

火成活動とマントル対流の自己無矛盾 シミュレーションで解く月の火山活動史 —マグマ上昇の変化が駆動した火山活動の長期化—

亀山 真典
Kameyama Masanori

1. はじめに

明治の文豪の夏目漱石が「I love you」をそう和訳せよと指導したという逸話の真偽はともかく、「月が綺麗ですね」とは夜空を見上げた誰しもが抱く思いではなかろうか。その思いは筆者ら固体地球惑星科学を研究する者からみてもやはり同じである。その理由の1つは、月は地球とは違って大気を持たず、またプレートテクトニクスのような地殻変動もないおかげで、太古の昔の様子を表面によく保存していることにある。それに加えて、地球から最も近い地球外天体であるが故に観測データが豊富にあることも、月を研究対象とする大きな利点である。

月の表面は大雑把にいうと、白っぽく見える部分

と黒っぽく見える部分に大別される。このうち後者は「餅をつく兔」によく喩えられるが、この部分は「海 (mare)」と呼ばれ、地球の海の底と同様に標高の低い地域にあたる。海が黒く見えるのはその表面が玄武岩(黒っぽい溶岩が冷え固まってできた岩石)で覆われているからであり、言い換えれば海の名残である。特にその(兔の耳を除いた)大部分を占める場所は「プロセルラム (Procellarum) 盆地」と名付けられているが(図1)、この地域は時に Procellarum KREEP Terrane (PKT) とも呼ばれる等、Kに加えて希土類元素(REE)やPといった発熱元素の表面濃度が高いという化学的特徴を持つことが

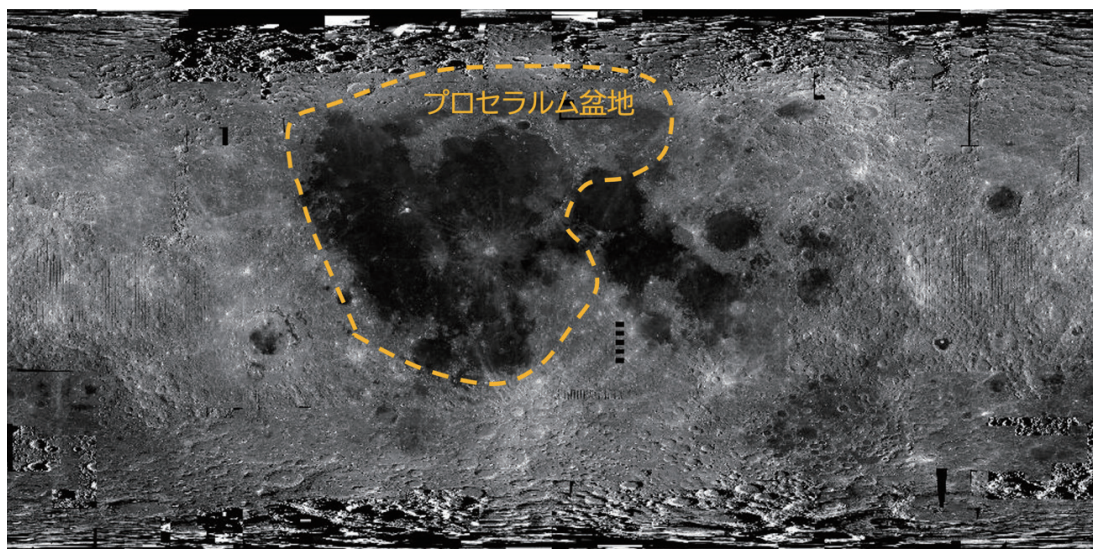


図1 月表面の地図

黄色の点線で囲われた地域が「プロセルラム盆地」に相当する場所。写真は Global Orthomosaic 474 m であり、観測元は日本の宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) による月周回衛星「かぐや」(JAXA-SELENE TC Instrument Team)、作成・掲載元は USGS Astrogeology Science Center

知られている。またこの地域では火山活動が約 40 億年前から活発になり、約 35 億年前にピークを迎えた後も数十億年間にわたって継続したことも観測によって明らかにされている。

