

月面衝突閃光 LUNAR IMPACT FLUSH

阿部新助¹⁾・柳澤正久²⁾
鈴木雅晴³⁾・サイエンスカフェ神戸⁴⁾

¹⁾ 台湾・国立中央大学 ²⁾ 電気通信大学
³⁾ 五藤光学研究所 ⁴⁾ 神戸大学

Abstract

The Lunar Impact Flush is thought to be a phenomenon after a hyper-velocity impact of a large dust particle on the Moon. It is evident that hyper-velocity objects impacting on Lunar surface emit visible flash that is observable from the Earth. Japanese and ESA's spacecraft HITEN and SMART-1 crashed onto the Moon in 1993 and 2006 respectively showed flush (or dust cloud reflection) signatures in the visible and near-infrared wavelength regions[1,2]. During 1999 Leonids maximum, the first lunar impact flushes caused by meteoroids were confirmed using CCD video cameras[3-5]. After the discovery of impact flashes due to a non-Leonid meteoroid, Perseids[6] and several other meteor showers such as Lyrids, Orionids, Taurids and Geminids[7], lunar impact flushes induced by meteoroids are recognized as common phenomena. However, details of impact flashes, the luminous efficiency and the emitted materials are still uncertain. On the night of 15 December 2007 during Geminid meteor shower (impacting velocity is approximately 35 km/s), the first color video images carried out using a newly developed high-sensitive CCD camera in the wavelength range of 400-1000 nm were successfully observed at the Nishiharima astronomical observatory. Observed three events detected by the color camera were also obtained by three other independent black-and-white CCD video cameras in Japan.

Key Words: Example, Lunar impact flush, meteoroids, asteroids

メテオロイドが地球大気に衝突して発光する現象を「流星」と呼ぶ。通常、写真やTVカメラで地上から観測される流星発光は、大きさが0.1mm～数10cmのメテオロイドによるものである。また、ミサイルや核爆発を赤外線で監視しているスパイ衛星(DoDなど)は、大きさが1～10mのメテオロイドの大気突入を検知しているが、軍事機密のため、一部のデータを除き公開されていない。更に大きな、数10m以上の彗星や小惑星などの小天体は、地上の望遠鏡で観測される。しかし、地球に飛来するあらゆる大きさのメテオロイドや小天体を全て捉えることは、現段階では困難である。しかし、大気のない月面にメテオロイドが衝突する様子を地上から観測することができれば、月面全体が受信器になり、地上から観測できる流星発光空域の数百から数千倍の面積を一度にモニターでき、メテオロイドの空間分布を調べることができる。

1993年に宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究本部)の宇宙工学実験探査機(月探査機)「ひてん」を月面に衝突させた際の発光や、2006年に欧州宇宙機関(ESA)

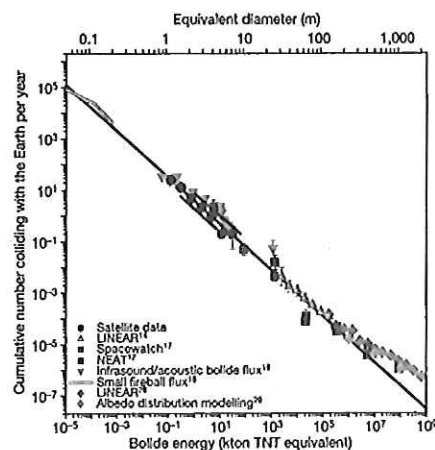


図1. 地球近傍の小天体サイズ部分布
直径が数十cmからmサイズの天体は、地上からの火球観測と軍事衛星からの観測の谷間にあたり、その分布についてはよく分かっていない。Brown et al. (2002)

の「スマート1(SMART-1)」を月面衝突(衝突速度～2km/s)させた時の発光が、地上の望遠鏡で観測されている。前者は、可視光での発光であり、陰と日なたの境界付近で数分間観測されていることから、衝突によ

