

月面衝突閃光を用いた水氷探査

阿部新助¹, 奥山純吾¹, 宇田天音¹, 布施綾太¹, 柳澤正久², 長谷川直³

1. 日本大学, 2. 電気通信大学, 3. JAXA 宇宙科学研究所

1. 研究背景・研究目的

彗星や小惑星を起源とする直径 $\mu\text{m}\sim\text{m}$ のダストを流星体(メテオロイド: meteoroid)と呼ぶ。直径が 1mm 程度のメテオロイドが秒速数 10km で地球大気に入射する際の発光現象が流星(meteor)である。一方, 直径 cm~数 10cm のメテオロイドが月面に衝突すると, 0.01~0.1 秒程の短時間発光である月面衝突閃光(Lunar Impact Flash; 以下 LIF)が可視から近赤外線波長領域で発生し, 約 5~11 等級の点光源として地上望遠鏡で観測される。稀な流星現象である火球(fireball)の多くは, cm

サイズ以上のメテオロイドの大気突入によって生じるが, 広大な月面を望遠鏡代わりにした LIF 観測は, 地上単点観測に比べて約 100 倍効率良く cm サイズ以上のメテオロイドを観測することができる。つまり LIF 観測は, 近年のカメラセンサーの感度・速度の向上により可能となった, 地球-月圏へ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メテオロイドのサイズ分布, 衝突頻度と季節・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, 月齢の制限や天候の影響などにより, 安定した長時間モニターは困難である。一方, 月周回あるいは月近傍からは, LIF の長時間継続モニターが可能で, 月面での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期待される。LIF 観測は, 今後の人類の月面活動の際の環境モニターの一つとしても考慮されるべきテーマと考えられる。

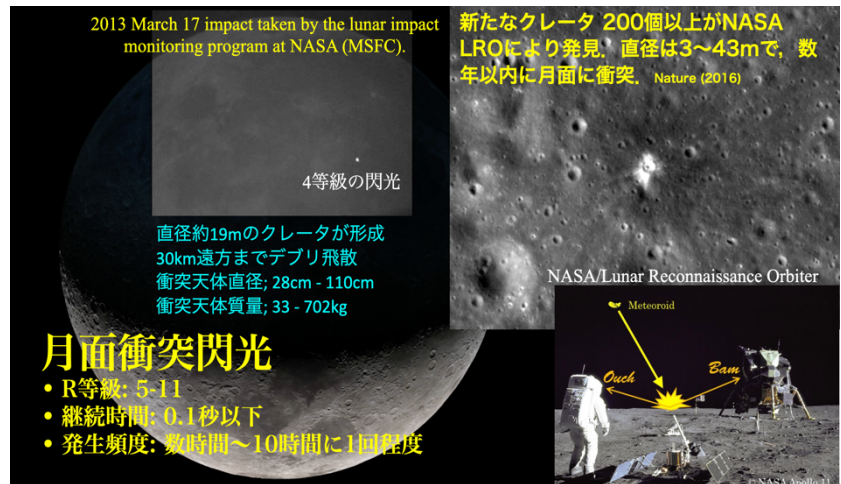


図1. 月面衝突閃光

月面衝突閃光観測を通して, (1)流星と小惑星を繋ぐメテオロイドのサイズ(質量)分布関数と衝突頻度の解明, (2)メテオロイドの月面衝突を震源とした月震計測とのコラボによる月内部構造探査, (3)LIF 分光観測による極域月面下の水氷探査, (4)天体衝突物理を理解するため天然の実験, (5)流星群に伴う LIF によって形成された衝突クレーター付近からのサンプルリターンといった分野横断的で新たな切り口となるサイエンス・テーマ群が考えられる。また, 月面衝突に伴う広範囲におよぶ放出物による影響評価や, 今後増えることが予想される人工飛翔体の廃棄現場となる月面衝突地点の確認などへの利用も考えられる。

