特集「宇宙防災:科学と工学の新たな展開」 ふたご座流星群の月面衝突閃光から探る 活動小惑星Phaethonのcmサイズ粒子

阿部新助1. 柳澤 下久2. 小野寺 丰祐3

2024年6月14日受領, 査読を経て2024年7月25日受理

(要旨) ふたご座流星群母天体である小惑星Phaethonを起源とするcmサイズ粒子の物理量は、活動小惑星の起源や彗星から小惑星への進化過程を理解する上で重要である。2018年ふたご座流星群に伴う月面衝突閃光の観測から、わずか3時間の間に11イベントが検出された。月面に衝突したPhaethon起源のメテオロイドの質量は8~350 g、換算直径は1.7~5.9 cm、衝突クレータ直径は1~4 mと推定され、フラックス、質量指数、クレータのサイズ指数などが導出された。月周回衛星画像からクレータが同定されれば、未解明である発光効率の決定に繋がり、cmサイズ粒子の空間情報は、Phaethonのダスト・トレイル形成の謎に一石を投じるであろう。

1. はじめに

彗星や小惑星を起源とする直径30 μm~1 mの 粒子を流星体(メテオロイド: meteoroid)と呼ぶ. 直 径が1 mm程度のメテオロイドが秒速数10 kmで地 球大気圏に突入する際の発光現象が流星(meteor) 現象である. 一方, 直径がcm以上のメテオロイド が月面に高速衝突すると, 0.01~0.1秒程の短時間 発光が発生する. この現象を月面衝突閃光(Lunar Impact Flash,以下LIF)と呼ぶ. 典型的なLIFは, 可視光から近赤外波長領域で発光し, 月面の夜側 領域の望遠鏡観測により,約5~11等級の点光源とし て観測される[1,2].

金星よりも明るい火球(fireball)は、cmサイズ以上のメテオロイドの大気圏突入時のアブレーションによって発光するが、一般的なmmサイズの肉眼流星と比較すると低頻度である[3](図1). 一方、月面(半月)に衝突するLIFの頻度は、地上の単地点観測(天頂角60°までの天空)に比べて約100倍の面積を

見渡すことになり、効率良くcmサイズ以上のメテオ ロイドを捉えることができる。 つまりLIF観測は、地 球-月圏(シスルナ領域: Cislunar Space)に流入す る微小天体のうち未解明領域である流星と小惑星 を繋ぐcm~数10 cmのメトロイドのサイズ分布. 衝 突頻度,季節・時間変動を統計的に調べることがで きる新たなツールといえる.しかし、地上からのLIF 観測は、月面日照側からの迷光により観測可能な 月齢が三日月から半月までに限られるなど、安定し た長時間継続観測は困難である.一方、地球-月ラ グランジュ第2点(EML-2)を基準としたハロー軌道 (Near Rectilinear Halo Orbit: NRHO)などか らは、LIFの長時間継続観測が可能となり、メテオ ロイド衝突モデルのアップデートと衝突予報の持続 的な提供が可能となり[4], 月面活動の際のリスク評 価としても応用可能な自然現象である。また、アポロ 計画で設置された4ヶ所の月震ネットワークでは、計 12.000以上の月震イベントが観測され、そのうち約 15%がメテオロイド(流星体)の月面衝突が原因と考 えられている[5]. 月震は、月の内部構造モデル推定 に使われてきたが、震源の位置と発生時刻の不確定 性もあり、月の内部構造決定には至っていない、震 源位置が明瞭な月面衝突閃光を用いれば、1点の走

^{1.}日本大学理工学部 航空宇宙工学科

^{2.} 電気通信大学

^{3.}東京大学地震研究所

abe.shinsuke@nihon-u.ac.jp

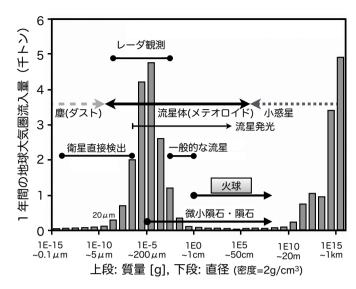


図1: 地球衝突天体のサイズ(質量)分布[3]. 地球大気圏に流入する宇宙物質の年間平均値を質量とサイズ(直径)で表した。また、それぞれのサイズに対応する主な観測手法も示している。流星と小惑星をつなぐサイズ領域は衝突頻度が少なく、地上からの望遠鏡検出が困難であるため、月面衝突閃光観測も有効な手段となる。

時データからでも内部構造を推定することが可能となる[6].