って巻き上がったダストに太陽光が反射して光ったものと考えられる(図2)。また、後者は、赤外線望遠鏡でのみ発光がとらえられている。

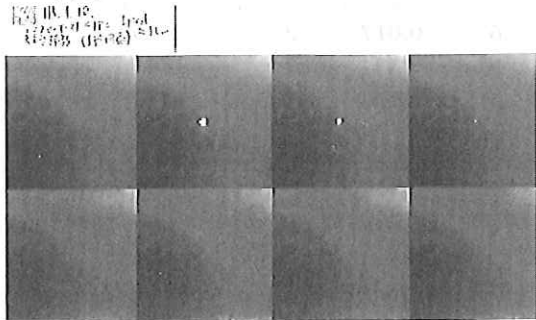


図2. 衛星「ひてん」の月面衝突の際の発光

Prof. 上杉邦憲提供

月面に物体が高速衝突すると何らかの発光が発生することは確かなようである。一方、典型的なメテオロイドの衝突速度は、人工飛行体より遥かに速く、10数km/sから70km/sにも達する。超高速衝突での発光効率やメカニズムは解明されておらず、月面衝突閃光(Lunar Impact Flash)は、室内実験では困難な超高速領域を観察できる天然の実験室とも言える。

1999年11月、「しし座流星群」の出現に合わせて、日本、スペイン、米国の研究者らによって、月の夜側で初めて閃光(せんこう)が観測された。2001年には「しし座流星群」で、2004と2005年には「ペルセウス座流星群」の出現時期に月面衝突閃光が検出されている。これらは、流星群の極大夜前後に多く観測されていることから、流星群に属するメテオロイドによる月面衝突であることが強く示唆される。2005年秋には、NASAマーシャル・フライト・センターにメテオロイド環境部門が設立され、月の夜側が効率よく観測できる新月前後の約10日間、口径30cm程度の望遠鏡と高感度ビデオカメラを使った継続モニターが開始された。この継続モニターにより、2008年5月までに100個を超える月面衝突閃光が検出されている(図3)。典型的な月面衝突閃光の明るさは、7~9等級で、発光の継続時間は0.1秒以下。またその半数は、流星群には属さないメテオロイドであることも分かってきた。あるいは、数10cmからmサイズの未知の隕石流が存在する可能性もある。

月面発光現象の観測において、複数地点からの同時観測はとても重要である。1つのカメラで発光が記録さ

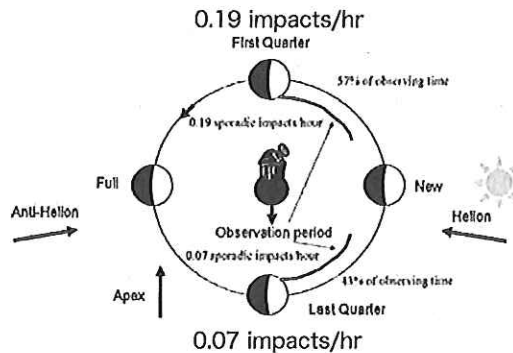
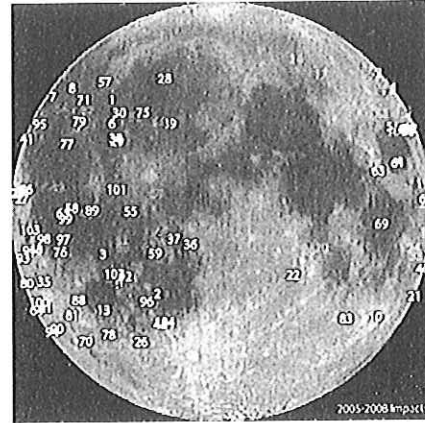


図3. NASAがとらえた月面衝突閃光の分布

これまでに観測された月面衝突閃光の位置。上弦側は、太陽を回る公転方向速度が加わるために、衝突数が増え、逆に、下弦側では衝突数が減る効果が明瞭である。それでも、それらが電気ノイズやCCDに当たった高エネルギー宇宙線の影響、あるいはスパイ衛星や、流星である可能性なども完全に否定することができない。多地点で月面上の同じ位置に発光が記録されれば、こうした可能性を完全に否定できる。