近年, 月面表層下に H_2O 氷が存在することが, 月周回探査機 LADEE や成層圏航空機 SOFIA 赤外線観測から強く示唆されている (Benna et al., 2019, Honniball et al. 2020)。そこで, 本研究では, H_2O 氷や CO_2 氷をターゲットにした衝突閃光の分光学的な調査を行い, 未解明である H_2O 氷や CO_2 氷の衝突発光物理を明らかにし, 衝突閃光スペクトルから氷探査を行う新たな観測・探査提案に繋げることを目的にしている。

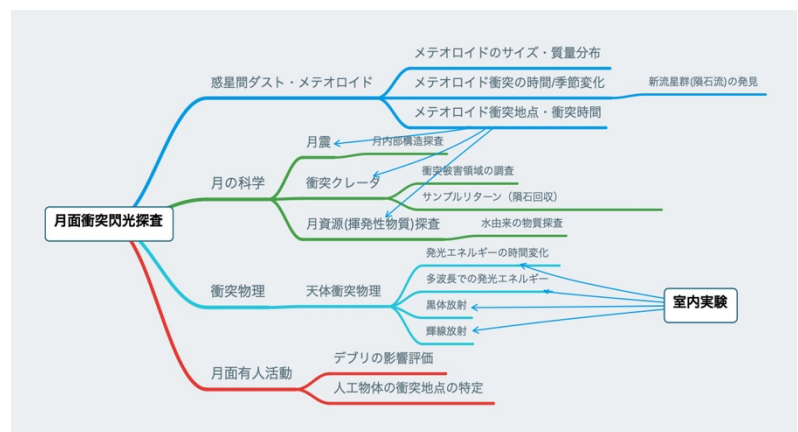


図2. 月面衝突閃光探査のコンセプト・マップ

2. 実験装置・実験方法

実験は、JAXA 宇宙科学研究所が所有する横型二段式軽ガス銃で行った。計測装置は、可視・超高速分光、紫外-可視高速分光、可視・白黒/カラー高速撮像、可視・ビデオ撮像(水平・45 度方向)の 7 台のメインカメラ群と 3 台のモニターカメラの合計 10 台のカメラを同時に運用してデータの取得を行なっている。

1. 超高速分光：HPV-X(400-800nm, Exp=200ns, 500 万 FPS)
2. 超高速撮像：Phantom V1612(カラー, ~10 万 FPS)
3. 超高速撮像/分光：Phantom V25412(白黒, ~10 万 FPS)
4. 高速分光：QEPro/MAYA2000(200-1000nm, Exp=10ms)
5. ビデオ撮像：WAT902H-Ultimate(Exp=1/60s, vertical/45 degree diagonal direction)

プロジェクトイルには、ポリカーボネート球 ($\phi 7.14\text{mm}$) を、ターゲットには、マイナス 20°C に冷やしたブロック状の H_2O 氷を使用した。氷の昇華に伴い真空度が数 100Pa 程度までしか引けないため、チャンバー内を通常の空気と、窒素に置換した条件で衝突閃光の比較を行うことにより、 H_2O や CO_2 氷由来の解離原子(H, OH, O など)が大気由来でないことを明確にすることも試行している。後に、氷をマイナス 80°C まで冷やし、同様に冷やしたアルミブロックと断熱材を組み合わせることで、完全に昇華を防げることを確認しているため、次年度以降の実験で実行していく計画である。