本論文では、月面衝突閃光観測キャンペーン(日大 -電通大-会津大-ISAS/IAXA-台湾・鹿林天文台)に より得られた2018年「ふたご座流星群(Geminids)」 について、未発表であった日本大学理工学部(船橋 キャンパス)で得られた高解像度ビデオ撮像の詳細 解析結果を報告する. ふたご座流星群は、理想条 件下の1時間あたりに眼視観測可能な最大出現数 ZHR(Zenith Hourly Rate)が150個におよび、現 在、年間を通して最も出現数の多い流星群となっ ている. 母天体は、B型小惑星に分類される活動 的小惑星「ファエトン: (3200) Phaethon」である [7]. 離心率e=0.89, 近日点距離 q=0.14 au, 周期 P=1.44年の特異な軌道を持つ彗星-小惑星遷移天 体であり、枯渇彗星に近いPhaethonの流星群ダス ト・トレイルの形成と進化, 分裂天体2005 UDとの 関連は、「Phaethon-Geminids-Complex(PGC) 複合群問題」として世界中の研究者が注目してい る[8-10]. さらにPhaethonは、2025年度打ち上 げ予定のJAXAのDESTINY (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science)のフライバイ探査ターゲットと なっており、μmサイズのダストのその場計測も行わ れる計画である[11]. Phaethonの近日点付近での 表面温度は1000 K以上に達し、放出されたmmサ イズのダスト中に含まれる揮発性物質であるナトリウ ムの枯渇や変動が、ふたご座流星群流星の統計的 な分光観測から示されている[12]. 一方, NASAの サンプル・リターンミッションOSIRIS-RExのター ゲット天体であったB型小惑星Bennuの探査中に は、驚くべきことに、cmサイズの小石やダストの噴出 が複数回観測され、Phaethonと同様の活動小惑星 であることが判明した[13]. Bennuの軌道は地球に 近接しており、将来的に地球に衝突する可能性もあ る. これらの地球接近活動小惑星由来のcmサイズ 粒子のサイズ分布や空間フラックスなどを調べるこ とは、放出メカニズムの解明や彗星から小惑星への 進化を紐解く新たな知見となることが期待される.

2. 月面衝突閃光観測と解析

月面衝突閃光観測は2018年12月15日17時30分頃から20時40分頃まで約3時間(日本時),日本大学理工学部・船橋キャンパス内(東経140°03m32.328s,

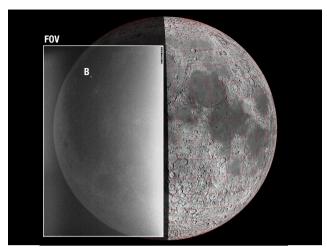


図2:ふたご座流星群月面衝突閃光(日本大学理工学部船橋キャンパスにて). 約7.3等級の月面衝突閃光[B]のPrimary望遠鏡による観測画像 (FOV)を月面マップに重ねた図である。地球照により月面の海と高地の模様が見えるため、正確な位置合わせが可能であった。

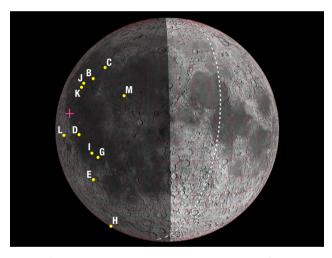


図3:2018年12月15日の「ふたご座流星群」の月面衝突閃光発生場所、+印は同日19時(日本時)に「ふたご座流星群」の輻射点が天頂に来る月面上の位置を示しており、点線は輻射点が地平線方向に見える位置を表す、東側が日照、西側が日陰の半月であり、点線より西側の月面上(図では左側)に「ふたご座流星群」が衝突したため、月面衝突閃光は、日陰領域で観測可能であった。