ところで天体の冷却の歴史という観点から考えると、プロセラルム盆地での長期間の火山活動は、実は極めて不自然な現象である。月の直径は 3476 km で、地球の直径（約 12742 km）の 4 分の 1 ほどしかない。サイズの小さい天体ほど冷却の効率が高いことを考えると、月の内部は本来はごく短時間で冷え切ってしまうはずである。にもかかわらず、火山活動の歴史からは（ごく局地的に、とはいえ？）地下で溶岩（マグマ）が発生するような状態が数十億年間も保たれていたことが示唆されている。それゆえ、月のような小さい天体でかくも長い期間にわたって火山活動が維持できた理由を明らかにすることは、月の内部の状態やその歴史を解き明かす重要な一歩となる。

筆者らはこれまで、火成活動の効果を自己無矛盾に組み込んだマンテル対流の数値シミュレーションモデルの開発を進めてきた¹⁾。この独自のモデルを用いて月内部の進化を追跡することで、月で発生していた 30 億年もの長期間にわたる火山活動の再現に成功した²⁾。加えて、マグマの上昇メカニズムが時代と共に移り変わる事、及びマンテル上部に放射性元素濃集域が存在する場合にはその地下で局所的に長期的な火山活動が維持されることが分かった。本稿ではその成果について紹介させていただく。

2. 火成活動とマンテル対流の自己無矛盾モデリング

本研究で用いているシミュレーションモデルの最大の特徴は、火成活動とマンテル対流という 2 つの素過程を自己無矛盾に取り扱っていることにある。そもそもマンテルとは、英語の外套 (mantle) と綴りを同じくしており、「中心の核を包むもの」という意味で名付けられている。月でいえばマンテルは表面から深さ約 1350 km まで（地球でいえば深さ約 2900 km まで）の範囲にある、主に固体の岩石でできた領域のことを指す。この岩石のマンテルが温度や物質の密度の違いによって（固体の状態のままで）ゆっくりと対流する現象がマンテル対流である。マンテル対流を駆動する熱源には、その天体が形成時に持っていた始原的な熱に加え、放射性元素の壊変

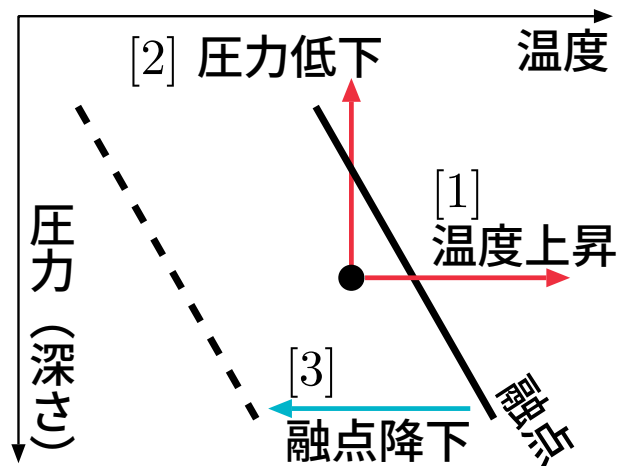


図2 岩石天体の内部でマグマを生じる3つのプロセス
本稿の事例では [1] 温度上昇と [2] 圧力低下、の2つが重要となる

によって天体内部で自然に発生する熱の 2 種類がある。放射性元素のうち岩石天体内部の進化に重要な同位体は ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の 4 つで、これらはいずれも 10 億年程度の半減期を持ち、天体内部で長時間にわたって発熱する。

一方、本研究でいう「火成活動」とは、固体岩石のマンテルが融解してマグマが生成され、そのマグマがマンテル中を移動していく現象を指す。一般に岩石を融解させるためには、図 2 に挙げた 3 つのプロセスのいずれかが必要になる。本研究では特に [1] 圧力は変えず温度を上げる方法と [2] 温度は変えず圧力を下げる方法が重要になる。このうち [1] に放射性元素の壊変による発熱が有効であるのは自明であろう。それに加えて、マンテル対流で岩石が深部から上昇すると周囲から受ける圧力が下がることによって [2] が起こる効果を取り入れていることが本研究の大きな特徴の 1 つである。

ただしマグマの生成の際に岩石がすべて融解することは稀で、一部の成分が融け残る（部分融解）のが普通である。このような固体岩石の部分融解で注意すべきは、ちょうど凍ったジュースが融け始めると味の濃い成分が真っ先に融け出てくるように、生成されたマグマが元々の岩石（及び融け残った固体部分）とは異なる化学組成を持つという点である。岩石学や地球化学の分野では（イオン半径や電荷が大きいといった理由で）造岩鉱物の結晶に入りにくい元素を不適合元素 (incompatible elements) と呼んでいるが、放射性元素はこれに分類され、部分融解の際には固体部分から追い出された結果マグマに強