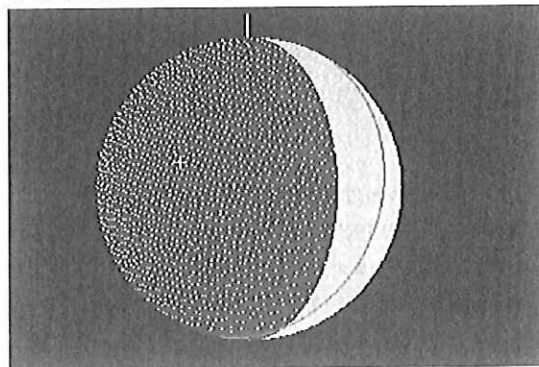


図4. 2007年12月14日の「ふたご座流星群」衝突範囲+印は、ダストトレイルの直下点(輻射点高度=90度)。

これまで、「ふたご座流星群」(衝突速度35km/s、母天体:小惑星フェートン)に伴う月面衝突閃光の多地点

Table 1. Geminids Lunar Impact Flashes on 15 December 2007.

Flash	Time (UT)	latitude	longitude	mag.	duration	mass	Impact Angle
A	8:28:18	+1	-83	9	0.033 s	0.1 kg	51
B	8:54:25	-16	-62	6	0.017	2	57
C	8:55:26	-17	-84	5	0.32	3	42
D	10:08:10	-20	-75	5	0.32	5	47

Yanagisawa et al. AOGS (2008)

観測例はなかった。「しし座流星群」(衝突速度71km/s、母天体:点ペル・タツトル彗星)、「ペルセウス座流星群」(衝突速度59km/s、母天体:スイフトタツトル彗星)に比較して衝突速度がかなり低い小惑星起源の「ふたご座流星群」の衝突閃光を調べるため、「しし座流星群」「ペルセウス座流星群」の月面衝突閃光に成功している電気通信大学の柳澤正久教授が中心となって、鹿児島県薩摩川内市のせんだい宇宙館などを通じて呼びかけられた。これに応じた東京都練馬区在住のアマチュア天文家、唐崎秀芳氏と、滋賀県守山市在住のアマチュア天文家、石田正行氏、電気通信大学の学生・池上裕美氏、石樽勇介氏らの観測によって、月面衝突閃光によるとみられる少なくとも2ダースほどの発光の候補が捉えられた。このうち3個は東京都、滋賀県と兵庫県(後述)の3地点からの同時観測が成立しており、月面での現象であることは間違いないと考えられる。複数地点から「ふたご座流星群」の月面衝突閃光を確認した世界で初めての観測となった。



図5. ふたご座流星群の月面衝突閃光

2007年12月15日19時08分10秒(JST), 石田正行氏(滋賀県守山市)撮影。タカハシ ϵ 160(口径160mm, 焦点距離530mm)、1/2インチ・モノクロCCD-WAT100Nを使用。

一方、神戸大学では、「市民の科学」を支援する「神戸大学サイエンスショップ」のプロジェクトの一環として、昨夏に中高生を対象に「月と流星」をテーマにした「サイエンスカフェ神戸スペシャル」を開催しました。神戸大学の大学院生や学部生が中心になってチ

