

衝突閃光現象の真空度と発光効率の関係

布施綾太¹, 阿部新助¹, 柳澤正久², 福原哲哉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頻度分布を評価することが可能となる^[1]。

このような LIF を利用したサイエンスで不可欠な発光効率は超高速衝突実験と LIF 観測で得られた Swift らの発光効率モデル式が広く使われている(図 2)^[2]。しかし、この実験では shot 時の真空度に関する記述が「in vacuum」のみと、残存大気に対して十分な記述が無く、また別の先行研究では、実験時の真空度が発光強度(発光効率)に影響を及ぼしている可能性が指摘されている^[3]。さらに、実験で使用された衝突体(Pyrex 球:天然のメテオロイドに近い SiO₂ が豊富)と標的

(JSC-1a: NASA が開発した月模擬物質)では現実の LIF 現象に近い「蒸気雲+黒体放射」の発光を再現できないことが懸念される。現実の LIF は 12~71km/s の速度で月面に衝突することで、衝突したメテオロイドはほぼ完全に蒸発し、蒸気雲(プラズマ)の発光と高温に加熱された月面レゴリスの固体・液滴からの黒体放射の発光が観測されていると考えられている。しかし、衝突実験の最大 7km/s 程度の衝突速度では Pyrex のケイ酸塩は蒸発しないことが理論的に示されており^[4]、この発光効率のモデルには蒸発による蒸気雲から発光が考慮されていないと考えられる。したがって、本研究では「蒸気雲からの発光を再現した上で、真空度と発光効率の関係を調査すること」を研究目的として、衝突閃光の発光効率と発光メカニズムの解明に向けた超高速衝突実験を行う。

2. 実験装置・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。観測装置は、衝突初期を高速で観測するための「1. 高速分光: HPV-X(300 gr/mm 対物分光器付き)(露光時間 200ns)」と、衝突閃光の長期進化を観測するための「2. 低速分光: QEPro(可視光分光器)(露光時間 8ms)」を用いて異なる時間スケールで発光効率を導出した。なお、HPV-X は標的にに対して水平(0 度)方向から、QEPro は垂直(90 度)方向から閃光を観測した。実験は真空度と発光強度(発光効率)の関係を調査するために、shot 毎に真空度のみを変化させ、衝突速度は 6.5km/s で固定した。衝突体と標的は蒸気雲からの発光を発光効率に考慮するために、6.5km/s 以下の衝突でも容易に蒸発するポリカーボネート球(φ 4.76mm)と石英砂(平均粒径 344.8μm)を採用した。

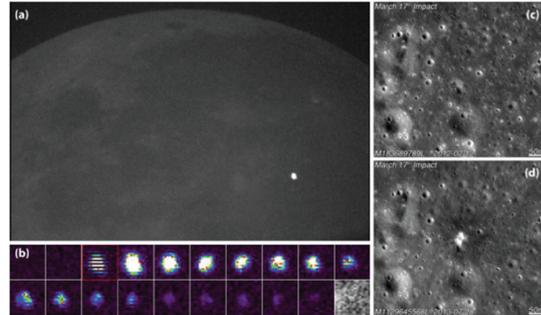


図 1 (a)LIF (b)LIF の 30fps 画像 (c)衝突前 (d)衝突後の月面画像 (LRO による撮影画像)^[1]

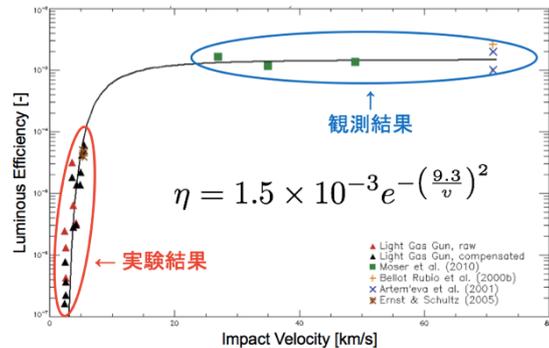


図 2 LIF 発光効率モデル^[2]

