

衝突閃光現象のターゲット物性と発光メカニズムの関係

Impact Flash Study: Relationships between Target Physical Properties and Impact Flash Mechanism

布施綾太¹, 阿部新助¹, 柳澤正久², 福原哲哉³, 坂谷尚哉³, 長谷川直⁴

¹日本大学, ²電気通信大学, ³立教大学, ⁴宇宙科学研究所

1. 研究背景・研究目的

地球月圏内に流入する cm サイズのメテオロイドが月に衝突すると、月面衝突閃光 (Lunar Impact Flash: LIF) と呼ばれる発光現象が地上の望遠鏡から観測される (図 1)。LIF の観測では、メテオロイドの運動エネルギーから発光エネルギーへの変換効率 (発光効率 η) を用いることで、mm サイズ以下のダストと m サイズ以上の小惑星を繋ぐ、cm サイズのメテオロイドのサイズ-衝突頻度分布を明らかにすることができる^[1]。

このような LIF の明るさの情報からメテオロイドの質量・サイズを推定する上で不可欠となる発光効率は、超高速衝突実験と LIF 観測から得られた衝突速度の関数で表せる経験式が広く使われていた^[2]。筆者らはこの経験式に対する疑問や課題を解決すべく、「衝突体の蒸発=プラズマ発光を考慮」し「真空度を変化」させた衝突閃光実験を行い、月面衝突閃光の発光継続時間 (衝突後 32ms 間) では発光効率は真空度の影響を受けないことを明らかにした (図 2)^[3]。また、衝突閃光の主要な発光源はターゲットからの黒体放射であることも明らかにした。しかし、発光効率に関しては未だ不明な点が多く、衝突速度以外の依存性は十分に理解されていない。そこで本研究では主要発光源がターゲットの黒体放射であることに注目し、衝突閃光の発光メカニズムとターゲットの物性依存性について調査した。

2. 実験方法

実験は宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃で行った。調査するターゲット物性は発光

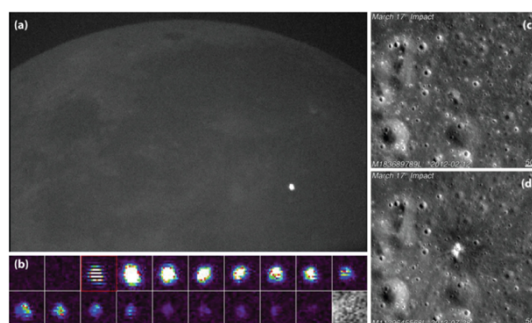


図 1 (a)LIF (b)LIF の 30fps 画像 (c)衝突前 (d)衝突後の月面画像^[1]

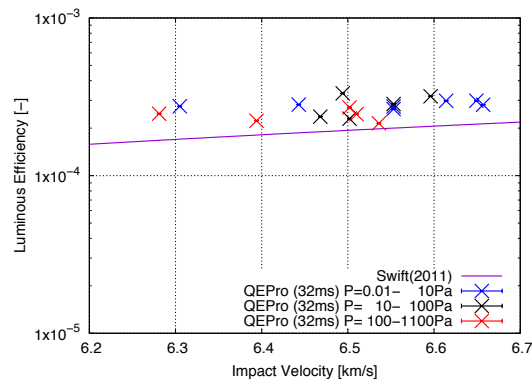


図 2 発光効率の経験式と実験結果^[3]

源が黒体放射であることから、熱伝導率に着目した。月面のレゴリスのような微細な粒子の真空下での熱伝導率は粒径に依存することが先行研究で分かっており^[4]、本研究ではその研究でも使われたガラスビーズをターゲットに採用した。ターゲットは次の4種類であり、ショット数は①②③がそれぞれ3ショット、④が4ショットである；「①FGB-20(粒径 710-1000 μm)」「②FGB-80(粒径 180-250 μm)」「③FGB-300(粒径 53-63 μm)」「④FGB-300+FGB-20(質量を1対1で混ぜたもの)」。なお衝突体はポリカーボネート球(ϕ 4.76mm)、衝突速度は \sim 6.5km/s、真空度は10Pa以下で固定した。