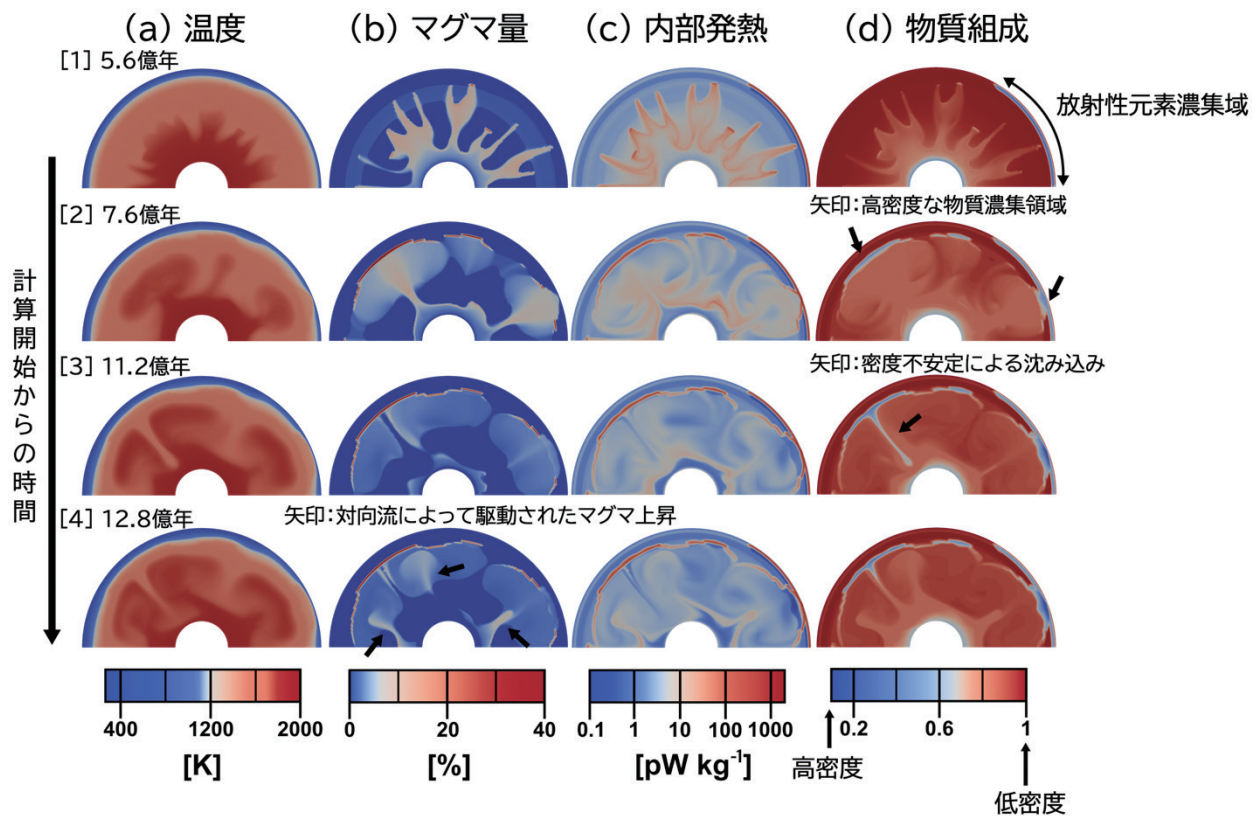


図3 シミュレーションによる月内部の変化
 図中の [1]~[4] の時代は図4の [1]~[4] と対応している

く濃集する。放射性元素を多く含んだマグマが固体マントルとは別々に移動することで、マントル内の放射性元素の分布が時間変化する。また、月のマントル岩石は、イルメナイト（チタン鉄鉱）に富んだ高密度成分と、カンラン石に富んだ低密度成分の混合物でモデル化できるが、部分融解で生じるマグマの化学組成は高密度成分が主体となり、マグマの移動によってやはりマントル内部の大局的な岩石組成の分布も時間変化する。

