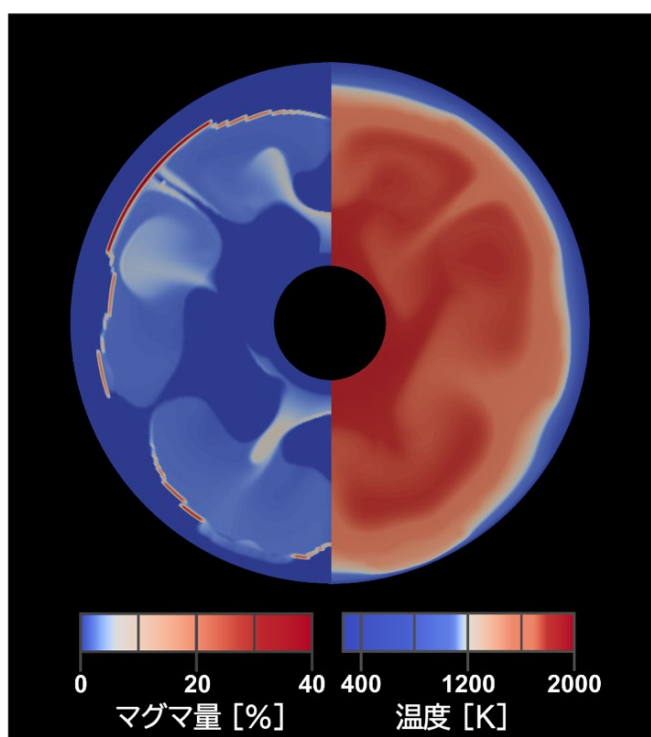


令和 7 年 4 月 24 日
愛 媛 大 学
東 京 大 学
海 洋 研 究 開 発 機 構

月の火山活動の起源をシミュレーションによって解明 ～今後の月面探査計画における科学的意義付けに寄与～

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの亀山真典教授は、東京大学大学院総合文化研究科の于賢洋大学院生（現在、NTT 研究所）と小河正基准教授（研究当時）、東京大学大学院理学系研究科の西山学客員共同研究員、海洋研究開発機構の宮腰剛広主任研究員からなる研究チームの一員として、月内部の数値シミュレーションにより、観測から知られていた月の局地的な長期間の火山活動が、マグマの上昇メカニズムの変化が原因となって引き起こされていたことを示しました。この成果は、月内部構造解明を目指す月震計ネットワークなど、今後の月面探査計画における科学的意義付けに寄与します。

本研究成果は、米国の科学雑誌「Geophysical Research Letters」に 4 月 25 日に掲載されます。本件に関する報道解禁は、論文公開日時の令和 7 年 4 月 25 日（金）10 時（日本時間）となっていますのでご協力をお願いいたします。



シミュレーションで得られた、約 30 億年前の月内部の温度（右）とマグマ量（左）の描像

【本件に関する問い合わせ先】

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター 教授 亀山 真典

電話：089-927-9652 E-mail:kameyama.masanori.my@ehime-u.ac.jp

月の火山活動の起源をシミュレーションによって解明 ～マグマの上昇メカニズムの変化による火山活動の長期化～

愛媛大学

東京大学

海洋研究開発機構

【研究成果のポイント】

- 月内部のコンピュータ（数値）シミュレーションにより、30 億年もの月の長期的な火山活動がマグマ上昇メカニズムの変化によって生じていたことを初めて解明
- 古い時代の火山活動は内部発熱によって、比較的新しい時代の火山活動は高密度物質の沈み込みによる反動（対向流）によって駆動されることを提示
- このような長期的な火山活動は、地殻直下に存在する放射性元素濃集領域の存在で局所的に顕著になることを指摘
- 月内部構造解明を目指す月震計ネットワークなど、今後の世界各国の月面探査計画における科学的意義付けに寄与