観測装置は衝突閃光の発光エネルギーと温度の長期進化を理解するために可視分光器QEPro(露光時間 10ms)を用いて、ターゲットを上から見る向き(垂直 90度)に設置して衝突閃光を観測した。取得したスペクトルはハロゲンランプで校正して発光エネルギーを導出し、温度はプランクの法則でフィッティングすることで推定した。

3. 実験結果

図3に4つのターゲットの衝突閃光スペクトルと400-1000nmの範囲でフィッティングして得られた温度変化を示す。閃光のスペクトルは綺麗な右肩上がりになっているため、主要な発光源は黒体放射であることが明らかであり、黒体放射の発光とその温度は時間の経過と共に減少している。また、どのターゲットでも衝突直後の0.01s(10ms)では590nm付近に輝線が見えており、これは衝突体に付着したNaのコンタミであると考えられる。特に、

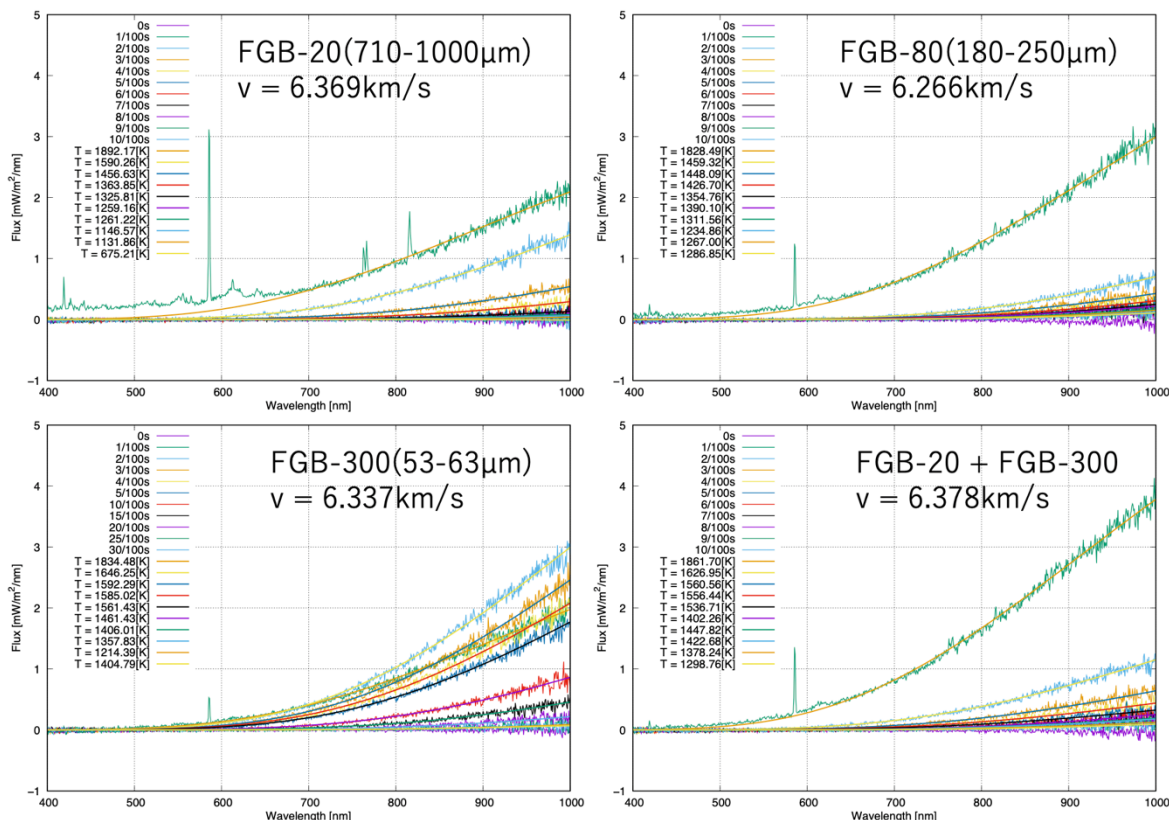


図3 粒径の異なるガラスビーズの閃光スペクトルと温度変化

FGB-20 に関しては、複数の輝線やバンド構造のようなものが観測され、粒径が大きいターゲットでは衝突直後のプラズマ発光が卓越することが示唆された。