3. シミュレーションで明らかになった月の火山活動メカニズム

本研究では、月のマントルを模した2次元半円環領域で、マントル対流と火成活動の自己無矛盾シミュレーションを行った。そこで再現された月の火山活動の歴史的变化の一例を図3と図4に示す。なおこの場合では計算の開始時においてモデルの右側の3分の1のマントル上部に、PKTを模した放射性元素濃集域を設けている（図3(c), (d)も参照）。図3は計算開始からの各時刻における月マントル内の(a)温度、(b)マグマ量、(c)内部発熱率、及び(d)

物質組成の分布を示す。図3(d)で、青色はイルメナイトに富んだ高密度成分が多い領域、赤色はカンラン石に富んだ低密度成分が多い領域を表している。図4は放射性元素濃集域（赤線）及びそれ以外（青線）で深さ100 km地点に深部から流入するマグマの平均流量の時間変化を示している。なお図4中の番号[1]~[4]は図3の各々の経過時刻に対応する。

本研究によって構築されたモデルに基づく、月の火山活動は以下のような経過をたどったことが示唆される。まず初期の火山活動は、深部に存在した放射性元素の壊変による加熱を受けたマントル内部で部分融解が起こり、生成されたマグマが自らの浮力によって上昇することで引き起こされる（図3, [1]5.6億年）。部分融解の際にこのマグマにはイルメナイトに富む高密度成分が多く融け込むから、高密度成分はマグマの移動に伴ってマントル上部に運ばれ、その結果マントル上部には高密度成分が濃集した領域が形成されるようになる（図3(d), [2]7.6億年の矢印）。このような高密度成分の塊は冷却を受けて次第に浮力を失い、遂には自分自身の重さに

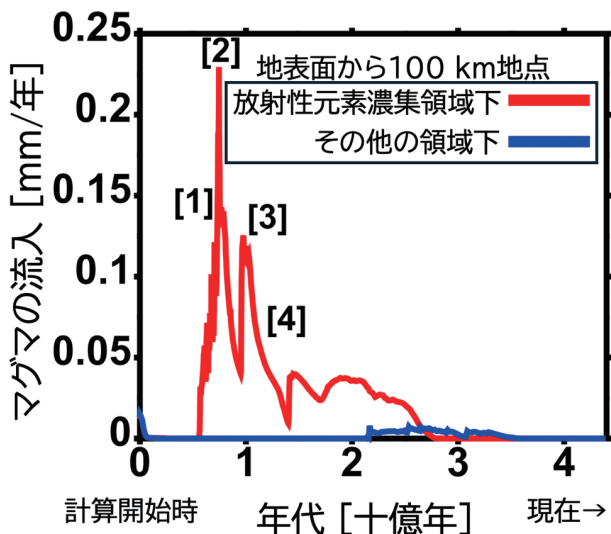


図4 シミュレーションによって示された地表面から深さ100 km 地点のマグマの流入 (火山活動の指標)
 図中の [1]~[4] の時代は図3の [1]~[4] と対応している

よって重力的不安定を起し、再び深部へ沈み込んでいく (図3(d), [3]11.2億年の矢印)。一方、高密度成分の塊が浅部から深部に沈み込むと、その対向流としてマントル深部では上向きの流れが誘発される。この受動的な対向流が更なるマグマの生成と上昇を促した結果、比較的新しい時代の火山活動が引き起こされている (図3(b), [4]12.8億年の矢印) ことが理解できる。

また、新しい時代の火山活動に注目して更に解析を進めた結果、特に初期条件としてマントル上部に放射性元素濃集域を設定した場合にはその地域下で局所的に顕著な火山活動が見られることが分かった。図5にそのメカニズムを概念的に示す。放射性元素の濃集した領域がマントル上部にあると、そこで発生した熱を受けて浅部の低温で硬い岩石圏 (リソスフェア) が薄くなる (図5[2], 図3(a), (c)も参照)。このように硬い岩石圏の薄くなった領域が局所的に形成されると、マントル深部からはそこを目掛けて上昇してくるような流れが発生しやすくなり、その結果この領域で顕著なマグマの上昇が起こることとなる。この傾向は、プロセラルム盆地の化学的特徴とそこでの火山活動の歴史の双方と非常に調和的であるといえる。