【概要】

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの亀山真典教授は、東京大学大学院総合文化研究科の于賢洋大学院生（現在、NTT 研究所）と小河正基准教授（研究当時）、東京大学大学院理学系研究科の西山学客員共同研究員（ドイツ航空宇宙センター、国立天文台と兼任）、海洋研究開発機構の宮腰剛広主任研究員からなる研究チームの一員として、月内部の数値シミュレーションにより、観測から知られていた 30 億年間にも及ぶ月の局地的な長期間の火山活動が、マグマの上昇メカニズムの変化が原因となって引き続いていたことを示しました。

月のプロセルム盆地と呼ばれる場所（図 1）では約 40 億年前から約 10 億年前まで火山活動が継続したことが知られていました。しかし、月の天体のサイズは小さく内部が冷

えやすいため、30 億年もの長期にわたる火山活動がどのようなメカニズムで維持できていたのかはわかっていませんでした。本研究では火成活動とマントル対流をモデル化した数値シミュレーションによって、1. 古い時代と新しい時代では火山活動の源となるマグマの上昇メカニズムが異なっていること、2. 古い時代の火山活動は放射性元素（※1）によって温められた月の深部で生じたマグマが能動的に上昇したのに対し、この火山活動が浅部に遺した高密度物質の濃集領域（※2）が再び深部に沈み込む際に発生する反動としての上向きの対向流として駆動される受動的なマグマ上昇が、比較的新しい時代の火山活動を引き起こしていることがわかりました。特に、月の浅部に放射性元素濃集域の存在を想定すると、その領域下で局所的にこのような火成活動が顕著になることもわかりました（図 2）。

本研究の結果は、現在の月において、地殻直下のごく浅い部分にチタンやトリウムなどの放射性元素に富んだ領域が局所的に存在し、しかもそれが月全体にわたる内部の不均質性と深く関係している可能性を提示しました。これは、現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 主導で推進している内閣府の宇宙基本計画での「月面における科学」の一つである「月震計ネットワーク」において、内部構造や地盤特性を知るための観測計画の重要な知見となり得ます。

本研究成果は、米国の科学雑誌「Geophysical Research Letters」に 4 月 25 日に掲載されます。

【詳細】

私たちが夜空を見上げると、満月の月では「うさぎが餅をついている」黒っぽい模様が見えます。これはかつて月で噴出していたマグマの名残であり、これまでの調査から、月には活発な火山活動があったことが知られています。特に我々が「うさぎ」と「臼」と認識する場所はプロセルム盆地と名付けられており、その大部分を占める地域（図 1）では火山活動は約 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継続したことが観測により明らかになっています。サイズが小さく内部が冷えやすい月という天体において、これほど長期的に火山活動が続いた理由はこれまで明らかになっていませんでした。

本研究では、火成活動（マグマの生成・移動の効果）をマントル対流モデル（※3）に反

映させた 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しました。加えて、マグマの上昇メカニズムが時代とともに移り変わることで、およびマントル上部に放射性元素濃集域が存在する場合にはその地域下で局所的に長期的な火山活動が維持されることがわかりました（図 2）。

本研究によって構築されたモデルでは、まず初期の火山活動は深部に存在した放射性元素がマントル内部を温めることによって生成されたマグマが自ら上昇することで引き起こされます（図 3、5.6 億年）。このマグマはマグマに濃集する性質を持つ高密度物質を深部からマントル上部に運び、マントル上部にはそのような高密度物質が濃集した領域が形成されます（図 3（d）、7.6 億年の矢印）。そのような高密度な塊は次第にその重さによって（重力的不安定性）、再び深部へ沈み込んでいきます（図 3(d)、11.2 億年の矢印）。この沈み込みによって誘発された受動的な上向きの対向流がマグマ上昇を駆動し、比較的新しい時代の火山活動を引き起こしていることがわかりました。このような火山活動は、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に見られることもわかりました（図 4）。

本研究によって、たとえ小さい天体である月であっても内部は長期的に流動的な環境であった可能性を示しました。このよう描像は、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などの惑星の内部進化の理解に寄与できます。また、地殻直下に放射性元素に富んだ領域が存在し、それが月全体にわたる内部の不均質性と密接に関係している可能性を提示しました。今後、世界各国で月探査が活発化することが予想されています。NASA のアルテミス計画や中国の月面着陸プロジェクトなど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）がここ数年以内に打ち上がる予定です。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」の科学的意義を高める成果といえます。

