

# 月面衝突閃光現象解明に向けた超高速衝突実験の分光学的研究

布施綾太<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>1</sup>, 柳澤正久<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>

1. 日本大学, 2. 電気通信大学, 3. 宇宙科学研究所

## 1. 研究背景・研究目的

宇宙での衝突発光現象として、地球月圏内に流入するメテオロイドが月に衝突した際に観測される月面衝突閃光(Lunar Impact Flash: LIF)と呼ばれる現象がある(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 $\eta$ )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である<sup>[1]</sup>.

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観測で得られた発光効率モデル式が広く使われている(図2)<sup>[2]</sup>. しかし、ここで行われた実験やモデルには改善可能な項目がいくつかある. 例えば、0.01~0.1秒程度のごく短時間の発光を60fpsモノクロ撮像という、対象とする現象に対して十分な時間分解能での観測が行われていないという点である. これは同様の実験でも、より高い時間・空間分解能や分光スペクトルを得ることで、未だ謎が多い衝突発光メカニズムの解明と、その発光メカニズムに基づく理論的側面から発光効率を推定することが可能となる.

また、この衝突実験の報告では真空条件に関する記述が「in vacuum」のみと、残存大気(真空度)に対して十分な注意を払わずに実験が行われたことが伺えるが、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<sup>[3]</sup>.

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SiO<sub>2</sub>が豊富)と標的(JSC-1a:NASAが開発した月模擬物質)では現実の現象に近い「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の固体液体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<sup>[4]</sup>、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、今後より高い精度でのサイズ頻度分布等を評価するためには、以上のような項目を解決し、詳細な発光メカニズムと発光効率を調査する研究が求められる.

本研究では次の3つを研究目的として、衝突発光メカニズム解明に向けた超高速衝突実験を行う. 「1. 発光の時間的・空間的变化とスペクトルを取得すること」「2. 真空度と発光強度(発光効率)の関係を調査すること」「3. 蒸気雲+黒体放射の発光を発光効率に考慮すること」

## 2. 実験装置・実験方法

実験は宇宙科学研究所が所有する縦型二段式軽ガス銃で行った. 発光を観測する装置は、発光の時間的・空間的变化を高い分解能で調査するために「1. 超高速分光:HPV-X(300gr/mm対物分光器付き)」「2. 超高速撮像:Kirana)を使い、さらにLIF観測で使われているカメラと同程度のフレームレート(露光時間)の「3. 高速分光:QEPro)」「4. 高速撮像:WAT902H-Ultimate)」「5. カラー撮像:GoPro)の計5つである(表1). なお、GoPro以外の装置は横(水平)方向から発光を観測し、GoPro(90fps)は斜め45度から観測する.

実験は真空度と発光強度の関係を調査するために、shot直前の真空度のみを変化させることを主とする. なお、衝突速度は6km/sで設定するがマシンの仕様により、±1km/s程度のばらつきが生じる.