4. 結辞

本研究では、火成活動をマントル対流モデルに反

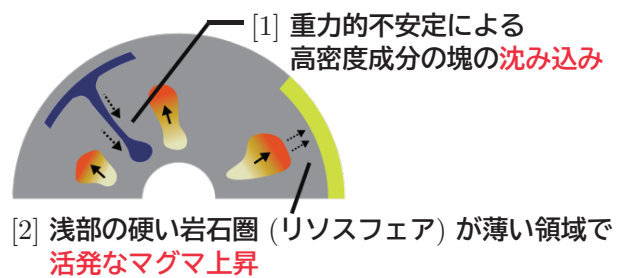


図5 長期的な火山活動を駆動する後期のマグマ上昇メカニズム
 [1] 初期の火山活動で形成された高密度な塊が沈み込むことによってできた対向流がマグマ上昇を駆動。
 [2] マグマ上昇は放射性元素による発熱を受けて浅部の硬い岩石圏 (リソスフェア) が薄くなった地域にて顕著

映させた自己無矛盾2次元モデルを用いて月内部の進化をシミュレーションすることで、月で発生していた30億年にも及ぶ長期的な火山活動の再現に成功すると共に、マグマの上昇メカニズムが時代と共に移り変わっていることを指摘した。具体的には、初期の火山活動の原因となった部分融解は深部に存在した放射性元素による加熱で生じたものであるし、新しい時代の火山活動の源となった深部からの受動的な対向流はマントル上部に局所的に分布する放射性元素濃集域を目掛けて上昇しやすい傾向にある。このことから、月の内部に存在する放射性元素の壊変による発熱が、月の火山活動の歴史の理解の重要な鍵の1つであったといえるであろう。それに加えて、新しい時代の火山活動を引き起こすに足る上昇流がマントル内で生じたことから、この時期の月のマントル内部が依然として十分な流動性を備えていたこと、言い換えれば月のような小さい天体であってもその内部は長い時間にわたって流動的な環境が保たれる可能性を示している。このような描像は、月と同じくサイズが小さいながら活発な火山活動が存在していた過去を持つ水星 (直径約4880 km) 等の惑星の内部進化の理解にも寄与すると期待される。

本稿では月の火山活動の歴史に焦点を絞って論じてきたが、これと同様の自己無矛盾シミュレーションは月の大きさ (半径) の歴史的変化の理解にも貢献している。これまでの観測から、月は当初全球的に (半径で0.5 km 以上) 膨張して約38億年前に極大に達し、その後収縮したことが分かっている。筆者らの過去のシミュレーション研究³⁾の結果からは、深部で生成されたマグマが浅部マントルまで上

昇すると、月表面で火山活動を起こすと同時に、それに伴うマントル物質の体積膨張によって月全体の体積を有意に増加させることが示されている。月マントル内部での火成活動によって体積の膨張と火山活動の双方が誘発されることは、両者のピークのタイミングが概ね一致していることと極めて調和的である。

本研究をはじめとする筆者らの自己無矛盾シミュレーションの結果は、将来の月面探査計画の指針を策定するうえで重要な鍵になるものと考えられる。近年世界ではNASAの「アルテミス (Artemis) 計画」や中国の「嫦娥 (Chang'e) 計画」等、様々な国でプロジェクトが発表されており、日本でもインド宇宙機関 (ISRO) との共同プロジェクトによる月極域探査機 (LUPEX) の打ち上げが2026年に行われる見込みである。そのような月探査におけるサイエンス・ターゲットの選定において、本研究が示唆したマントルの状態の評価は、日本が現在掲げている「月面での科学研究・技術実証ミッションに関するフィジビリティスタディテーマ」にて打ち出してい

る「月震計ネットワークによる月内部構造の把握」の科学的意義を大きく高めるものと期待できる。

5. 謝辞

この研究成果は、東京大学 (当時) の小河正基氏、海洋研究開発機構の宮腰剛広氏らと筆者との共同のもと、東京大学 (現在は愛媛大学) の于賢洋氏が中心となって実施しているシミュレーションに基づくものである。記して感謝する。

参考文献

- 1) M. Kameyama., *et al.*, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **94**, 187-216 (1996)
- 2) K. U., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **52**, e2025GL115215 (2025)
- 3) K. U., *et al.*, *J. Geophys. Res. Planets.*, **128**, e2023JE007845 (2023)

(愛媛大学先端研究院 (PIAS) 地球深部ダイナミクス研究センター (GRC))