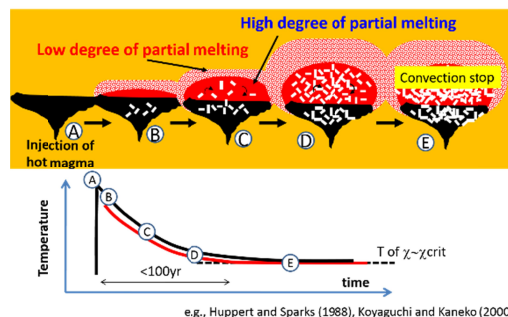


図 1. 本研究の地殻溶融モデルの概念

このモデルにおいて、貫入した高温マグマ直上の高い部分溶融度領域には苦鉄質マグマ、その上の低部分溶融度領域には、珪長質マグマができる。また、このモデルにおいては、珪長質マグマは部分溶融地殻の粒間液として、苦鉄質マグマは、斑晶と液がともに対流する苦鉄質マグマとして生成することになる。本研究では、高温マグマがある間隔で、地殻内の同じ場所に繰り返し貫入する場合における地殻溶融により生じる珪長質および苦鉄質マグマの量、生成にかかる時間を詳しく調べた。

また、本研究におけるモデル改良の大きな特徴として、溶融の性質を大きく変化させる水が高温マグマによって持ち込まれることを考慮したことがあげられる。高温マグマが水を含む場合、それが地殻に貫入して結晶化することにより、もともと含まれていた水が飽和遊離し、その水は密度が小さい故、上昇して地殻に吸収される。水量の増加した地殻は、その溶融関係が変化する。この効果も、本モデルでは取り入れられている。

数値実験においては、貫入する高温マグマと貫入を受ける地殻の条件を変化させて

その影響を網羅的に調べた。以下のパラメータをカッコン内の範囲で変化させた。それらは、圧力 (0.2-1GPa), 対流非対流を決める臨界液相分率 (0.5 - 1), 地殻の SiO₂ 組成 (50 - 75%), 初期温度 (0 - 700 °C), 地殻に貫入する高温マグマの貫入率 (1-30m/kyr), 貫入時の厚さ(10-100m)である。また、地殻の初期含水量は 2%, 貫入高温マグマは無水リキダス初期温度を持ち、組成は SiO₂ 50%とした。以上の条件のもと、計算を網羅的に行い、地殻溶融マグマの量、液組成、固相組成、液分率、それらの時間変化を明らかにした。

4. 研究の成果

4. 1. 数値実験の結果

数値実験において、溶融境界、生成するマグマ、地殻内の温度などの時間発展を求めた。一つの計算例を図 2 に示す。

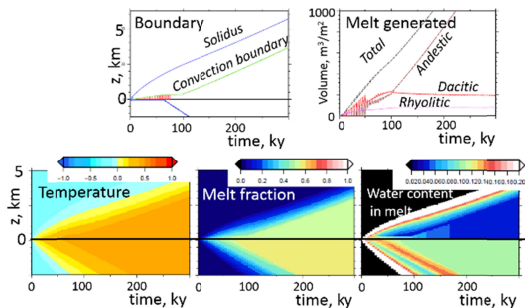


図 2. 数値実験結果の例。溶融境界、生成するマグマ (組成別)、地殻内の温度、部分溶融度、含水量の 30 万年までの時間発展の一例を示す。

本報告では、地殻溶融過程においても重要であると考えられる地殻下部 (圧力 10GPa) におけるハンレイ岩質地殻 (50wt%SiO₂) の地殻溶融の数値実験に関して主に紹介する。その場合、重要なパラメータである、地殻の初期温度、高温マグマの一回の貫入におけるマグマ厚さ、高温マグマの貫入率、高温マグマに含まれる水の初期水量の影響に関していかに述べる (図 3)。

地殻の初期温度は、珪長質マグマの生産量に影響を与える。地殻初期温度が高いほど、珪長質マグマの生産量が増加する。その一方で、高温マグマの貫入開始から比較的初期 (数万年程度まで) の苦鉄質マグマの生産量は大きく変化しない。ただし、10 万年くらいになると、苦鉄質マグマの生産量が急増する。これは、高温マグマからの急速な熱供給を受けて高部分溶融度の地殻溶融によって生成する苦鉄質マグマの生産量があまり地殻初期温度の影響を受けないことを示す。珪長質マグマは、熱伝導過程によるゆっくりした加熱により生成するため、溶融に必要な熱量が、地殻初期温度が高く

なることによって、小さくなるという影響を大きく受けることになる。

高温マグマの一回の貫入におけるマグマ厚さは、珪長質および苦鉄質マグマの相対的生産量に影響を与える。一回当たりの貫入量が大きいほど、珪長質マグマの生産量が少なくなり、反対に苦鉄質マグマの生産量が多くなる。この理由は、高温マグマの熱は、急速にその直上の地殻に与えられるからである。この場合、高温マグマの一回の貫入厚さが大きいほど、多量の熱量が急速に直上の地殻に与えられて、その結果その地殻が高い部分溶融度の地殻溶融を行うことになるため、苦鉄質マグマが多量に生産されることになる。一方、高温マグマ貫入厚さが小さいと、地殻に急速に与えられる熱量は小さく、地殻は、高部分溶融の地殻溶融を起こす前に、供給熱が遮断されることになり、そのため、その後はゆっくりした熱伝導により、広い範囲で、低部分溶融度の地殻溶融を進行させ、珪長質マグマをおもに生成することになる。