3. 観測結果

図3に異なる真空度での HPV-X の分光画像を示す. 図3の1次像を見ると真空度が悪い(圧力が高い)ほど発光強度は増す傾向が見られた. この増加は衝突後 $2\mu\text{s}$ 以降に連続スペクトルとして強く見られており, 衝突後数 μs という時間と連続スペクトルであるという点を考えると, これは残存大気と飛散する衝突破片(イジェクタ)間のアブレーションにより, 黒体放射の発光強度が増したと考えられる^[5]. ここで, 図3-Cの309Paのスペクトルを図4に示す. 図4のline1とは, 衝突直後200nsの画像において, 発光強度が最も強いスペクトルのライン(画像における特定の水平方向ピクセル群)のことを指し, line1よりも空間的に1ピクセル, 2ピクセル上のスペクトルをline2, line3と定義した(この時line間の空間分解能は $2.02\text{ mm/pix} = 2.02\text{ mm/line}$ である). 図4-A~Dを見ると, 衝突直後の発光強度が最も強く, 時間の経過と共に弱くなっていることが分かる. また, 初期のスペクトルには連続スペクトルに加え, バンド構造が見られる. これは衝突体のポリカ球からのバンド発光だと考えられ, 輻射加熱計算コード SPRADIAN によりフィッティングを行なった^[6]. 図4-E, Fより, ポリカ球に含まれる「C, H, O」から生じる「C₂, CN, CH」のバンド発光と5500Kの黒体放射の発光で観測スペクトルを良く再現できた. この結果から本実験では衝突体の蒸発が発光に考慮されていることが明らかである.

