

## Press Release

研究成果

記者発表あり

報道解禁あり



本研究成果は論文掲載前から、以下の通り報道解禁設定がありません。

TV・ラジオ・WEB ……7月22日(水) 午前0時(日本時間)  
新聞 ……7月22日(水) 朝刊(日本時間)

2020年7月16日

分野:自然科学系 キーワード: 宇宙地球科学、月、地球、小惑星、かぐや衛星、隕石、リュウグウ

# 8億年前、月と地球を襲った小惑星シャワー

—月のクレーターから明らかになった地球の過去—

【記者発表：7/20(月)15時～@ZOOMまたは理学研究科(豊中キャンパス)】

### 【研究成果のポイント】

- ◆ 月周回衛星「かぐや<sup>※1</sup>」の地形カメラで、直径 20km 以上ある月のクレーター59 個の形成年代を調べた
- ◆ 8億年前、小惑星が破碎し、その破片の一部が月に相次いで衝突していたことを発見
- ◆ 月のクレーターサイズ、月と地球の小惑星衝突比から推定すると、恐竜を絶滅させた隕石の 30-60 倍の小惑星物質が地球に衝突
- ◆ 破碎した小惑星は、「はやぶさ2」が探査している地球近傍小惑星<sup>※2</sup> リュウグウの母天体候補である Eulalia 族(C 型小惑星<sup>※3</sup> ファミリー)の可能性が高い

### ❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科の寺田健太郎教授らは、月周回衛星「かぐや」の地形カメラ観測によって、数 km~10km サイズの天体が相次いで月面に衝突していたことを発見しました。アポロ月試料のインパクトガラスの放射年代<sup>※4</sup>、月面のクレーターのサイズ、月と地球の小惑星衝突比などを考慮すると、**8億年前に 100km サイズ以上の小惑星が破碎し、少なくとも総量 $(4-5) \times 10^{16}$  kg の天体が月と地球に飛来したことが明らかになりました。**これは、6550 万年前に恐竜を絶滅させた天体衝突の **30-60 倍の質量に匹敵**します。

現存する小惑星族<sup>※5</sup> の破碎年代や軌道要素を考慮すると、C 型小惑星の Eulalia ファミリー(オイラリア族)の母天体の破碎が小惑星シャワーの原因であった可能性が高いと考えられます。小惑星 Eulalia(オイラリア)は、「はやぶさ2」が探査した小惑星リュウグウと反射スペクトルが似ていることから、地球近傍の C 型ラブルパイル天体<sup>※6</sup> の母天体候補として注目されている小惑星です (Sugita et al. 2019)。これらの知見を統合すると、**8億年前に大規模に破碎した小惑星の一部は地球型惑星<sup>※7</sup> や太陽に落下し、一部は現在の Eulalia 族として小惑星帯(メインベルト)<sup>※8</sup> に残り、一部は地球近傍小惑星へと軌道進化した、というシナリオを描くことができます(図1)。**

本研究成果は英国科学誌「Nature Communications」(オンライン)に、7月22日(水)午前0時(日本時間)に公開されます。



図1：地球と月を襲った小惑星シャワーの想像図

Credit: Murayama/Osaka Univ.

## Press Release

### ❖ 研究の内容

火山や地震、津波などの地殻変動や侵食があるため、地球には昔のクレーターがあまり残っていません。特に、全球規模で地球が氷河に覆われたスノーボールアース時代(6.5-6.4 億年前頃と 7.3-7.0 億年前頃)以前のクレーターの形成頻度はよくわかっていませんでした(図2)。そこで我々は、風化がほとんどない月のクレーターに着目しました。