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、6km/s以下の衝突でも容易に蒸発するポリ

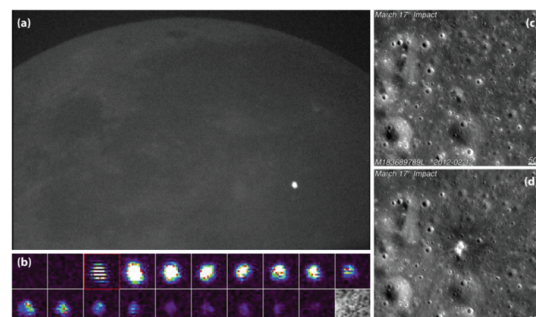


図1 (a)LIF (b)LIFの30fps画像 (c)衝突前 (d)衝突後の月面画像 (LROによる撮影画像)<sup>[1]</sup>

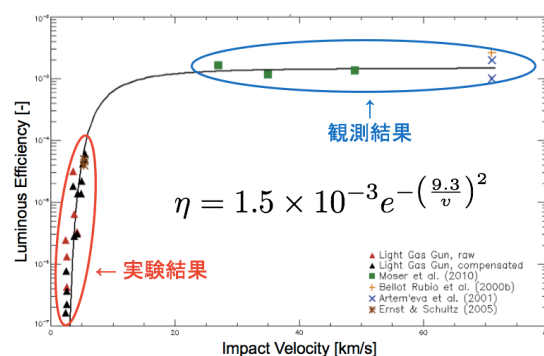


図2 LIF発光効率モデル<sup>[2]</sup>

カーボネート球(φ4.76mm)と石英砂を採用した。

### 3. 実験結果

実験は7月10, 11日での3shotと10月29, 30日での5shotで計8shot行った。それぞれの実験条件と装置の設定を表2に示す。ただし、HPV-X, QEPro, WAT902Hの「①, ②, ③」は表1の各設定を表し、その他の設定も表1に従う。WAT902Hの「ND8」はND8フィルター(光量1/8)を装着したことを表す。また、「×」はトリガーの設定ミスなどによる解析不能なデータ(データなし), 「△」は発光が飽和, 衝突前後のデータ取れていないなど解析には不向きなデータを表す。

表1 実験装置諸元

	HPV-X	Kirana	QEPro	WAT902H
レンズ	50mm/①F1.2, ②F2.8, ③F5.6	50mm/F1.2		17mm/F16
視野角	14.59° (H) x 9.15° (V)	30.99° x 25.95°	25.40° x 25.40°	21.49° x 16.21°
分光波長	400-800 nm		250-1000 nm	
FPS	1000000 fps (1 μs)	1000000 fps (1 μs)	①125 fps (8 ms), ②60 fps (16.67 ms)	30 fps (33.33 ms)
露光時間	0.7 μs (700 ns)			
保存枚数	128枚 (128 μs)	180枚 (180 μs)		

表2 実験条件と実験装置

	衝突速度	運動エネルギー	真空度	HPV-X	Kirana	QEPro	WAT902H
shot7-1	4.333 km/s	638.35 J	0.07 Pa	①, ×	×	①	①
shot7-2	6.399 km/s	1392.20 J	0.07 Pa	①, △	△	①	①
shot7-3	6.234 km/s	1321.33 J	1.5 Pa	①, △	○	①	①, ND8
shot10-1	6.859 km/s	1597.21 J	55.7 Pa	②, △	×	×	②
shot10-2	6.173 km/s	1293.70 J	57.3 Pa	②, △	×	①	②, ND8
shot10-3	6.460 km/s	1416.79 J	0.01 Pa	②, △	○	②	②, ND8
shot10-4	6.570 km/s	1465.45 J	0.1 Pa	③, ○	△	②	②
shot10-5	6.720 km/s	1533.13 J	530 Pa	③, ○	○	②	②, ND8

以下に各観測装置で得られた代表的な画像・スペクトルを示す。図3はHPV-Xの撮像画像をカラーで強調した画像で、shot10-2, 3(F2.8)は[0-255]→[0-40]に、shot10-4, 5(F5.6)は[0-255]→[0-10]にコントラストを調整している。図4は図3の1次像で最も発光強度が強い分散方向のスペクトル(画像左上を原点としてshot10-2からy = 138, 138, 139, 139行を表す。図5は図4のスペクトルの1行上(空間的には4mm上)のスペクトル(shot10-2からy = 137, 137, 138, 138行)を表す。図6はKiranaの撮像画像を表す。



図3 HPV-X画像 (1μs, 5μs, 20μs)

### 4. 考察

#### 4.1 超高速分光・撮像による蒸気雲と黒体放射の発光

HPV-XとKiranaによるμsオーダーでの分光・撮像観測により、従来のmsオーダーでは識別できなかった蒸気雲からの発光と固体液体(イジェクタ)からの黒体放射の発光がはっきりと観測されている。具体的には、図4, 5の1μsや2μsで見られる420-600nm付近の連続スペクトルはポリカ球から蒸発したC<sub>2</sub>の分子バンドであり<sup>[5]</sup>、衝突直後に蒸発した蒸気雲からの発光だと考えられる(図4の左上の観測スペクトル<sup>[5]</sup>と調和的である)。一方、全体的に緩やかな右上りのスペクトルは蒸発しきれず高温に加熱されたイジェクタからの黒体放射の発光と解釈することができる。また、図6のshot10-5の画像では他のshotでは見られなかった球状の蒸気雲が上昇する様子が観測され、HPV-Xのスペクトル解析から、この蒸気雲は3691~2781K(衝突後15~47μs)の黒体放射で発光していることが分かった。