北緯+35° 43m31.152s, 標高40 m)で実施された. 口径400 mmと200 mmの2台のOffiicina Stellare 社カセグレン式望遠鏡を昭和機械製作所フォーク式 赤道儀35EFに同架した月面衝突閃光観測専用望遠鏡「(通称)ガンダム望遠鏡」システムを用いて月追尾 観測を行った(表1). GPSに同期した冷却式高感度 CMOSカメラ(波長感度: 350-800 nmで量子効率 20%以上)を両望遠鏡のカセグレン焦点にフィルター 無しで接続し、露光時間1/60秒, 60 fps(frames

per second)のSER-format動画としてPCに記録し(表2)、観測後に動体検出ソフトウェアにより閃光候補の検出を行なった。検出された月面衝突閃光と観測視野を月面図に投影した例を図2に示す。観測時の月齢は7.3(49%)の半月で、月面の日陰(夜側)の地球側にふたご座流星群が衝突する好条件であり、約3時間で11イベントを検出することができた。全てのイベントは、直線距離で約50 km離れた電気通信大学でも同時検出されており[14]、人工衛星や

表1: 望遠鏡の仕様.

Telescopes	Diameter	Focal length	Focal ratio	Resolution	FOV	
Telescopes	(mm)	(mm)		(")	(deg)	
Primary(RiFast)	400	1520	3.8	0.8	0.42 x 0.27	
Secondary(Veloce)	200	600	3.0	2.0	1.08 x 0.68	

※Resolution と FOV (Field of View) は、表 2 のカメラを付けた場合の値.

表2:カメラの仕様と観測パラメーター.

Camera ZWO ASI	Pixels H x V	Pixel size H x V (μm)	Exposure time (ms)	Frame rate (fps)	ADC (bit)	Interface
174MM-Cool	1936 x 1216	5.86 x 5.86	0.0167	60	12	USB3.0

電気ノイズではなく月面衝突閃光であると判定された. 観測された11個の月面衝突閃光イベントをB~Mとして図3と表3にまとめる. Yanagisawa et al. (2021)の月面衝突閃光発生位置には速報値も含まれており、さらに、地球照で背景に見えたグリマルディとアリスタルコスとの相対位置から緯度・経度を求めたため誤差が大きいことが、今回の再解析により判明した. また、本研究では、月面衝突閃光の位置測定を0.1°~0.5°程度と従来の10倍程度高い精度で計測することができた.

方法について説明する.地球照や迷光などの背景光 (sky background)をイベント発生直前の画像を用いて減算し、ほぼ点光源である月面衝突閃光の開口 測光(aperture photometry)を行った。今回の観測時間中の月の天頂角は、約44度~60度と大きく変化しており、視野内外の異なる天頂角で取得した標準星データを用いて減光係数を求め、大気減光(airmass)補正を行っている。閃光の最大発光等級は、フィルター無しでの観測波長とほぼ同じ波長範囲のGaia DR2カタログのGバンド等級で算出し、変換係数からJohnson-Cousinsフィルターシステムの Rバンド等級[15]を導出した。先行研究[16,17]と同じ Rバンドで比較する上でも都合が良い。Rバンドでの発光エネルギー(energy)Etotalは、

$$E_{total} = f_{\lambda} \Delta \lambda f \pi d^2 t []$$
 (1)

アラグ

$$f_{\lambda} = 10^{-7} \times 10^{-\left(\frac{R+21.1+ZP_R}{2.5}\right)} [\text{Jcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Å}^{-1}]$$
 (2)

 $\Delta\lambda$ はRバンドのフィルター帯域(1607Å), dは観測者から月面までの距離(3.956×10 10 cm), 継続時間tは露光時間(0.01667 s)で近似し、また ZP_R はRバンドフィルターのゼロ点で0.555である[15]. 一方、fは衝突プルームからの発光の放射立体角のファクターを表し、月表面から半球(2π ステラジアン)に閃光が放射されたと考え、f=2 を採用している. 次に衝突運動エネルギーKEを求めるためには、次式で示されるように発光効率 η を仮定する必要がある.