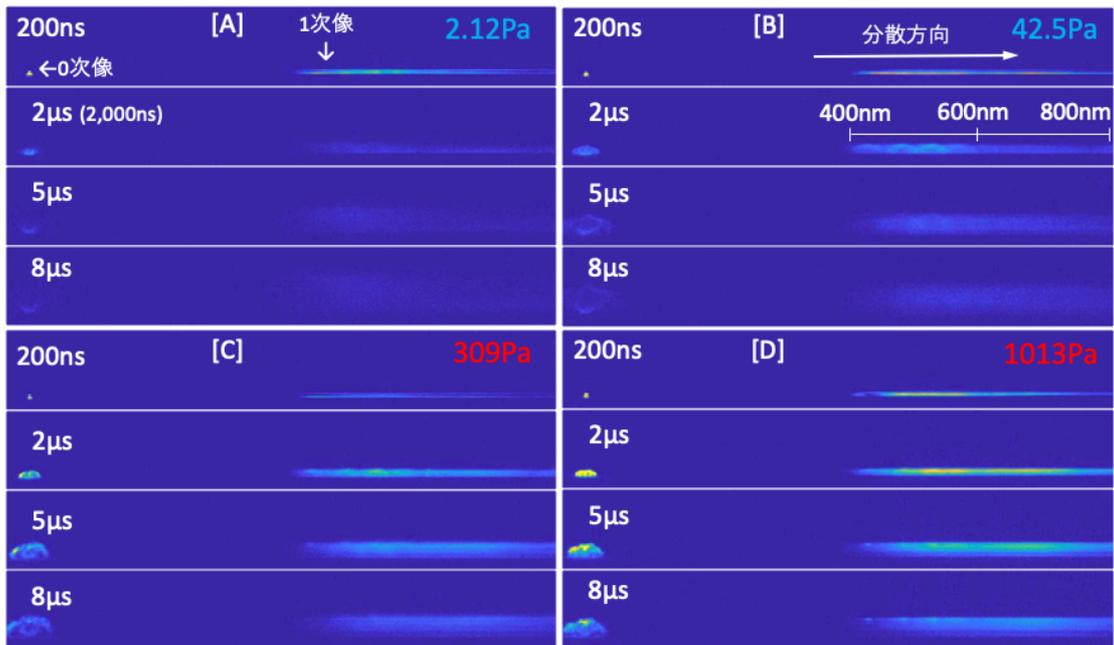


図3 衝突後200ns~8000ns(8 μs)までの HPV-X の分光画像. 空間分解能は 2.02 mm/pix で画像左側に0次像と右側に1次像が見えている(波長分散方向:右). [A]衝突速度: 6.305 km/s , 真空度: 2.12 Pa . [B]衝突速度: 6.468 km/s , 真空度: 42.5 Pa . [C]衝突速度: 6.394 km/s , 真空度: 309 Pa . [D] 衝突速度: 6.408 km/s , 真空度: 1013 Pa .

図5に真空度 2.12 Pa と 309 Pa の時の QEPro のスペクトルを示す. 図5では図4のようなバンド構造は見られず, 黒体放射の綺麗な連続スペクトルのみが観測された. これは衝突直後に卓越するバンド発光(プラズマ発光)に対して, その後数100ms間に渡って発光するイジェクタ・クレータ内部からの黒体放射の発光の方が, msオーダーでのスペクトルでは強力に支配的であると言える. また, 真空度の変化によるスペクトルの構造, 強度の変化は見られず, msオーダーでの発光強度は真空度の影響を受けないことが確認された.

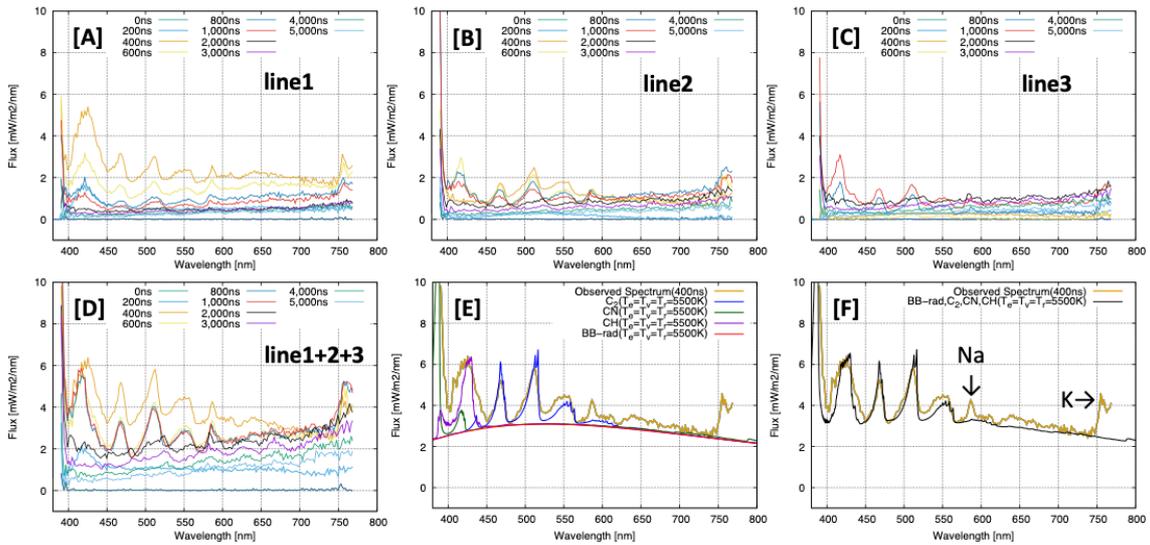


図4 [A-D]衝突後 200ns ~ 5000ns(5 μ s)までの HPV-X のスペクトル. [E]SPRADIAN によるフィッティング結果(バンド合成前). [F]SPRADIAN によるフィッティング結果(バンド合成後)