続いて、図3のスペクトルを基に、累積発光エネルギー(図4)と温度の時間履歴(図5)を導出し、ターゲット間で比較を行なった。図4より、粒径が小さいほど累積発光エネルギーは大きくなる傾向が見られた。また、FGB-300で顕著に見られるように、粒径が小さいほど衝突後の発光エネルギーの増加が長く続いていることから、発光継続時間も長くなっている。図4を基に得られた発光効率を表1に示す。表1より、粒径が小さいほど発光効率は大きくなることが分かった。また、FGB-20とFGB-300を混ぜた

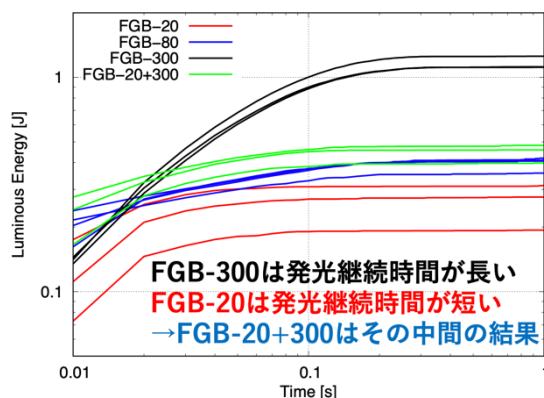


図4 衝突閃光の累積発光エネルギー

表1 ガラスビーズの発光効率

ターゲット	粒径 [μm]	発光効率 [-]
FGB-300	53-63	$8.1-9.2 \times 10^{-4}$
FGB20+300	Mix (1:1)	$2.9-3.5 \times 10^{-4}$
FGB-80	180-250	$2.7-3.0 \times 10^{-4}$
FGB-20	710-1000	$1.8-2.3 \times 10^{-4}$