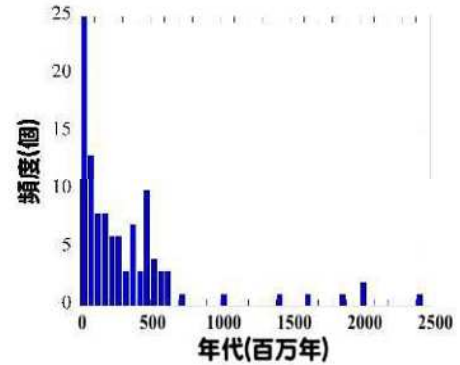


図2：地球のクレーターの形成年代の頻度分布

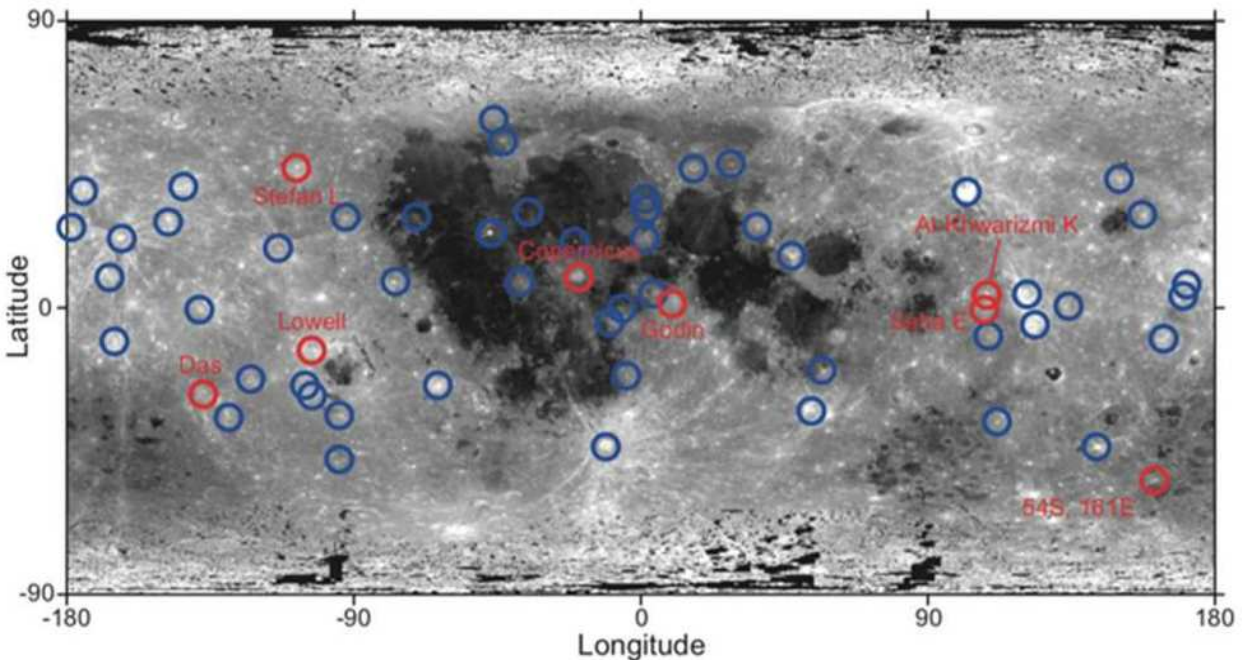


図3：本研究で形成年代を調べた直径 20km 以上のクレーター。赤丸はコペルニクスクレーターと同時期に形成されたクレーター

一般に、クレーターのサイズ分布を元に推定した地質年代をクレーター年代と呼びます。本研究では、直径 20km 以上ある 59 個の月のクレーターについて、クレーター周辺域に存在する 0.1-1km の微小クレーターのサイズ分布を精査することで、メインのクレーターの形成年代を調べました(図3)。例として、直径 93km のコペルニクスクレーターと、その周辺の微小クレーターの写真を図4に示します(緑の点々が、メインのクレーターの年代を導出するのに用いた 860 個の微小クレーターで、そのサイズ分布が(図5))。その結果、59 個のクレーターのうち8個(モデルによっては 17 個)の形成年代が一致することを世界で初めて突き止めました(図6)。偶然、この