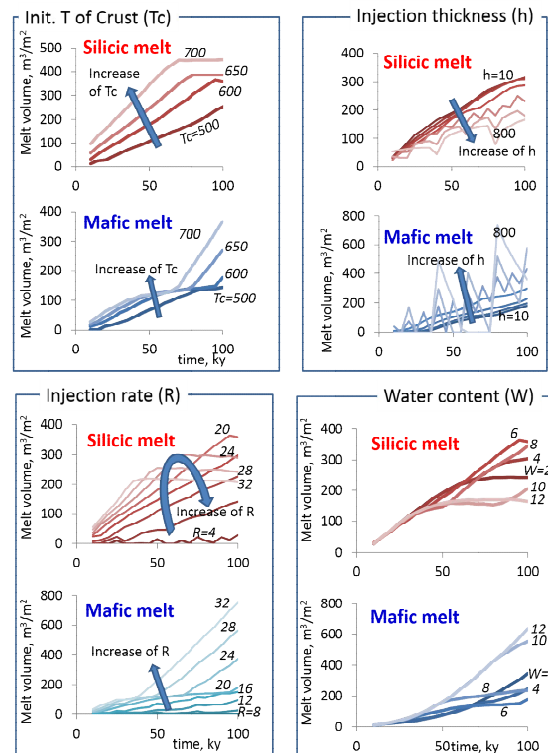


図 3. 数値実験の結果。地殻の初期温度、高温マグマの一回の貫入におけるマグマ厚さ、高温マグマの貫入率、高温マグマに含まれる水の初期水量をそれぞれ変化させた場合の、珪長質および苦鉄質マグマ生成の時間的変化を示す。

高温マグマの貫入率が増加すると、苦鉄質マグマの生産量は増加する。その一方で、珪長質マグマにおいては、高温マグマの貫入が開始してから、5 万年程度までの間においては、高温マグマの貫入率とともに、珪長質マグマの生産量は増加するが、それ

以上の長い時間(5 万年以上)を見た場合、高すぎる高温マグマ貫入率は、むしろ珪長質マグマの生産量を減少させる。高すぎる高温マグマ貫入率は、急速に多量の熱量を地殻に供給するため、熱伝導によりゆっくりと熱が広がり、低部分溶融度の地殻溶融を起こすよりも、むしろ、高温マグマ直上の地殻の高部分溶融度の大規模溶融を引き起こしてしまうことを意味する。

高温マグマに含まれる水の初期水量は、その水量が非常に高い場合(10%以上)でない限り、地殻の溶融量に関して大きな影響を与えない。高温マグマの水量が増加することにより、地殻に供給される水量も増えるが、結局地殻溶融に必要な熱量を大きくは変化させないため、地殻溶融量を大きく変えることはない。一方、生成マグマに含まれる水量は、高温マグマ含水量が多いほど大きくなる傾向がある。

以上の数値実験結果を地殻溶融により生成する珪長質マグマと苦鉄質マグマの量という観点からまとめると図 4 のようになる。暖かい地殻に薄い厚さで高温マグマが貫入する場合、珪長質マグマが苦鉄質マグマに対して多量に生産されることがわかる。一方、冷たい地殻に一回で大量の高温マグマが貫入する場合、苦鉄質マグマが主に生成する。また、高温マグマの貫入率は、珪長質および苦鉄質マグマの生成量を増やすが、その効果は苦鉄質マグマに対して特に大きい。高温マグマの含水量(間接的に地殻含水量を高める効果がある)は、マグマの生成量や珪長質および苦鉄質マグマの量比には影響を与えない。

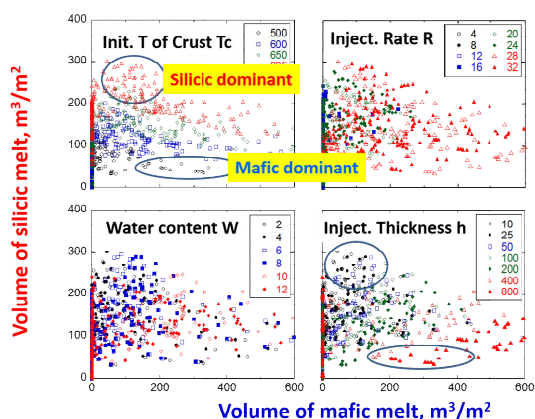


図 4. 高温マグマ貫入開始より 3 万年後における珪長質および苦鉄質マグマの生成量。地殻の初期温度、高温マグマの一回の貫入におけるマグマ厚さ、高温マグマの貫入率、高温マグマに含まれる水の初期水量の違いによりそれぞれまとめた。