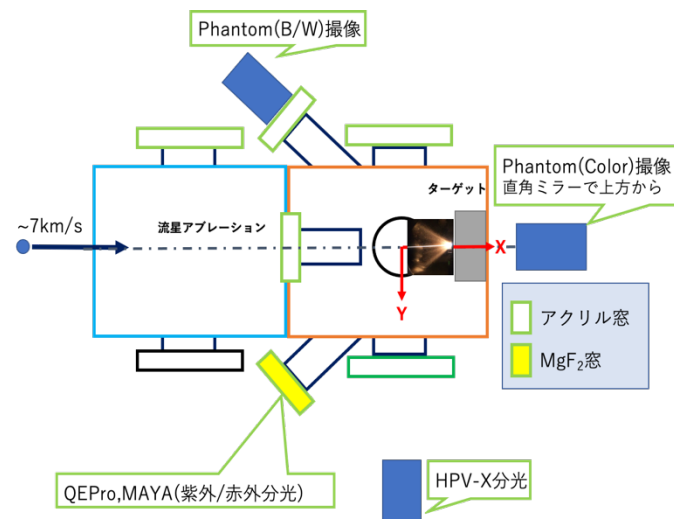


図 3. 計測装置配置図

3. 実験結果と今後の展望

図 4 に、 H_2O 氷の衝突閃光スペクトルの暫定結果を示す。波長 310nm 付近には、水酸基(OH A-X)のバンド構造が確認できた。熱平衡状態を仮定したモデル計算との比較から、約 5000K の励起温度(電子・振動・回転温度)と推定される。一方、可視分光からは、水素 $\text{H}\alpha$ 輝線が極初期($1\mu\text{s}$ 以下)に発光してから、黒体放射に移行することが分かった。これは、 H_2O が OH と H に解離した水素原子であることが示唆される。圧力幅から約 1.5GPa の圧力が算出されるが、これは、 $\phi 7.14\text{mm}$, $m=0.228\text{g}$ のプロジェクトイルが速度 6.922km/s で氷に衝突した際の衝撃で高圧の蒸気が発生して発光したものであることが説明できる。今後は、金属プロジェクトイルを用いて、圧力を数 Pa 程度まで減圧した条件でデータの取得を行い、 H_2O 氷由来の発光について、更に検証を重ねて学術論文として発表する計画である。

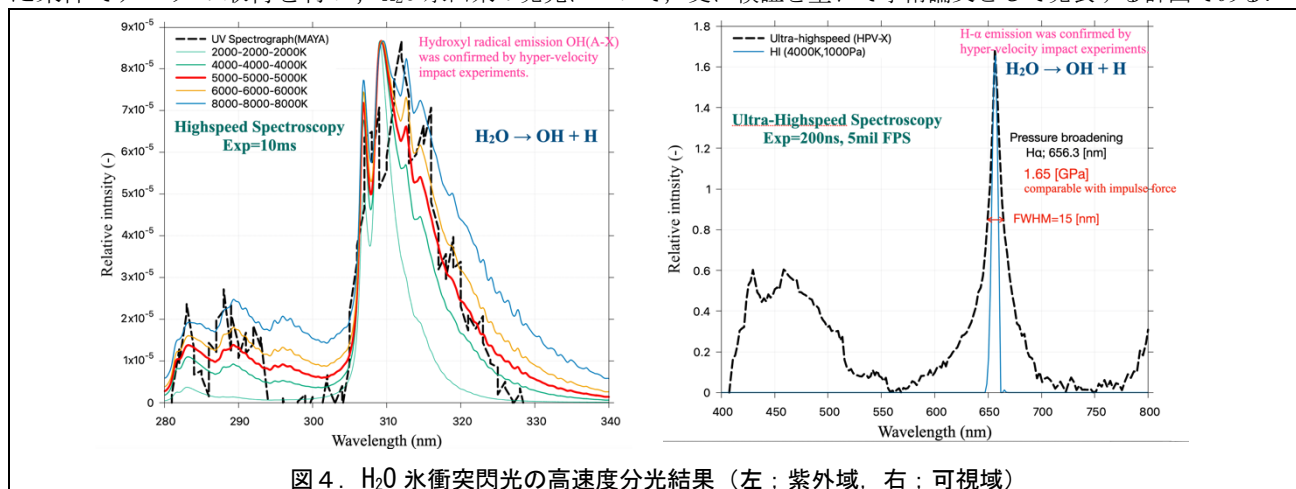


図 4. H_2O 氷衝突閃光の高速分光結果（左：紫外域、右：可視域）

最後に、本研究課題をサポートしていただいた、JAXA 宇宙科学研究所・関係各所の皆様および長谷川直氏に感謝する。