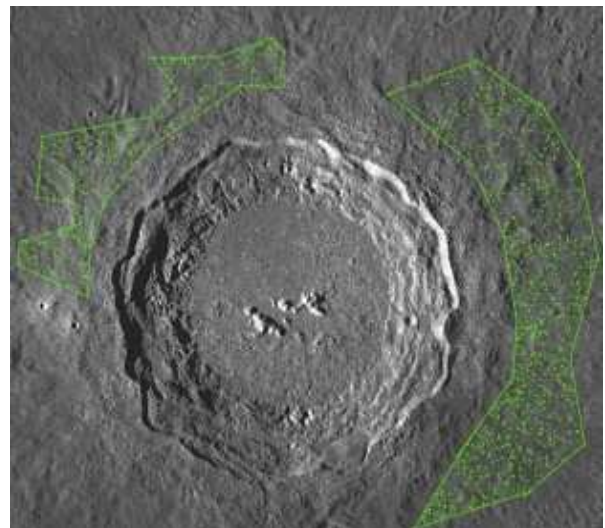


図4：コペルニクスクレーターの写真。緑丸は年代を導出するにカウントした直径 0.1-1km の微小クレーター

## Press Release

ような現象が起こる確率は極めて低く、小惑星の破碎により破片が月全体に相次いで降り注いだと考えられます。

アポロ月試料のインパクトガラスの放射年代、月面のクレーターのサイズ、月と地球の衝突断面積などを考慮すると、地球が全球凍結を起こす直前の8億年前に 100km サイズ以上の小惑星が破碎し、少なくとも総量  $(4-5) \times 10^{16}$  kg の天体が地球に飛来したことが明らかになりました。これは、6550 万年前に恐竜を絶滅させた天体衝突の 30-60 倍に匹敵するもので、当時の地球環境に甚大な影響を与えたと考えられます(ちなみに、100km サイズの天体の衝突・破碎頻度は 10 億年に一度程度と見積もられています)。

このような地球-月システムに小惑星シャワーをもたらした、母天体はどのような天体だったのでしょうか。直径 93km もあるコペルニクスクレーターを形成するには、破碎した小惑星の母天体は 100km 以上の大きさが必要で、かつ、その場所が共鳴軌道<sup>※9</sup>と呼ばれる不安定領域の近くに存在しなければなりません。このことから、8.3 億年前に分裂し、約半分近くの破片の軌道が乱され小惑星帯から失われた Eulalia ファミリー(オイラリア族)の可能性が高いと考えられます。

興味深いのは、この Eulalia ファミリー(オイラリア族)は、「はやぶさ2」や「OSIRIS-Rex」が探査している小惑星リュウグウやバンヌと反射スペクトルが似ていることから、C型の地球近傍小惑星の母天体候補として注目されている小惑星族だということです(Bottke et al. 2015, Sugita et al. 2019)。一般に地球近傍小惑星の寿命は短く、数億年以内に小惑星帯(メインベルト)から供給されるメカニズムが必要です。

これらの知見を統合すると、8億年前に大規模に破碎した小惑星の一部は地球型惑星や太陽に落下し、一部は現在の Eulalia 族(オイラリア族)として小惑星帯(メインベルト)に残り、一部はラブルパイル構造となって地球近傍小惑星へと軌道進化した、というシナリオを描くことができます。

### ❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

恐竜が絶滅した地層から、地表では珍しいイリジウム(Ir)元素の濃集が見られたことから、今から 6550 万年前、直径約 10-15km サイズの天体が地球に衝突したと考えられています。このようなサイズの天体が地球に衝突する確率は1億年に1回程度と見積もられていますが、地上に残存するクレーターはせいぜい6億年前までしか遡れません。本研究では「月」を鏡として、地球の過去について調べました。