$$KE = \frac{E_{total}}{\eta} [J]$$
 (3)

発光効率ηは、超高速衝突実験の結果等から速度の関数として次式で示されている[18,19].

$$\eta = 1.5 \times 10^{-3} \exp\left\{-\frac{(9.3 \,\mathrm{km/s})^2}{v^2}\right\}$$
(4)

発光効率については不確定性が大きく、本論文では モデル値 $\eta=1.4\times10^{-3}$ と最小モデル値 $\eta=5.0\times10^{-4}$ の2つを採用した. 以上から運動エネルギーKEが求まり、衝突体の質量は最終的に次式で決定される.

$$m = \frac{2KE}{v^2} \text{ [kg]} \tag{5}$$

ここで、ふたご座流星群の月面衝突速度v=34.4 km/sと既知である。また、ふたご座流星群メテオロイドの平均密度 ρ =3,000 kg/m³[20]からメテオロイドの直径が推定され、これらの衝突パラメータから π スケーリング則[21]を用いて、月面レゴリス上に形成された場合のクレータのリム直径を見積ることが

表3:2018年ふたご座流星群の月面衝突閃光のまとめ、電気通信大学と同時観測が成立した11個のFlash ID[14]、衝突閃光が発生した12月15日の日本時間(JST)、月面座標(Longitude, Latitude)、発光の最大R等級(R-mag)、衝突天頂角(Impact Angle)、発光効率範囲を仮定した衝突エネルギー(Impact Energy)、衝突メテオロイドの質量(Meteoroid Mass)、衝突メテオロイド直径(Meteoroid Diameter)および月面レゴリス上に衝突した場合の形成クレータ・リム直径(Crater Lim Diameter)をまとめた。閃光の等級について、先行研究[14]では、分光スペクトルの1次像から特定波長域の積分で導出されているのに対して、本研究では、撮像光学系で取得された最大発光点での等級を採用している。また、等級は、検出カメラの露光時間(17ms)のどのタイミングで閃光が開始したのかにも依存する。推定されたクレータ直径についても、発光効率(仮定)と衝突地点への突入角度に依存するため、先行研究[14]と異なる結果となった。なお、これらの閃光の黒体温度は、分光観測から2,000-4,000 Kと見積もられている[14]。

Flash	JST	Longitude	Latitude	R-mag	Impact Angle	Impact Energy		Meteoroid Mass		Meteoroid Diameter		Crater Lim Diameter	
ID	(hh:mm:ss)	(deg.)	(deg.)		(deg.)	(J) η=1.4x10 ⁻³	(J) η=5.0x10 ⁻⁴	(g)	(g)	(cm)	(cm)	(m)	(m)
В	17:29:34	-56.5±0.4	31.6±0.4	7.3	24.5	5.03E+07	1.40E+08	85.0	237.1	3.782	5.324	2.99	4.08
C	17:58:49	-51.1±0.1	38.7 ± 0.3	10.5	32.9	2.47E+06	6.89E+06	4.2	11.6	1.388	1.947	1.13	1.56
D	18:09:47	- 58.0±0.2	0.9 ± 0.2	10.2	14.1	3.49E+06	9.73E+06	5.9	16.4	1.554	2.186	1.33	1.84
E	18:44:04	- 52.0±0.4	-22.9±0.3	9.0	36.7	1.01E+07	2.82E+07	17.1	47.7	2.216	3.120	1.73	2.38
G	19:23:07	-44.1±0.5	-9.3±0.2	8.6	31.3	1.45E+07	4.04E+07	24.5	68.4	2.499	3.518	1.98	2.73
Н	19:25:42	-75±5	-56.5±1.0	6.4	66.6	1.10E+08	3.06E+08	185.2	516.4	4.904	6.902	2.78	3.80
I	19:28:46	-48.7±0.4	-7.5±0.3	7.8	26.6	3.25E+07	9.07E+07	55.0	153.3	3.272	4.604	2.60	3.56
J	19:35:56	-65.2±0.3	28.7±0.3	9.0	19.0	1.05E+07	2.94E+07	17.8	49.7	2.246	3.163	1.87	2.57
K	19:54:34	-66.1±0.2	25.5±0.3	9.4	15.7	7.19E+06	2.00E+07	12.1	33.9	1.975	2.784	1.66	2.30
L	20:22:12	- 75.8±0.7	0.1±0.3	7.9	12.0	2.73E+07	7.62E+07	46.2	128.8	3.087	4.344	2.55	3.49
М	20:35:52	-32.7±0.3	24.5±0.3	8.6	37.4	1.53E+07	4.26E+07	25.8	71.9	2.542	3.577	1.96	2.70

できる(表3).