図 4, 5 のスペクトルを基に発光効率を求め、まとめたものを図 6 に示す. 本研究では波長範囲 400-770nm で、衝突後 5 μ s 間での発光効率(衝突初期)と、月面衝突閃光の典型的な発光継続時間である衝突後 32ms 間の発光効率を求めた. 図 6-A, B を見ると、5 μ s 間の発光効率は衝突速度による大きな変化は見られなかったが、真空度が悪く(圧力が高く)なるほど発光効率は大きくなった. 例えば、図 6-A の衝突速度 6.5km/s 上のプロットを見ると分かりやすく、また図 6-B では真空度と発光効率の比例関係がはっきりと確認できる. これは図 3 でも説明した残存大気と衝突破片とのアブレーションの影響で、圧力が高くなるほど衝突初期に発生する蒸気雲からの黒体放射が卓越し、発光効率が増したと考えられる. また、本実験では衝突体の蒸発を考慮し、その蒸発により発生する C 由来の分子バンド発光も観測された. このバンド発光は昨年度報告した通り、蒸気雲内のバンド発光(プラズマ)の膨張・拡散が残存大気の外圧に抑えられ、プラズマの密度が高い状態が維持されやすくなり、その発光がセンサで検出可能なレベルの長い発光継続時間をもたらしたことで、発光効率を増す要因となっている. 以上より、衝突初期 5 μ s 間では真空度が悪くなるほど、アブレーションによる黒体放射と分子バンドの発光が強くなるため、発光効率は大きくなったと考えられる.

図 6-C, D を見ると、32ms 間の発光効率は真空度による変化は見られず、衝突速度が大きくなるほど発光効率もわずかに大きくなる傾向が見られた. これは先行研究の Swift らの結果・モデル(図 2 式, 図 6-C の曲線)と調和的で、発光効率の数値自体も非常に近い値となった. 32ms での発光効率が真空度に依存しなかった理由としては、5 μ s の場合で影響をもたらした蒸気雲内の衝突破片のアブレーションと分子バンドが共に μ s オーダーで減衰し、その後長時間に渡って卓越するイジェクタ・クレータ内部からの黒体放射の発光の方が十分

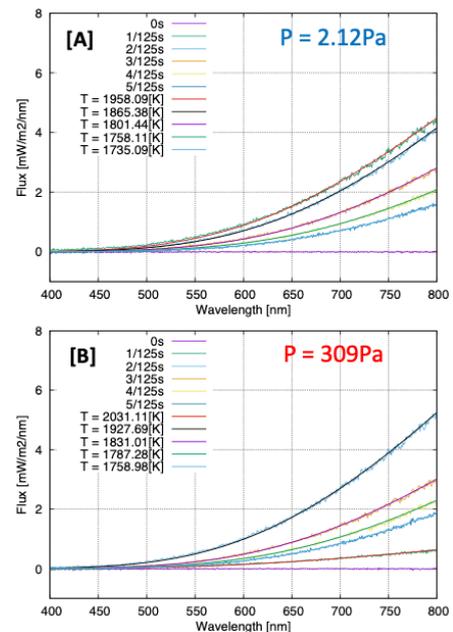


図 5 衝突後 5/125s(40ms)までの QEPro のスペクトル. 温度はプランクの法則のフィッティング結果

に強いためだと考えられる(図 4, 5 の縦軸の発光強度[W/m²/nm]で比較しても, 両者には露光時間 200ns と 1/125s(8ms)で 4 万倍の違いがあるため, 32ms 内での衝突初期 5 μ s 間の真空度による発光効率の変化は無視できるほど小さいと言える). また, この結果から数 100Pa 以下の真空度では対流による影響も無いことが明らかとなった.