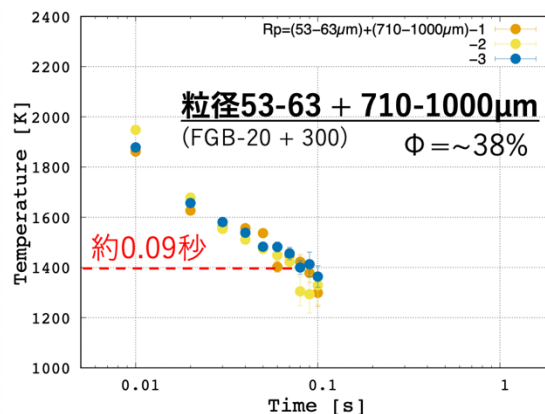
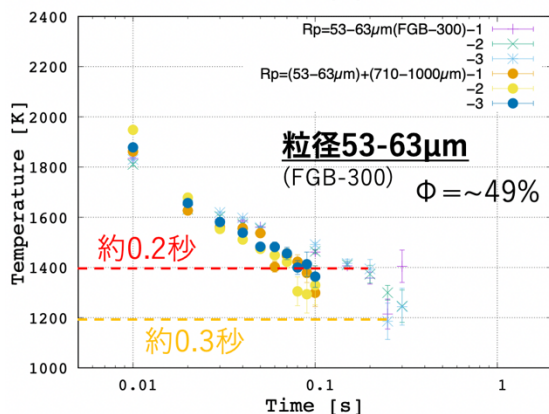
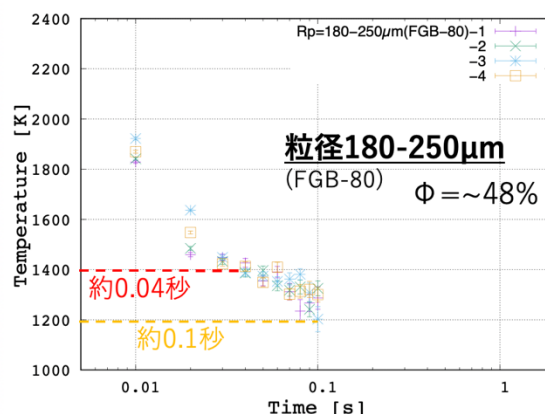
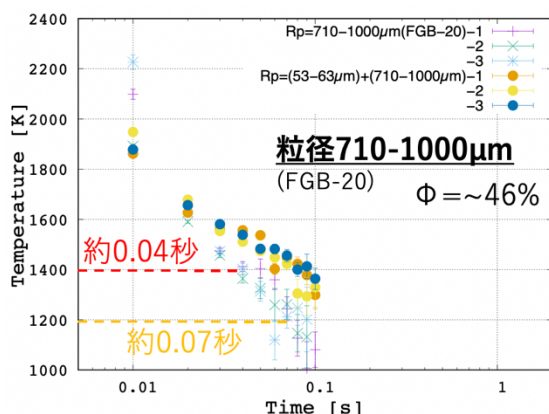


図5 粒径の異なるガラスビーズの温度履歴。φは空隙率。丸点はFGB-20とFGB-300を混ぜたターゲットの温度履歴で両者の間に位置する温度履歴となった。赤破線と黄破線はそれぞれ衝突後1400K、1200Kに到達する時間を表している。

ターゲットでは両者の間に位置する結果となった。この結果に対して、次のような考察ができた。先行研究から、レゴリス(ガラスビーズ)の熱伝導率はその粒径が小さいほど小さくなることが分かっている^[4]。これは粒径が小さいターゲットほど熱を保持しやすくなるため、温度が高い状態が維持されやすくなると解釈できる。したがって、粒径が小さいターゲットは高温状態が比較的長くなり、黒体放射量が増え、発光効率が大きくなると考えられる。この考察は図 5 の温度履歴にも整合する形で現れており、初期温度に差があるものの粒径が小さいほど温度の減少(傾き)が小さく、粒径が大きいものよりも 1400K や 1200K に到達する時間が長くなっている。

4. まとめ

本研究では衝突閃光とターゲット物性の関係に着目し、ターゲットの粒径が小さいほど発光効率は大きくなる結果が得られた。これは粒径が小さいほど熱伝導率が小さくなることから、発光効率が大きくなったと考えられる。また、大小の粒径を混ぜたターゲットでは、発光効率を始めとする実験結果が両者の間にくることも分かった。

今後は発光効率と熱伝導率の関係を理論的側面から明らかにすることを検討している。また、温度履歴をより詳細に理解するために、可視光カメラとバンドパスフィルタを用いたマルチバンド撮像を行い、温度の時間変化に空間情報(温度分布)を加えた研究も進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] R. M. Suggs et al., “The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring”, *Icarus* 238, 2014, 23-36.
- [2] W. R. Swift et al., “An exponential luminous efficiency model for hypervelocity impact into regolith”, *Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference*, 2011, 125-141.
- [3] R. Fuse et al., “An Experimental Study of the Lunar Impact Flash: The Relationship Between Luminous Efficiency and Vacuum Level”, *Planetary and Space Science* 187, 104921, 2020.
- [4] N. Sakatani et al., “Thermal conductivity model for powdered materials under vacuum based on experimental study”, *AIP Advances* 7, 15310, 2017.