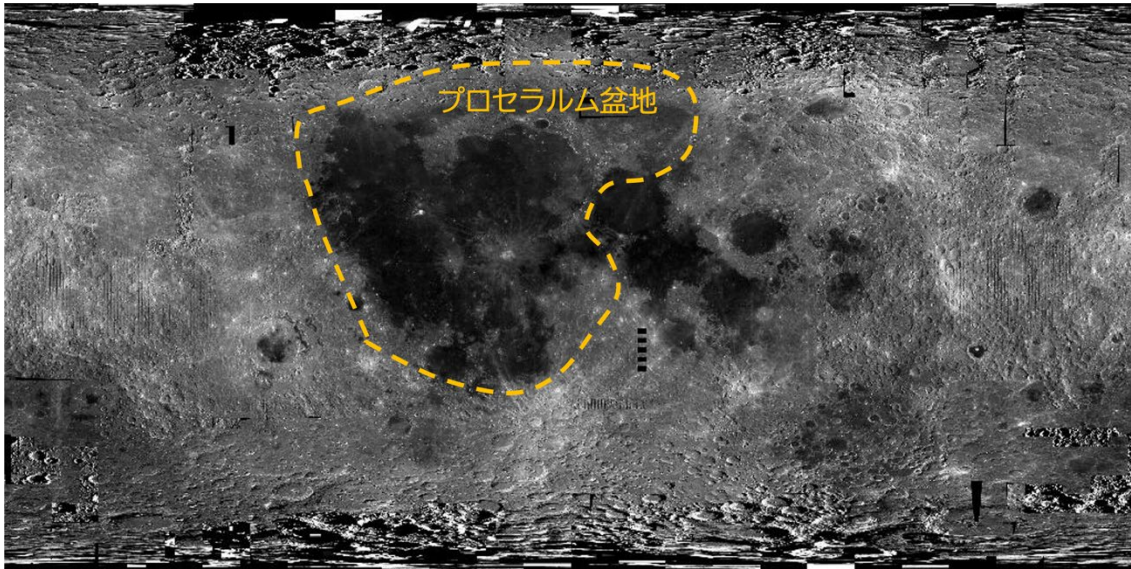


図1．月表面のマップ。黄色の点線で囲われた地域がプロセラルム盆地と言われている場所。写真は Global Orthomosaic 474m であり、観測元は日本の宇宙科学研究所（ISAS-JAXA）による月周回衛星「かぐや」（JAXA - SELENE TC Instrument Team）、作成・掲載元は USGS Astrogeology Science Center。

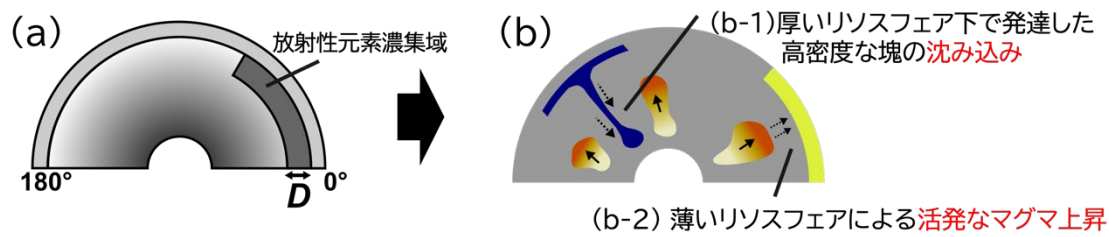


図2．(a) 初期条件として与えた放射性元素濃集域の例。(b) 長期的な火山活動を駆動する後期のマグマ上昇メカニズム。(b-1) 初期の火山活動で形成された高密度な塊が沈み込むことによってできた対向流がマグマ上昇を駆動。(b-2) マグマ上昇は放射性元素によってリソスフェアが薄くなった地域にて顕著。