4. 2. 火成活動への応用

日本のような沈み込み帯においては、東北日本に数多くみられるような斑晶質な安山岩質マグマを主として噴出する成層火山、10~100km³の多量の珪長質マグマを噴出するカ

ルデラ火山、比較的斑晶の少ない玄武岩質マグマを主として噴出する成層火山など、火山により噴出マグマの多様性が見られる。

これらの火成活動の多様性の原因について、本研究における数値実験より得られる知見をもとに考察した場合、以下のことが推論される(図 5)。

斑晶質な安山岩質マグマは、地殻溶融により生成した斑晶質苦鉄質マグマから、ある程度の斑晶が脱落したもものとして解釈される。それゆえ、斑晶質安山岩マグマを主体とする火山は、冷たい地殻において、厚い高温マグマの貫入を受けてマグマが生成する場として理解される。カルデラ火山における大量の珪長質マグマは、暖かい地殻に薄い高温マグマ貫入が頻繁に起こるような地殻場で生産されたと考えられる。この場においても同体積程度の苦鉄質マグマを生成することは可能であり、実際にいくつかのカルデラ火山で苦鉄質マグマが珪長質マグマと同時に活動していることと整合的である。また、数は多くないが、“monotonous intermediate”と呼ばれる斑晶に富んだ中間組成のマグマが大量に噴出する場合がある(例えば Fish Canyon Tuff)。このようなマグマは、中間組成の地殻において、大量の高温マグマが貫入したことによる高部分溶融度の地殻溶融により生産されたと考えられる(本モデルにおける苦鉄質マグマ領域が対応する)。斑晶の少ない玄武岩質マグマは、本研究における物理モデルでは地殻溶融により生成することはない。したがって、このようなマグマは、本モデルで地殻溶融の熱源となった高温マグマそのものであると考えられる。

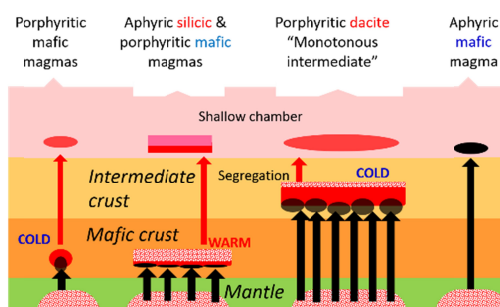


図 5. 地殻溶融による多様なマグマ生成の概念図。

マグマが絶対的な生成量と時間スケールに関しては、本モデルが一次元モデルであるため、マグマ発生領域の水平的広がりにより結果が異なるが、1km³以上のマグマを生成する時間スケールは10kmx10km程度のマグマ発生領域を考えた場合、数万年程度となる。また、例えば阿蘇火山では、2から3万年の間隔を挟んで、3回の100km³規模の大規模珪長質マグマ活動を起こしているが、この場合でも20kmx20kmのマグマ発生領域を仮定すると、

3 万年でマグマ発生が可能である。

本研究では、マグマの地殻溶融における生成のみを考えたが、実際に火山噴火を起こす場合には、これらのマグマがマグマ生成領域から分離して、浅部にマグマ溜まりを生成する必要がある。地殻内マグマ過程に基づき、その火成活動の多様性を理解するためには、本研究で扱った地殻溶融過程とマグマの上昇分離過程をとともに理解することが求められ、今後の研究の進展が望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

金子克哉. 阿蘇 4 巨大噴火のマグマ発生と噴火推移. 科学, 岩波書店, 査読無, 84 巻, 2014, 94-96.

[学会発表](計8件)

金子克哉. 高温マグマが大陸地殻へ貫入する場合に起こる地殻溶融マグマ生成の1次元物理モデル. 地球惑星科学連合 2011 年大会. 5月28日, 千葉市.

金子克哉, 地殻溶融による珪長質および苦鉄質マグマの生成過程: 一次元物理モデルによる量, 組成, 時間スケールの検討. 日本火山学会 2011 年秋季大会, 10月3日, 旭川.

Katsuya Kaneko, One dimensional model on crustal melting by injections of hot magmas into continental crust. American Geophysical Union 2011 Fall meeting, Dec.18, San francisco.

金子克哉. 地殻溶融時の温度とメルト分率の関係が地殻溶融マグマ生成過程に与える影響. 地球惑星科学連合 2012 年大会. 5月26日, 千葉市.

Katsuya Kaneko. Amount and Timescale of Magmas Generated by Crustal Melting: Insights through 1-D Physical Model. AOGS2012. Aug.18, Singapore.

金子克哉. 地殻溶融による生成するマグマの量, 組成, 時間スケール~地殻初期温度, 高温マグマの貫入率および含水量の影響. 日本火山学会 2012 年秋季大会. 10/9. 長野県御田代町.

Katsuya Kaneko. Generation processes of magmas of large pyroclastic eruption cycles at Aso volcano, SW Japan. IAVCEI 2013 General Assembly. Jul.23, Kagoshima.

Katsuya Kaneko. Amount, composition and

timescale of magmas generated by melting in lower crust. IAVCEI 2013 General Assembly, Jul.21, Kagoshima.

[図書](計 件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

金子 克哉 (KANEKO, Katsuya)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・助教
研究者番号: 40335229