今回の「月のクレーター」の研究から、いろいろなことが示唆されます。

1つ目は、8 億年前の地球環境への影響です。我々の研究から総量  $(4-5) \times 10^{16}$  kg もの小惑星の破片が地球に降り注いだことが明らかになりましたが、現在のところイリジウム(Ir)の濃縮のような、地球化学的な明確な証拠は見つかっていません。しかし、地球全球凍結の直前に海洋中のリン(P)の濃度が4倍に急増し、生命の多様化を促進した可能性を指摘する報告はあります(Reinhard et al. 2017)。本研究から、小惑星シャワーで地球に降ったリンの総量は、現在の海洋中のリンの10倍程度と見積もられ、地球の表層環境に何かしらの影

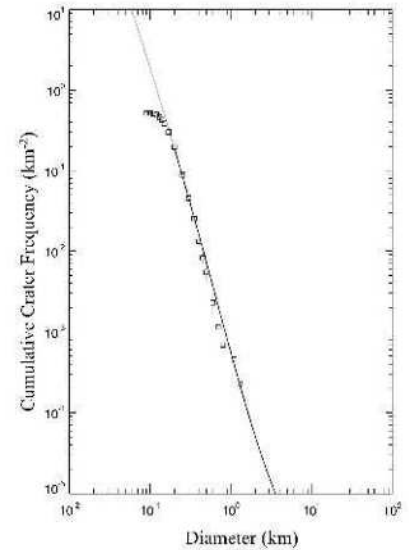


図5: コペルニクスクレーター周辺域の微小クレーターのサイズ分布

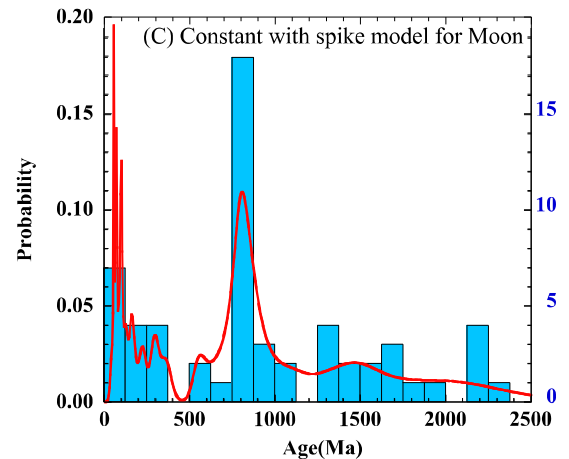


図6: 月のクレーターの年代分布(Maは百万年)



## Press Release

響を与えたとしてもおかしくありません。この研究を契機に、「**8億年前の環境変動は、地球外に原因があったかもしれない**」という観点で地球科学が進展すると嬉しく思います。

2つ目は、C 型小惑星による月表面への揮発性物質の汚染についてです。これまで、アポロ計画によって持ち帰られた岩石試料から月は炭素などの揮発性物質は存在しないと思われていました。ところが、最近の観測で、水や炭素イオンの揮発性物質がグローバルに存在することが明らかになってきており(Yokota et al. 2020)、「月は揮発性元素をもつかもたないか」ではなく「月はいつから、揮発性元素をもっていたのか」に論点が変わってきています。今回の我々の発見は、太陽系 46 億年の歴史において**比較的最近の C 型小惑星のシャワーによって、揮発性元素が月面全体にもたらされた可能性を示唆**します。

3つ目は、地球近傍の C 型ラブルパイル小惑星と月の関連性についてです。今回、我々は**小惑星族の破碎年代と軌道要素から、月と地球に小惑星シャワーをもたらした母天体として Eulalia 族(オイラリア族)の可能性が高い**と指摘しました。先に述べたように、この Eulalia 族(オイラリア族)は、反射スペクトルの類似性から、小惑星リュウグウやベンヌの母天体候補としても注目されています。2020 年冬に小惑星リュウグウから地球に帰還するリターンサンプルの放射年代測定により、母天体の破碎年代が明らかになれば、**月面にコペルニクスクレーターを作った小惑星シャワーと、地球周辺に存在する C 型ラブルパイル小惑星との関連性が明らかになります**。小惑星で回収したサンプルの分析から目が離せません。