このような蒸気雲と黒体放射の発光は  $\mu\text{s}$  オーダーの超高速で分光することで識別することができ、先行研究<sup>[2]</sup>のような 60fps のモノクロ撮像・分光では決して区別することができないことであった。

#### 4.2 真空度と発光強度の関係

前節での考察により、発光の主要素は蒸気雲と黒体放射に分けられることから、ここからは蒸気雲成分と黒体放射成分に分けて発光強度の考察を進める。

蒸気雲成分の真空度と発光強度の関係は図 3, 4, 5 より、圧力が高いほど発光強度が強くなる傾向が見られた。特に、図 3 の shot10-3, 5(高压)では shot10-3, 4(低压)に比べ  $5\mu\text{s}$  での発光強度が非常に強く、 $20\mu\text{s}$  の画像でもイジェクタを覆うように蒸気雲のような発光成分が観測された。これは蒸発した蒸気雲の膨張・拡散が、圧力が高いほど外圧により抑えられ、蒸気雲(プラズマ)の密度が高い状態が維持されやすくなることから、その発光がカメラのセンサで検出可能なレベルでの長い発光継続時間をもたらし、発光強度が増したのではないかと考えられる。例えば、図 4 の shot10-2, 5 は 1 行上のスペクトル(図 5)でも蒸気雲成分の分子バンドが観測されているが、shot10-3, 4 では 1 行上のスペクトルには蒸気雲成分はほとんど観測されていない(つまり拡散が早く発光強度が弱い)。さらに、shot10-5 の 530Pa では、その他の 57.3Pa 以下では見られなかった、球状の蒸気雲が観測された(図 6)。したがって、蒸気雲の発光は圧力が高い(真空度が低い)ほど、発光強度は強くなる結果となった。

黒体放射成分の真空度と発光強度の関係は図 3, 4, 5 からはその関係性を見極めることは難しい。そこで理論的な側面から真空度と発光強度の関係を考えてみる。黒体放射の発光は高温の物体(ここではイジェクタ)から発せられる連続スペクトルであることから、温度によってそのスペクトル(波長毎の発光強度)が決まる。時間の経過と共に発光強度が減少してゆく現象は黒体放射を発するイジェクタが冷却してゆくためである。ここで、イジェクタの温度と真空度の関係を考えてみると、真空度の違いでは対流による放熱効率の違いが考えられる。つまり、圧力が高いほど対流による黒体放射面からの放熱が起きやすく、冷却速度が早くなることで総発光エネルギーが小さくなるのではないかとこの考えである。そこで、GoPro による発光継続時間を調査したところ、圧力が高い方から shot10-5(530Pa)→1.496 秒 shot10-2(57.3Pa)→1.371 秒, shot10-4(0.1Pa)→1.929 秒, shot10-3(0.01Pa)→1.562 秒(誤差 $\pm 0.004$  秒)と圧力が高いと発光継続時間が短い傾向が見られた。しかし、完全にその傾向が見られている訳でもなく、さらに GoPro は Auto Gain かつその内部処理が不明のため、一概に対流の影響を受けていると結論づけるのは難しい。しかし、その影響は非常に小さいのではないかと考えられる。

4.3 蒸気雲と黒体放射の発光エネルギーおよび発光効率

HPV-X の全 shot で確実に保存できた衝突後  $56\mu\text{s}$  までの総発光エネルギー(LE)とその発光効率  $\eta$ 、同様に QEPro の衝突後 32ms までの総発光エネルギー(LE)とその発光効率  $\eta$  を表 3、図 7 に示す(波長範囲: 410~800nm)。ここでの LE の誤差は発光開始 1 枚目の画像において、その発光が 1 枚目の露光開始と同時に発光したと仮定した場合(LE→最小)と、そのフレームの露光が 99/100 完了した時(HPV-X の場合: 露光終了残り 7ns)に発光したと仮定した場合(LE→最大)としている。