3. Phaethonから放出されるcm サイズのメテオロイドのフラックス

2018年ふたご座流星群の活動極大は.国際流星機 構 IMO(International Meteor Organization) による眼視観測の集計結果から、2018年12月15日 01:09(JST)=太陽黄径262.358°付近で、ZHR=155.34 ±10.50個の出現であった[22]. 一方, ふたご座流星群 に伴う月面衝突閃光の発生は、太陽黄経(月位置に補 正済み) 262.894°~263.026°に集中しており、半日以 上遅れたピークであった. これは、ふたご座流星群の 出現極大を構成する多数のmmサイズのメテオロイド は、Poynting-Robertson(PR)効果による減速で 軌道長半径が小さくなり[23,24],極大時刻が早まっ たとして解釈できる. 月面衝突閃光の最大R等級分 布関数の冪は、ふたご座流星群(本研究):r=2.35 ±0.42, NELIOTA(ギリシア:口径1.2 m望遠鏡): r=3.42±0.22, NASA(米国:口径0.35 m, 0.5 m望 遠鏡): r=3.65 ± 0.40(群流星), r=2.67 ± 0.24(散在 流星)となっている(図4). 継続的に行われている月面 衝突閃光の等級分布と比べると、統計的な数は不足しているものの、ふたご座流星群は、明るい月面衝突閃光つまり大きなサイズのメテオロイドが相対的に多いことが分かる。これは、活動小惑星を起源に持つ流星群の特徴であると推測できる。表3の平均値を用いて、ふたご座流星群メテオロイドの質量m、直径dおよび衝突クレータの直径Dの単位時間、単位面積あたりの頻度分布関数 $(h^{-1}km^{-2})$ は、累積個数をNとすると、次の冪乗則で表される。

$$\begin{array}{lll} \text{Meteoroid Mass:} & \log_{10} N(>m) = \log_{10} N_1 - (s-1) \log_{10} m & (6) \\ \text{Meteoroid Diameter:} & \log_{10} N(>d) = \log_{10} N_2 - (\beta_1-1) \log_{10} d & (7) \\ \text{Crater Diameter:} & \log_{10} N(>D) = \log_{10} N_3 - (\beta_2-1) \log_{10} D & (8) \\ \end{array}$$

最終的に、月面に衝突したふたご座流星群メテオロイドの質量は8~350 g、直径は1.7~5.9 cmと推定され、質量指数(mass index)s=1.78 \pm 0.16、サイズ指数(size index) β_1 =3.23 \pm 0.28が求まった。また、衝突クレータの推定直径範囲は1~4 mであり、サイズ指数(size index) β_2 =3.43 \pm 0.51が得られた(図5). 2015年ふたご座流星群のCMOR(Canadian Meteor Orbit Radar)レーダー観測、NASA MSFC(Marshall Space Flight Center)

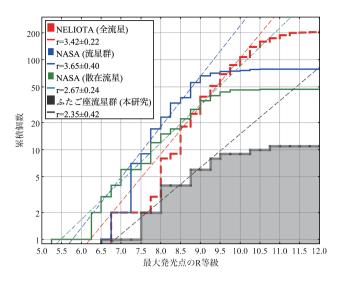


図4:ふたご座流星群の月面衝突閃光のR-等級分布と他のプロジェクト(NASA[16]およびNELIOTA[17])との比較. 等級分布関数rを示す.

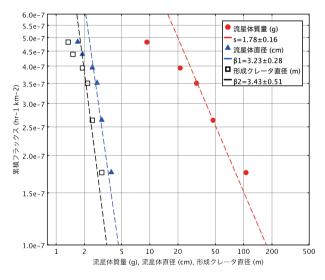


図5:ふたご座流星群メテオロイドの質量(g), 直径(cm)と月面衝突で形成されたクレータ直径(m)の頻度分布. (6,7,8)式でフィッティングして得られた質量指数sとサイズ指数βを示す.

の8個の広角カメラおよびMSFCの月面衝突閃光観測から質量範囲 $1.8 \times 10^{-4} \sim 30$ gでの質量指数(mass index)s= 1.68 ± 0.04 が示されており[25], 我々の観測と調和的である。一方,月のクレータのサイズ頻度分布をまとめた報告によると,直径 $1 \times 10 \times 10$ mの範囲で $\beta = 3.6$ となっており[26], 今回得られた直径 $10 \times 10 \times 10 \times 10$ m以下のクレータ・サイズ分布と誤差範囲内で繋がることが確認できた。2018年ふたご座流星群の月面衝

突閃光観測で特筆すべきは、太陽黄経262.894°~263.026°の3時間あまりで11回の衝突閃光が検出された結果から、衝突頻度が 4.8×10^{-7} h^{-1} km $^{-2}$ 、フラックスが $2.1\sim5.9\times10^{-5}$ gh $^{-1}$ km $^{-2}$ が導出されたことである。このフラックスは、Suggs et al. (2014)[16]で示された、質量30 g以上の71個のメテオロイドの月面衝突閃光のフラックスと比較して、 $1.0\sim2.9$ 倍となった。

4. 今後の展望

月面衝突閃光の継続モニターは、人類の月面活動 に影響を与える衝突メテオロイドの二次放出物到来 のリスクを評価可能にするだけでなく. 月震計と協 調することで、月の核やマントル、外層などの内部構 造を正確に推定することが可能となり、月の誕生と 地球-月系の進化についての新たな知見が得られる 可能性が高い. 本研究では, 月面衝突閃光の衝突地 点を平均誤差1.5 km(緯度方向)~5 km(経度方向) で精度良く求めることができたため、NASAの月周 回衛星LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) 搭載の狭視野 カメラ NACs (Narrow Angle Cameras)が衝突前後に撮影した空間解像度0.5 mの高解像度データから衝突クレータが同定され ることが期待される. 我々のグループでは、ISAS/ IAXA超高速衝突実験により石英砂をターゲットに 圧力0.01 Pa環境下でポリカーボネート球を衝突速 度約6.5 km/sで衝突させた際の発光効率がおよそ $\eta = 3 \times 10^{-4}$ になることを示したが[27], 実際の月面 衝突閃光の条件は模擬できていない. 今回の衝突 閃光で形成されたクレータが同定されてサイズが判 明した場合、月面衝突速度が既知であることから、 衝突速度の不確定性がなくなり、未解明である発光 効率の決定に繋がる. また、Phaethonから放出さ れたmm~cmサイズのダストの進化モデルからは. ダスト放出時期には約2,000年~20,000年前と大 きな隔たりがあり決着がついていない[28]. 月面衝 突閃光から得られたcmサイズの空間分布情報は、 Phaethonダスト・トレイルの形成年代を推定する上 でも鍵となる可能性が高い.

謝辞

月面衝突閃光観測望遠鏡システムは、日本大学理工学研究所"先導研究推進助成金"により(株)昭和機械製作所・代表取締役・渡邉和明氏の協力のもと構築された。先導研究共同研究者である日本大学理工学部物理学科・教授・根來均博士、日本大学理工学部海洋建築工学科・准教授・佐藤信治博士、日本大学理工学部一般教育・教授・伊豆原月絵博士

に感謝する。本キャンペーン観測は、日本学術振興会"二国間交流事業共同研究"(会津大学コンピュータ理工学科・准教授・山田竜平 博士、JAXA宇宙科学研究所・教授・田中智 博士、立教大学・助教・福原哲哉 博士、JAXA宇宙科学研究所・助教・白石浩章 博士、フランス・Institut de Physique du Globe de Paris・Dr. Philippe Lognonne、川村太一博士、Observatoire de Paris・Dr. Jeremie J. Vaubaillon、Entrée Observatoire de la Côte d'Azur・Dr. Chrysa Avdellidou、他)のサポートで実施された。

参考文献

- [1] Ortiz, J.L. et al., 1999, A&A 343, 57.
- [2] Madiedo, L.M. et al., 2019, Impact Flashes of Meteoroids on the Moon, Meteoroids (Cambridge Planetary Science Book).
- [3] Plane, J.M.C., 2012, Chem. Soc. Rev. 41, 6507.
- [4] Funase, R. et al., 2020, IEEE 35(3), 35.
- [5] 田中智ほか, 2011, 日本惑星科学会誌 20(1), 4.
- [6] Yamada, R. et al., 2011, Planet. Space Sci. 59(4), 343.
- [7] Jewitt, D. et al., 2010, Astron. J. 140, 1519.
- [8] Ohtsuka, K. et al., 2006, A&A 450, 250.
- [9] Devogèle, M. et al., 2020, Planet. Sci. J., 1.
- [10] MacLennan, E. and Granvik, M., 2024, Nature Astronomy 8, 60.
- [11] 荒井朋子ほか, 2024, 日本惑星科学会誌 33(1), 34.
- [12] Abe, S. et al., 2020, Planet. Space Sci. 194, 105040.
- [13] Lauretta, D.S., 2019, Science 366, 3544.
- [14] Yanagisawa, M. et al., 2021, Planet. Space Sci. 195, 105131.
- [15] Bessell, M.S. et al., 1998, A&A 333, 231.
- [16] Suggs, R.M. et al., 2014, Icarus 238, 23.
- [17] Liakos, A. et al., 2020, A&A 633, A112.
- [18] Bellot Rubio, L.R. et al., 2000, Astrophys. J. 542, 65.
- [19] Swift, W.R. et al., 2011, NASA-CP-2011 216469,
- [20] Babadzhanov, P.B. and Kokhirova, G.I., 2009,

A&A 495, 353.

- [21] Holsapple, K.A., 1993, Annual Review of Earth & Planet. Sci. 21, 333.
- [22] Molau, S., 2020, WGN 48(3), 92.
- [23] Liou, J.C. and Zook, H.A, 1995, Icarus 116, 186.
- [24] Ryabova, G.O, 2012, Mon. Not. R. Astron. Soc. 423, 2254.
- [25] Blaauw, R.C., 2017, Planet. Space Sci. 143, 83.

- [26] 諸田智克, 平田成, 2015, 日本惑星科学会誌 24(3), 214
- [27] Fuse, R. et al., 2020, Planet. Space Sci. 187, 104921.
- [28] Jo, H. and Ishiguro, M., 2024, A&A 683, A68.

著者紹介

阿部 新助



日本大学理工学部航空宇宙工学 科准教授.総合研究大学院大学 数物科学研究科天文科学専攻修 了.博士(理学).宇宙科学研究 所,チェコ共和国オンドジェヨフ 天文台,神戸大学,台湾國立中央

大学を経て2013年より現職. 専門は, 流星・彗星・小惑星, 月面衝突発光現象, 高速衝突実験, 天体分光学など. 日本天文学会, 日本惑星科学会, 日本航空宇宙学会, 国際天文学連合(IAU), 国際流星機構(IMO)に所属.

柳澤 正久



電気通信大学名誉教授. 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修了. 理学博士. 宇宙科学研究所を経て1991年から2019年まで電気通信大学に所属. 専門は, 高速衝突実験, 月面・木星衝

突発光現象など. 日本惑星科学会, 国際天文学連合 (IAU), American Geophysical Unionに所属.

小野寺 圭祐

東京大学地震研究所特任研究員. 2022年3月に総合研究大学院大学物理研究科宇宙科学専攻および Université Paris Cité,École doctorale Science de la Terreet de l'environnement et physique de l'Univers修了. 博士 (理学,地球環境科学). 2022年4月より現職.専門は,惑星地震学・固体-大気結合系地震学など. 日本惑星科学会,日本地震学会, European Geosciences Unionに所属.