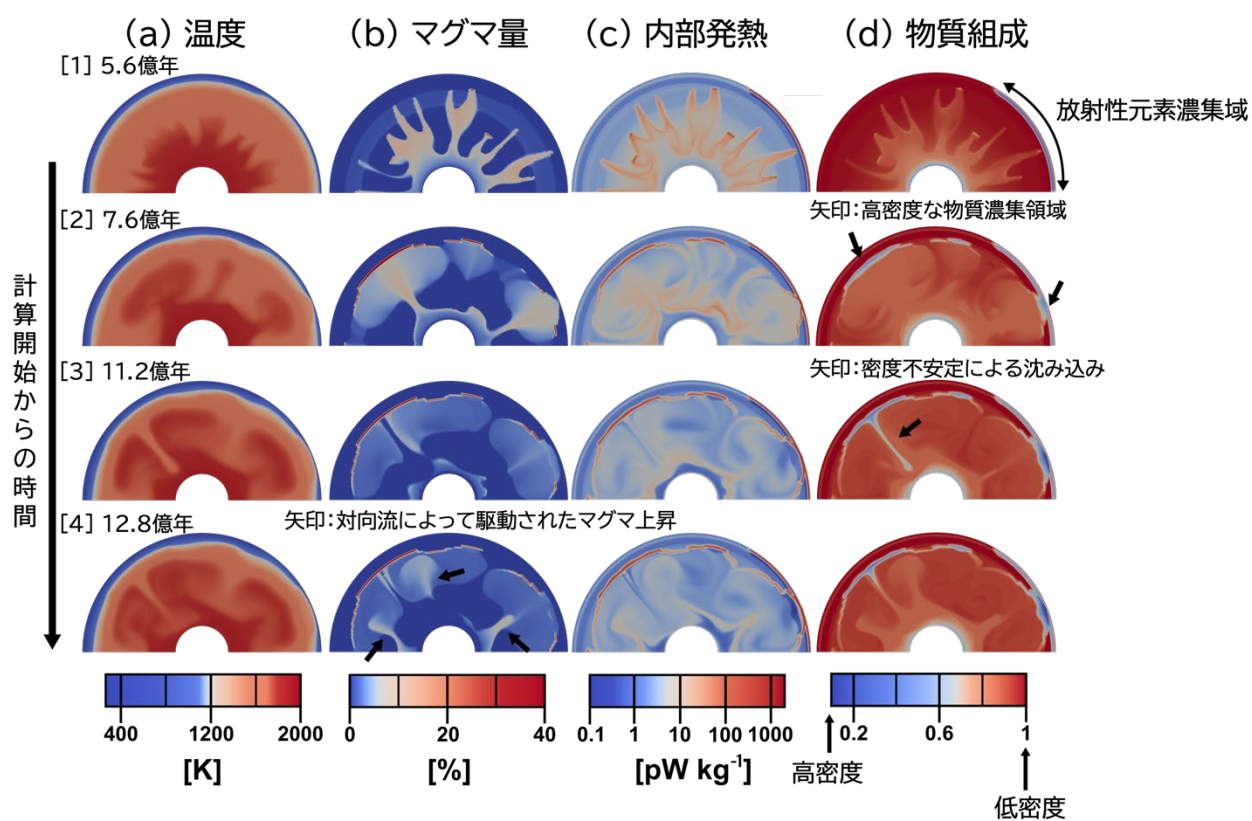


図3. シミュレーションによる月内部の変化。図中の[1]-[4]の時代は図4の[1]-[4]と対応している。

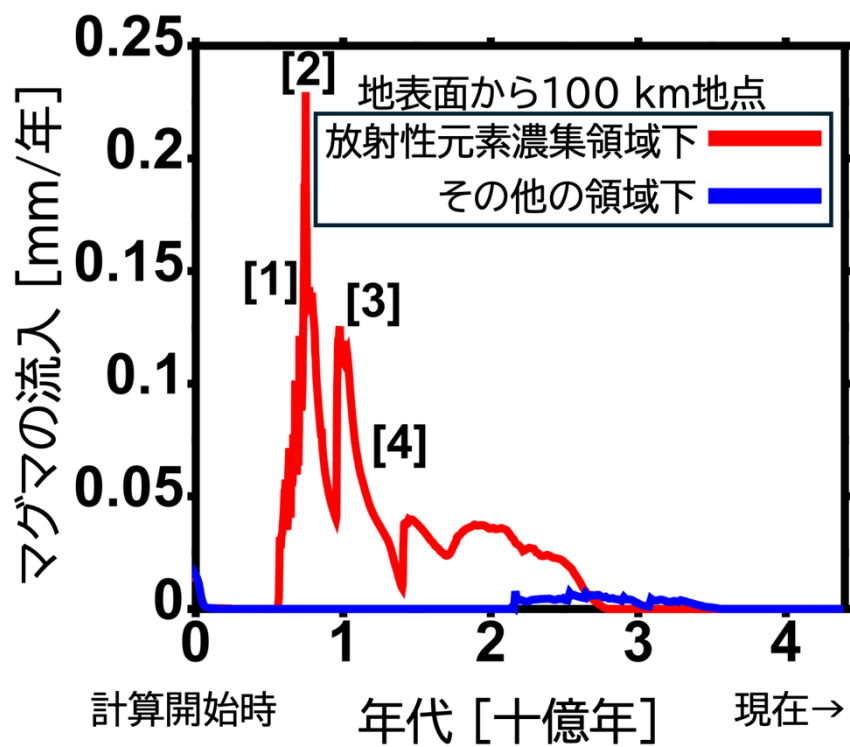


図4. シミュレーションによって示された地表面から深さ 100 km 地点のマグマの流入 (火山活動の指標)。図中の[1]-[4]の時代は図3の[1]-[4]と対応している。

【用語解説】

放射性元素（※1）

自然に放射性壊変を引き起こす元素のこと。この崩壊の際に放出される熱は天体内部を温め、熱進化に重要な影響を与える。本研究では月の内部進化に重要であることが知られているウラン、トリウム、カリウムに着目した。

高密度物質の濃集領域（※2）

ここではイルメナイト（チタン鉄鉱）に富んだ高密度な物質が濃集している領域を指す。

マントル対流（※3）

惑星（を含む天体）内部に存在する岩石のマントルが熱や物質の重さ（密度）の違いによって対流する。このことをマントル対流と呼ぶ。

【論文情報】

掲載紙：Geophysical Research Letters

題 名：Long-Lasting Volcanism of the Moon Aided by the Switch in Dominant Mechanisms of Magma Ascent: Role of Localized Radioactive Enrichment in a Numerical Model of Magmatism and Mantle Convection（マグマの上昇メカニズムの変化がもたらした月の長期火山活動：マグマ上昇とマントル対流の数値モデルにおける放射性元素濃縮領域の役割）

著 者：Ken'yo U, Masanori KAMEYAMA, Gaku NISHIYAMA, Takehiro MIYAGOSHI, and Masaki OGAWA

D O I：10.1029/2025GL115215

<https://doi.org/10.1029/2025GL115215>

【研究サポート】

■ 日本学術振興会科学研究費補助金

課題番号：JP202412823, JP-MJSP2108

- 愛媛大学先進超高压科学研究拠点 (PRIUS)
 - 地球シミュレータ (海洋研究開発機構)
 - ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」
 - スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」
 - HPCI システム利用研究課題
- 課題番号 : hp230204, hp240219

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター

教授 亀山 真典

電話 : 089-927-9652、E-mail : kameyama.masanori.my@ehime-u.ac.jp

(プレスリリースに関すること)

愛媛大学

・総務部広報課

電話 : 089-927-9022 、E-mail: koho@stu.ehime-u.ac.jp

・先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター (GRC)

電話 : 089-927-8165、E-mail: grc@stu.ehime-u.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

電話 : 03-5841-8856、E-mail: media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

海洋研究開発機構海洋科学技術戦略部報道室

電話 : 045-778-5690、E-mail : press@jamstec.go.jp