ームを組み、観測マニュアルづくりや講習会の開催などを行って、中高生をサポートし、兵庫県内の4つの高校・中学と神戸大学が、「ふたご座流星群」による月面衝突閃光の共同観測を成功させた。参加したのは、有馬高校、六甲高校・中学、武庫川女子大学付属高校・中学、加古川東高校の高校生や中学生、計34人。中高生チームはそれぞれの学校で、神戸大チームは12月13～15日に兵庫県立西はりま天文台公園の敷地内で、観測を行った。観測は、口径8～20cmの望遠鏡に天体観測用CCDカメラを接続し、月の暗い面をビデオ撮影することにより行った。更に、(株)五藤光学研究所の協力により、超高感度の新型カラービデオカメラ(NC-R550a)を用いた観測を行い、上記の3つ(B,C,D)の閃光の同時撮影に成功した。カラー観測の成功はおそらく世界初である。現在、液滴放射モデルとプラズマ発光モデルを用いて、RGBカラーの発光ライトカーブを解析中である。また、今後、衝突地点の精密な特定とクレータの直径の推定が行われれば、月探査機「かぐや」を使ったクレータ探しも可能になる。

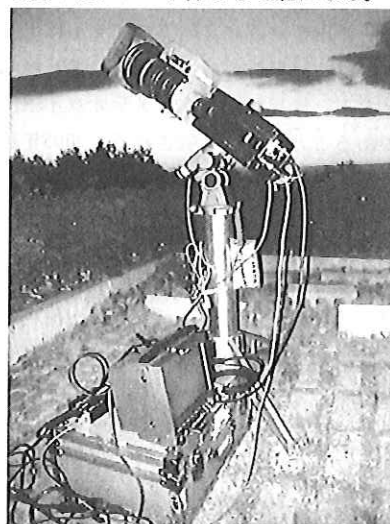


図6. NC-R550a(五藤光学研究所)システム

「ふたご座流星群」の母天体は、小惑星3200 Phaethonであり、流星体の密度は、2-3 kg/m³と見積もられている、これは、通常の流星体の密度の2-3倍に匹敵する。衝突速度が35km/sと、低速に分類され「ふたご座流星群」だが、密度が大きいため十分な閃光を発生させたことが考えられる。

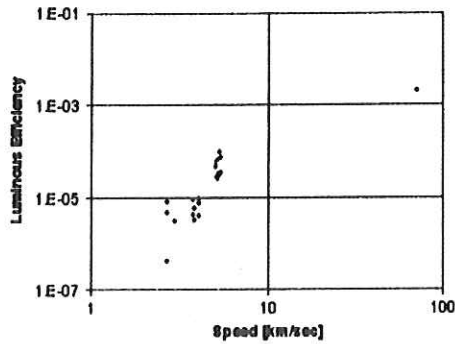


図7. 衝突速度と発光効率の関係。

10km/sより低速側は、室内実験で得られた値。72km/sは、しし座流星群から見積もられた値。[7]

さらに3200 Phaethonと軌道が類似する小惑星2005UDが見つかっており、分裂天体と考えられている(木下大輔氏の収録を参照)。分裂、あるいは衝突破砕でこのような天体が類似軌道に分布するならば、月面衝突閃光を発生させるような、cm-mサイズの微小隕石流れが存在している可能性がある。今後は、複合流星群や小惑星に付随する隕石流を月面衝突閃光から調査することも可能になるかもしれない。

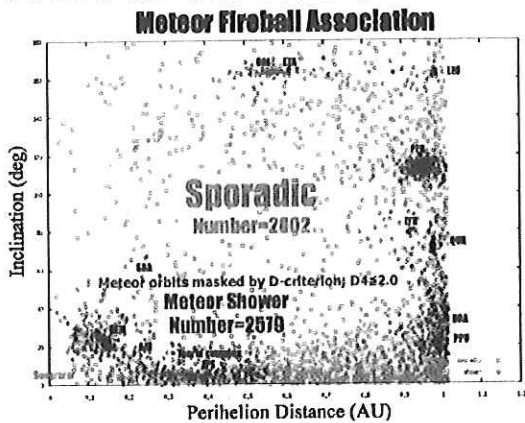


図8. IAU火球軌道と流星群の分布。

地球で観測される火球の多くは、火球の観測軌道誤差や、近地球型小惑星の未検出などの理由により、母天体が不明なものが殆どである。IAUが公開している火球データベースをもとに、既知の流星群と流星群に属さない(散在流星)に分類したのが、図8である。これらの軌道の地球とのMOID(Minimum Orbital Intersection Distance)を計算してみると、明らかにPHO(Potential Earth Impactor)であることが分かる(図9)。我々は、Pan-STARRSサーベイにより、直径が300m以上のPHO, NEOを見つけて行く予定である。

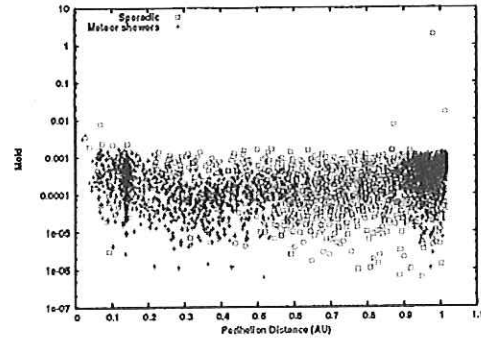


図9. MOID<0.01がPHOである。

月や水星のナトリウム大気の起源については、太陽光脱離説、太陽風イオンスパッタリングの他に、微小隕石衝突の寄与が無視できない。以下は、我々のモデルで見積もった、微小隕石によるナトリウム大気の寄与である。地球より内側の軌道では、90%以上が微小隕石の衝突によって放出されるガスが大気を担っていることが有力であると言える。しかし、直径が1cm以上の微小隕石の衝突頻度やサイズ分布については不明であり、モデルの不確定要素にもなっている。月面衝突閃光の存在は、月のNa大気の発生起源の間接的証拠でもあり、微光な月面衝突閃光を調べることが必要とされる。また、C+やO+イオンが月探査機「かぐや」で観測されていることから、彗星や炭素質コンドライト起源の流星群起源のフラグメントにCやH₂Oが含まれており、月面衝突によるイオンスパッタリングで外部へ放出されている可能性もある。

	水星(0.387AU) (Na atoms/cm ² /s)	月(1AU) (Na atoms/cm ² /s)	ケレス(2.767AU) (Na atoms/cm ² /s)
太陽光脱離	4.0 × 10 ⁴ (0.02%)	5.3 × 10 ⁴ (1.5%)	69.2 (15.2%)
太陽風イオンスパッタリング	6.7 × 10 ⁴ (0.4%)	2.6 × 10 ⁴ (7.6%)	3.4 × 10 ⁴ (74.6%)
微小隕石衝突	1.6 × 10 ⁴ (99.5%)	3.1 × 10 ⁴ (90.8%)	48.0 (10.1%)
散逸率	5.0 × 10 ⁻¹¹	2.0 × 10 ⁻¹¹	4.2 × 10 ⁻¹¹

参考文献

[1] K. Uesugi, T. Kato, T. Ichikawa, P.R. Menon, L. Efron, N. Muranaka, M. Kimura, and T. Hidaka, 2nd Brazilian Symp. Aerospace Tech., (1994).
 [2] P. Ehrenfreund and 82 colleagues, Lunar and Planet. Sci. XXXVIII No. 2446 (2007).
 [3] D. W. Dunham and 13 colleagues, Lunar Planet. Sci. XXXI No. 1547 (2000).
 [4] J. L. Ortiz, P. V. Sada, L. R. Bellot Rubio, F. J. Aceituno, J. Aceituno, P. J. Gutierrez, and U. Thiele, Nature 405, 921 (2000).
 [5] M. Yanagisawa and N. Kisaichi, Icarus 159, 31 (2002).
 [6] M. Yanagisawa, K. Ohnishi, Y. Takamura, H. Masuda, Y. Sakai, M. Ida, M. Adachi and M. Ishida, Icarus 182, 489 (2006).
 [7] R. M. Suggs, W. J. Cooke, R. J. Suggs, W. R. Swift and N. Hollon, Earth, Moon and Planets (Online), DOI 10.1007/s11038-007-9184-0.

(2008年3月22日受付, 2008年7月1日受理)