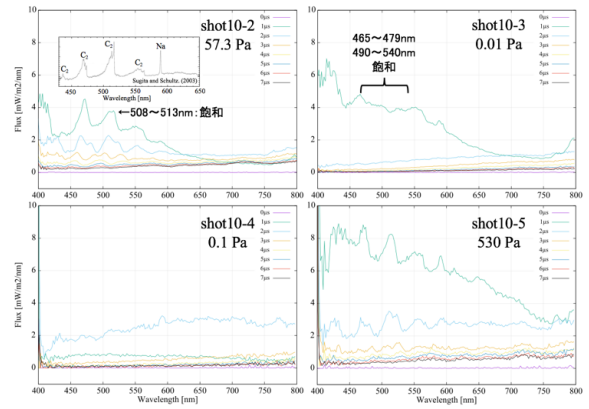


図 4 最も発光強度が強いスペクトル

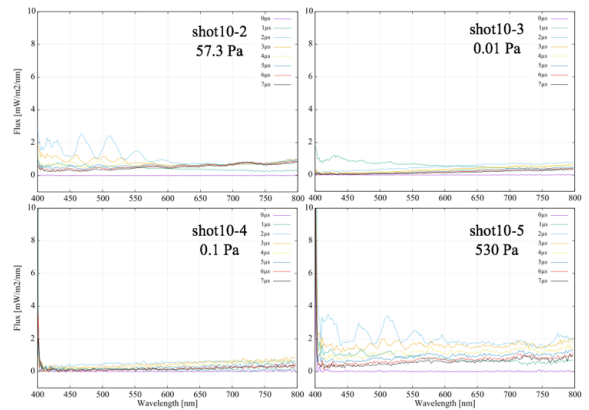


図 5 図 4 スペクトルの 1 行上のスペクトル

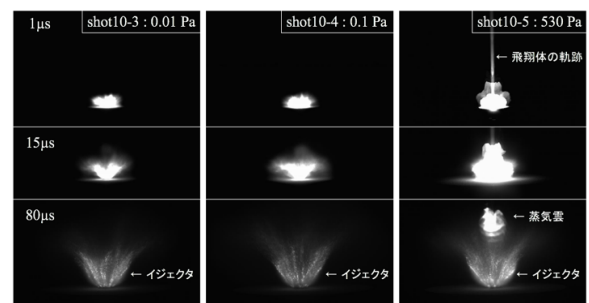


図 6 Kirana 画像 (1 $\mu\text{s}$ , 15 $\mu\text{s}$ , 80 $\mu\text{s}$ )

表 3 発光エネルギー(LE)と発光効率( $\eta$ )

	HPV-X LE (56 $\mu$ s)	HPV-X $\eta$ (56 $\mu$ s)	QEPro LE (32ms)	QEPro $\eta$ (32ms)
shot7-1			$8.92 \pm 8.72 \times 10^{-4}$ J	$1.40 \pm 1.37 \times 10^{-6}$
shot7-2			$3.60 \pm 3.51 \times 10^{-3}$ J	$2.58 \pm 2.52 \times 10^{-6}$
shot7-3			$3.67 \pm 3.58 \times 10^{-3}$ J	$2.78 \pm 2.71 \times 10^{-6}$
shot10-2	$8.80 \pm 1.75 \times 10^{-7}$ J	$6.81 \pm 1.35 \times 10^{-10}$	$9.52 \pm 9.26 \times 10^{-4}$ J	$7.36 \pm 7.16 \times 10^{-7}$
shot10-3	$3.11 \pm 2.72 \times 10^{-7}$ J	$2.33 \pm 1.92 \times 10^{-10}$	$2.09 \pm 2.01 \times 10^{-3}$ J	$1.47 \pm 1.42 \times 10^{-6}$
shot10-4	$2.88 \pm 2.44 \times 10^{-7}$ J	$1.96 \pm 1.53 \times 10^{-10}$	$2.52 \pm 2.43 \times 10^{-3}$ J	$1.72 \pm 1.66 \times 10^{-6}$
shot10-5	$1.12 \pm 0.31 \times 10^{-6}$ J	$7.31 \pm 1.99 \times 10^{-10}$	$5.62 \pm 5.50 \times 10^{-3}$ J	$3.67 \pm 3.59 \times 10^{-6}$

まず、HPV-X の発光効率に注目すると、圧力が高い shot10-2, 5 は圧力が低い shot10-3, 4 に比べて大きくなった。これは圧力が高いほど衝突後数  $\mu$ s の時間では、Fig. 3, 4, 5 から分かるように蒸気雲からの発光が強く現れるため、56 $\mu$ s までの発光効率では前節で議論した通り、真空度の変化が発光効率に影響する結果となった。

一方、QEPro の発光効率は真空度に依存している様子は見られない。この原因は蒸気雲の発光が一瞬( $\mu$ s オーダー)であるのに対して、黒体放射からの発光はその1000 倍以上の発光継続時間(ms オーダー以上)を持つため(つまり積分される発光エネルギーが時間と共に増大する)、相対的に蒸気雲の発光は微弱なものとなり、総発光エネルギーの大部分が圧力の影響が小さい(厳密には不明)黒体放射の発光で占められるためだと考えられる。実際に、表 3 の HPV-X と QEPro の LE で比較すると、HPV-X の 56 $\mu$ s 間で観測された全 LE が蒸気雲からの発光だと極端に仮定しても、QEPro で得られた全 LE の 0.1%にも満たないことが分かる(99.9%が黒体放射の発光)。

以上より、 $\mu$ s オーダーでの発光効率は蒸気雲成分が卓越することから真空度による変化が見られたが、ms オーダー以上で発光効率を議論すると、蒸気雲の発光は黒体放射の発光に比べ無視できるほど小さく、真空度には依存しない(ように見えるほど変化量は微小である)ことが明らかとなった。

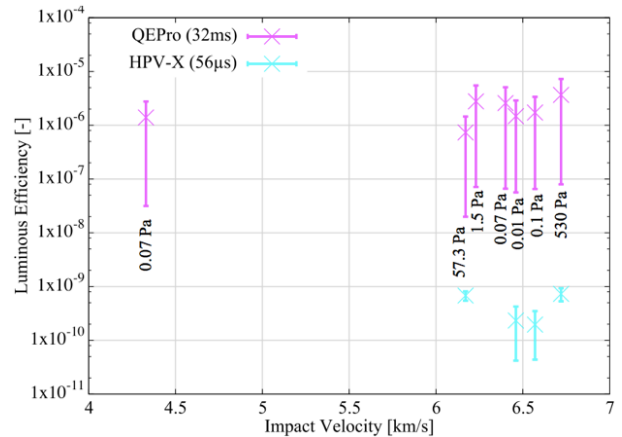


図 7 HPV-X・QEPro の発光効率

## 5. まとめ

- ① 超高速カメラに対物分光器を装備することで、衝突発光の時間的・空間的スペクトルデータが得られ、蒸気雲の発光とイジェクタの黒体放射の発光を区別して議論できる新観測手法を確立することができた。
- ② 蒸気雲の発光は圧力が高い(真空度が低い)ほど蒸気雲の膨張・拡散が圧力により抑えられ、発光強度は強くなる。一方、黒体放射の発光への影響は比較的小さいと考えられる。
- ③ 衝突後  $\mu$ s オーダーでの発光効率は蒸気雲からの発光が支配的なため、真空度によって変化する。ms オーダーでの発光効率は蒸気雲からの発光の影響は小さく(総発光エネルギーの 0.1%以下)、黒体放射の発光が支配的なため、真空度には依存しないことが明らかとなった。

## 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.