このように本研究成果は、地球科学／太陽系科学における全く新しい視点を提示するものであり、幅広い分野への波及効果が期待されます。

### ❖ 特記事項

本研究は、寺田健太郎教授(大阪大学大学院理学研究科)、諸田智克准教授(東京大学大学院理学系研究科)らにより行われました。本研究成果は、2020 年 7 月 22 日(水)午前 0 時(日本時間)に英国科学誌「Nature Communications」(オンライン)に掲載されます。

タイトル: “Asteroid shower on the Earth-Moon system immediately before the Cryogenian period revealed by KAGUYA ”

著者名: Kentaro Terada, Tomokatsu Morota, Mami Kato

DOI: 10.1038/s41467-020-17115-6

### ❖ 用語説明

#### ※1 月周回衛星「かぐや」

宇宙航空研究開発機構(JAXA)の月周回科学観測衛星。2007 年 9 月に打ち上げられ、2009 年 6 月まで主に月の全球マッピングなどの観測を行った。

#### ※2 地球近傍小惑星

地球に接近する軌道を持つ小惑星。一般に、地球近傍小惑星になってからの寿命は数千万年程度と見積もられており、最終的には地球型惑星への衝突、もしくは太陽に落下すると考えられている。

#### ※3 C 型小惑星

炭素質の物質を多く含む小惑星。

#### ※4 放射年代

岩石中の放射性元素(例えば  $^{238}\text{U}$  や  $^{40}\text{K}$ )の放射壊変を利用して求めた年代。

## Press Release

### ※5 小惑星族

軌道長半径、離心率、軌道傾斜角など類似の固有軌道要素を持つ小惑星の集団。過去の小惑星同士の衝突によって生じた断片であることが多い。

### ※6 ラブルパイル天体

小惑星リュウグウやベンヌのように、破碎した岩塊が再集積することによって形成された天体。

### ※7 地球型惑星

水星、金星、地球、火星のこと。

### ※8 小惑星帯(メインベルト)

太陽系の中で火星と木星の間にある小惑星の軌道が集中している領域。

### ※9 共鳴軌道

ある天体の周りを公転する 2 つの天体が互いに重力を及ぼし合う結果、両者の軌道が変化してしまう軌道のこと。例として、木星の重力による共鳴により、軌道周期が木星と3対1となる小惑星軌道は安定には存在できないことが知られている。

### 【研究者のコメント】

私たちの「月」は、その存在自体が不可思議で、地球惑星科学分野の最重要研究テーマですが、今回の我々の研究では、「月には風化がない」という特徴を利用して、太陽系 46 億年の歴史の目撃者として「月」を利用しました。月のクレーター形成史を調べることで、知られざる地球の歴史だけでなく、今世界が注目しているC型地球近傍小惑星リュウグウやベンヌの起源へと研究が広がり、非常にワクワクしました。

アポロ計画から約 50 年。人類は再び月を目指しており、今後、皆さんが月を見上げる機会が増えることでしょう。そんな時、「月は地球の鏡で、月を見ることで地球の過去がわかる」というロマンを一緒に感じていただければ嬉しく思います。

## Press Release

### ❖ 本件に関する問い合わせ先

#### <研究に関すること>

大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 教授 寺田健太郎(てらだけんたろう)

TEL:06-6850-5495 FAX: 06-6850-5480

E-mail: [terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp](mailto:terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp)

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 准教授 諸田智克(もろたともかつ)

TEL:090-9443-6651

E-mail: [morota@eps.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:morota@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

#### <広報・報道に関すること>

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL:06-6850-5280 FAX:06-6850-5288

E-mail: [ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp](mailto:ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp)

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

TEL:03-5841-0654

E-mail: [kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp](mailto:kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp)