

# 月面衝突閃光と微光流星の多波長同時観測によるメテオロイドのサイズ分布決定

## Determination of Meteoroid Size-distribution Lunar Impact Flashes and Radar-Optical Simultaneous Observations

阿部新助（日本大学理工学部航空宇宙工学科）

MU Radar & Tomo-e Gozen teams, Lunar Impact Flash team, EQUULEUS/DELPHINUS development team

### 本研究の背景と概要

太陽系を形成した固体物質は、合体集積と衝突破壊を繰り返して現在の惑星、衛星、小天体（小惑星、彗星、流星体=メテオロイド、塵=ダスト）を生み出してきた。太陽系天体の直径や質量の個数分布は、平衡状態に達した太陽系の衝突と集積の進化史を反映しているといえる。しかし、これらの小天体の観測手法は多岐に渡っており、固体物質のサイズ分布を統計的・統一的に一つの線として繋ぐことはできていない。本研究の最終目標は、メテオロイド(meteoroid)と呼ばれる直径数  $10\mu\text{m}$ ~数  $10\text{cm}$  の太陽系固体物質のうち、これまで観測的に困難であった「小さい側:Small End(直径数  $10\mu\text{m}$ ~数  $\text{mm}$ )」と、「大きい側:Large End(直径数  $\text{cm}$ ~数  $10\text{cm}$ )」の『End-to-Endのサイズ分布』を精度良く決定して、「太陽系内におけるダストと小惑星を繋ぐダスト・メテオロイドのサイズ分布を明らかにし、地球流入メテオロイドの起源と進化についての新たなモデルを構築する」ことである(Fig.1)。

メテオロイドのサイズ、質量、組成、衝突速度、衝突頻度、衝突頻度の時間・季節変化、個々の軌道分布などの物理量を正確に把握することは、シスルナ空間と呼ばれる地球-月周辺に到来するメテオロイド環境を理解することになる。特に、衝突体の質量(サイズ)毎の分布と地球-月での衝突頻度を知ることは、母天体である小惑星・彗星との関連や、メテオロイドの起源と進化を明らかにするだけでなく、今後ますます増加する地球周回軌道や月面上での人類の活動に直接関わる、微小天体の衝突リスク評価にも貢献すると考えられる。

### 1.1 「月面衝突閃光観測によるメテオロイド Large-end の解明」に向けたこれまでの成果

メテオロイドが秒速数  $10\text{km}$  で月面に衝突する際、運動エネルギーの一部が可視光から近赤外波長のエネルギーに変換され、閃光として観測されるのが「月面衝突閃光(Lunar Impact Flash)」である。直径数  $\text{cm}$ ~数  $10\text{cm}$  サイズ(衝突速度と発光効率を仮定した質量;  $\text{kg}$  オーダー)のメテオロイドの地球流入量(フラックス)は、フラックス自体が比較的低いため不確実性が高く、信頼のおける統計データを得るには大きな観測エリアと長時間の継続観測が必要となる。地球から見た典型的な月面衝突閃光現象は、最大発光点で可視光で 5~10 等級、継続時間 0.01~0.1 秒程度の短時間現象であることが知られている。NASA は 2006 年からの継続観測で約 400 イベントを検出しているが、月面衝突閃光は月面昼側に対して非常に暗いため、三日月から半月頃の月面夜側部でのみ検出される。このような厳しい観測条件のため観測期間が限られており、統計的な議論を行うにはデータが不足しているのが現状である。東アジア地域での継続的な取り組みは、米国と欧州を繋ぐ地球の自転の空白領域をカバーする地理的な重要性がある。月面衝突閃光は短時間現象であるため、電気ノイズや宇宙線などのシングルイベントの混入、あるいは人工衛星やスペースデブリの月面通過も起こり得る。これらの誤検出と真の月面衝突閃光を区別するためには、2 台の望遠鏡での同時観測(誤検出の主な要因である電気ノイズと宇宙線を除外)か、2 箇所からの同時観測(電気ノイズ、宇宙線、人工天体の偶発的な月面通過を除外)が必要になる。我々は、2017-2018 年に電気通信大学、JAXA 宇宙科学研究所、会津大学と月面衝突閃光の協定観測を行った<sup>1</sup>。本研究で取得した月面衝突閃光の一覧と導出した物理量は発表資料を参照。また、衝突体となる「ふたご座流星群」の組成の統計的な情報は、地上の流星分光観測から求めている<sup>2</sup>。

### 1.2 「レーダーとシュミット望遠鏡によるメテオロイド Small-end の解明」に向けたこれまでの成果

京大大学生存圏研究所・信楽 MU 観測所の MU レーダーは、直径  $103\text{m}$  の円形敷地に配置された 475 本の直交 3 素子八木アンテナからなる周波数  $46.5\text{MHz}$ (VHF 帯)のモノスタティック・パルスドップラーレーダーである。各アンテナ(ピーク出力  $2.4\text{kW}$ )の固体送受信機の位相制御を行うアクティブ・フェイズド・アレイ方式を利用して、特定の空間に

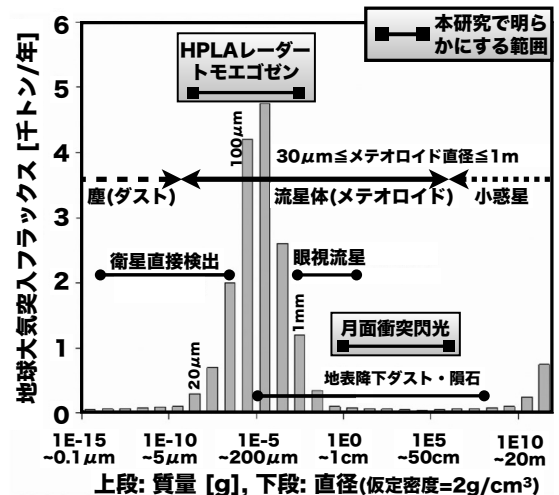


Figure 1. Mass-size distributions of meteoroids influx.

出力 1MW のビームを高速に合成することが可能である。レーダーで検出される同じ微光流星を光学観測するためには、質量にして  $10^5\sim 10^6\text{g}$  以下、明るさでは 10 等級よりも暗い流星までを検出する高感度センサーに加え短時間露光を連続的に可能にする動画カメラが必要となる。我々は、超高感度・超広視野 CMOS カメラ「Tomo-e Gozen(トモエゴゼン)」と東京大学・木曾観測所のシュミット望遠鏡(口径 105cm, 主焦点距離 3.3m/F3.1)を組み合わせた光学観測で、2Hz(露光時間 0.5 秒)で約 12 等級(天頂方向)までの超微光流星の観測が可能である。2018 年 4 月に全視野領域の 1/4 をカバーしたトモエゴゼン試験機を用いた光学・電波同時観測を実施して、約 400 個の同時流星の観測に成功し、これまでで最も暗い流星までの RCS(レーダー反射断面積)と可視等級関係を導出し、質量分布関数を導出することに成功した<sup>3</sup>。トモエゴゼンは、2019 年 10 月から本格稼働を開始しており、例えば同システムに透過型分光素子(グリズム)を装着することにより、世界にも類を見ない HPLA レーダーと光学シュミット望遠鏡による微光流星の同時観測から軌道-質量-組成のビックデータが得られる新たな成果が期待される。

## 2. 本研究からの発展研究

### 2-1. 超高速衝突発光実験と数値計算

真空中での固体-固体の超高速衝突に伴う発光現象のメカニズムは解明されていない。月面衝突閃光現象での衝突体の質量見積りに重要な発光効率(運動エネルギーから特定波長の発光エネルギーへの変換効率)などの物理パラメーターを明らかにすることが重要である。本研究を室内実験から検証することを考え、研究代表者が中心となった超高速衝突閃光の実験的検証提案が、JAXA 宇宙科学研究所・超高速衝突実験施設の共同利用に採択され、2018 年度より実験を開始した。ターゲットに石英砂と玄武岩、衝突体にポリカーボネートと石英球を用いて、二段式ガス銃を用いて真空チャンバー内で秒速 6~7km で衝突させた際の閃光を、超高速分光(波長 400~800nm, 露光時間 200ns, 5 百万 fps) および熱赤外線撮像(波長 10~14 $\mu\text{m}$ , 60fps) で衝突閃光を計測する新たな計測手法を確立した。同様の月面衝突閃光を模擬した室内実験は、NASA エイムズ研究所の超高速衝突実験施設を使った研究成果が発表されているが、アナログの低速(ビデオレート)カメラを用いている点や真空度等の実験条件に問題があるため、実験手法と計測の改良に取り組む必要があることが指摘されており、我々の実験から新たな成果が得られることが見込まれる<sup>4</sup>。

### 2-2. 超小型探査機搭載「月面衝突閃光観測カメラ”DELPHINUS”」の開発

東京大学と JAXA が開発中の 6U 超小型探査機「エクレウス(EQUULEUS: EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)」に搭載される月面衝突閃光観測カメラ「デルフィヌス(DELPHINUS: DETection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft)」の開発が研究代表者がカメラの開発責任者となり行われた<sup>5</sup>。フライトモデルは、2019 年 12 月に完成し 2020 年早春に NASA への引き渡しが行われ、2020 年度に NASA の次世代大型ロケット SLS 初号機の相乗り衛星として打ち上げられる。月へ向かう軌道上で切り離され、独自の水エンジンを使って月の裏側の「地球-月ラグランジュ(L2)点(EML2; Earth-Moon Lagrangian 2)」へ向かう。超小型衛星で初となる EML2 航行技術実証ミッションを通して、月面から 2 万~6 万 km の EML2 ハロー軌道から、世界初となる宇宙からの月面衝突閃光検出を狙い、数ヶ月のミッション・フェーズ中の観測から 100 イベント以上の月面衝突閃光検出達成を見積もっている<sup>6</sup>。NASA が 2024 年に行う宇宙飛行士 2 名による月面着陸に先駆けて、月周回軌道の宇宙ステーション「月軌道プラットフォーム-ゲートウェイ(LOP-G; Lunar Orbit Platform-Gateway)」が建設されるが、日本も LOP-G 建設から有人月探査に参加する計画で、LOP-G 暴露部に月面をモニターするカメラを設置する(あるいは超小型探査機を用いた LOP 軌道からの観測を継続する)ことで、我々が取り組む月面衝突閃光研究が活用されることが期待される。

#### 参考文献

1. M. Yanagisawa, S. Abe et al., "Low dispersion spectra of lunar impact flashes in 2018 Geminids", Planetary and Space Science, 2019 Nov (submitted).
2. S. Abe et al. "Sodium Variation in Geminid Meteoroids from (3200) Phaethon", Planetary and Space Science, 2019 Nov(submitted).
3. R. Ohsawa, S. Abe et al., "Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of Faint Meteors", Planetary and Space Science, 2019 Nov (submitted).
4. R. Fuse, S. Abe et al., "An Experimental Study of Impact Flash : Relationships between Vacuum Level and Luminous Efficiency", Planetary and Space Science, 2019 Nov (submitted).
5. R. Funase et al. (including S. Abe), "Mission to Earth-Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS", IEEE Aerospace & Electro. Systems Magazine, 2020 (in press).
6. R. Fuse, S. Abe, M. Yanagisawa, R. Funase, H. Yano, "Space-based Observation of Lunar Impact Flashes", Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 17, 1-6, 2019.