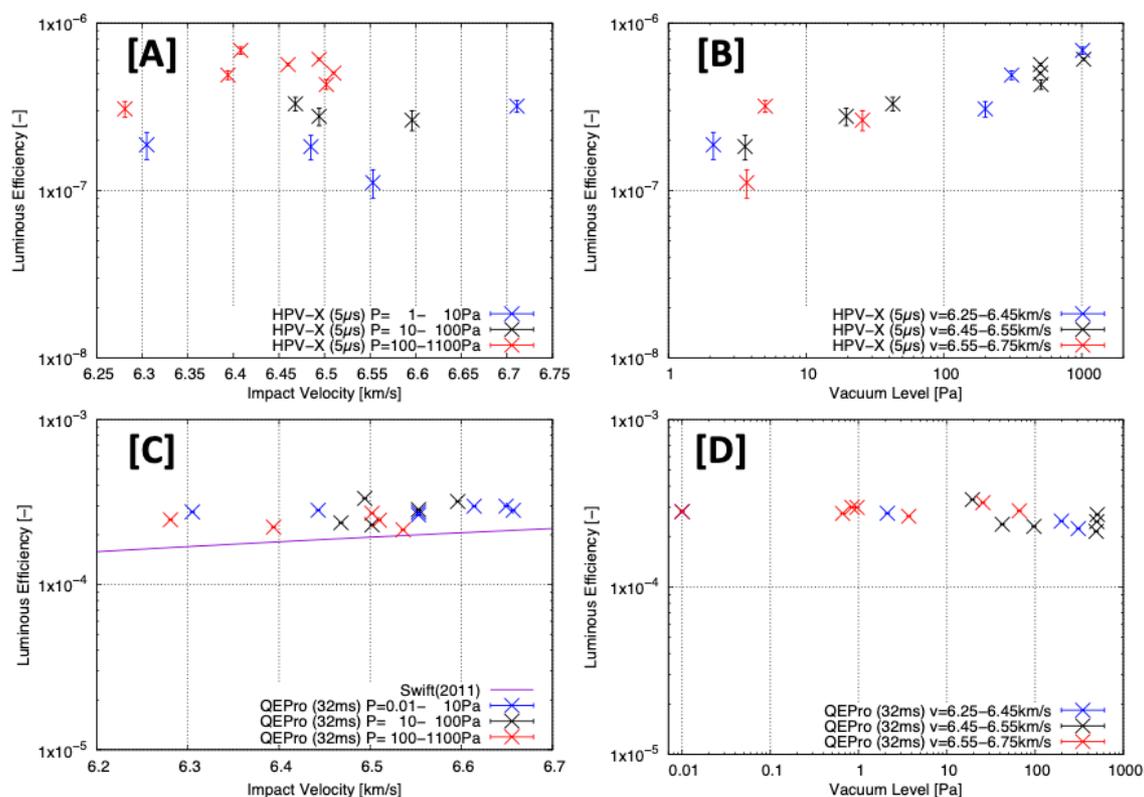


図 6 [A, B]衝突後 5 μ s 間の衝突速度, 真空度, 発光効率の関係. [C, D] 衝突後 32ms 間の衝突速度, 真空度, 発光効率の関係. [C]内の曲線は Swift らの発光効率モデル^[2]

4. 結論

本研究では発光効率に関して, 衝突後数 μ s 間では真空度が悪くなるほど発光効率は大きくなり, 月面衝突閃光の発光継続時間と同程度の衝突後 32ms 間では真空度の影響を受けないことが明らかとなった. この結果から月面衝突閃光の実験的研究では月面環境のような超高真空を達成する必要はないと言える. また, 先行研究である Swift らの実験では真空度に対して十分な配慮がされていないことが懸念されたが, 本研究により実験で導出されたモデル式の低速側の発光効率は妥当であり, 利用可能であることが確認できた.

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] 高橋悠太: 高速度衝突における蒸気雲の発光. 電気通信大学修士論文, 2013. [4] T. J. Ahrens and J. D. O'keefe: Shock melting and vaporization of lunar rocks and minerals. *The Moon*, 1972, 214-249. [5] S. Sugita and P. H. Schultz: Interactions between impact-induced vapor clouds and the ambient atmosphere: 1. Spectroscopic observations using diatomic molecular emission. *Journal of Geophysical Research* 108, 2003, 5051. [6] K. Fujita and T. Abe: SPRADIAN, Structured Package for Radiation analysis: Theory and Application. *The Institute of Space and Astronautical Science Report* 669, 1997, 1-47.