

分光観測による月面衝突閃光の温度環境の調査

Investigation of Temperature Environment of Lunar Impact Flash by Spectroscopic Observation

阿部研究室
Abe Laboratory
奥山純吾
Jungo Okuyama

A Lunar Impact Flash (LIF) occurs when a meteoroid collides with the moon at hypervelocity. Since the physical mechanism of the impact flash is still unknown, the impact environment such as temperature and its time evolution is the key to understand the LIF phenomenon. In this paper, we observed LIF by two spectroscopic methods. The observation during 2007 Geminid maximum used a high sensitive EM-CCD color camera and four events were. One of them analyzed a time series of temperature from RGB bands. This year, we started spectroscopic observation of LIF using GUNDUM telescope and a spectrograph with 100 lines/mm. The observation system covers about half of the moon's area of view and estimate the radiation temperature of LIF to 6 magnitudes.

1. 序論

月面衝突閃光(Lunar Impact Flash: LIF, Figure 1)とは、月面上に流星体(メテオロイド)が衝突した際に、運動エネルギーの一部が発光エネルギーに変換され、可視光の短時間発光(閃光)が観測される現象である。LIFは、Liakos et al. 2019^[1]や Suggs et al, 2014^[2]などの長期間の定常的な観測から、直径 cm サイズのメテオロイドにおける検出頻度が同サイズのもの地球大気に突入し火球としての検出頻度よりも高く、地球大気上で観測数の少ないサイズのメテオロイドの統計的な観測手法となることがわかっているため(Figure 2), 将来的な地球近傍の宇宙空間や月面での作業や調査におけるリスクヘッジの指標としても、LIFの継続的観測は重要な役割を果たすと考えられている。

が月面に衝突する際に、メテオロイドと月表面が数千ケルビンに加熱され溶融昇華し、黒体放射を含む5~11等ほどの可視光を、0.1~0.01秒ほど放つ現象であると考えられている。そのため、この閃光のスペクトルを観測することができれば放射温度の推定が可能である。スペクトルの観測には分散素子をもちいた分光観測を行う。分光観測とは回折格子などの分光器を用いることで光源を波長ごとに分散し、それを高感度のカメラで高速(毎秒30~60フレーム)撮影する手法である。今回のようなスリットを使わない(スリットレス)分光であると、月面のような面光源を分光すると、分散した1次光から波長を同定することは困難である(Figure 3(a))が、恒星のような点光源では1次光のスペクトルが観測できるため波長同定が可能となる(Figure 3(b)).

LIFの多くは直径10mほどのクレーター内部で生じており、カメラシステムの分解能の以下の発光である(今回の観測システムでは3.708km/pix)。そのため恒星らと同じように点光源とみなせるために透過型スリットレス分光によりスペクトルの観測が可能となる。Figure 1(a)でLIFに広がりがあるように見えるのは大気による拡散やレンズなどの光学系の特性によるものであり、実際にデータを計測する際には広がりも含めたアパーチャーを設定し測光する。温度の推定には観測したスペクトルより波長 λ ごとのフラックスの比 F' を、プランクの放射式(Eq. 1)から得たEq. 2^[4]を用いて温度 T を算出し、フィッティングする。Liakos et al, 2019^[1]のような先行研究では、2波長域を用いた二色温度のみの推定となっており、比較的精度の悪い推定であると考えられる。そのため、波長分解能が10nm程度の低分散分解能のある分光器を使うことで精密な温度推定可能でありつつ、輝線発行の励起種推定も可能であるため、今後の発光メカニズムの解明に役立つと考えられる。

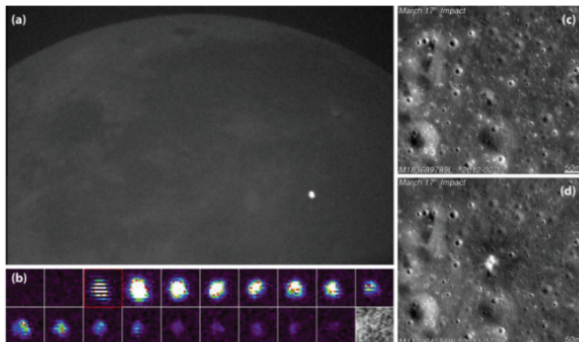


Figure 1. Lunar Impact Flash^[2].

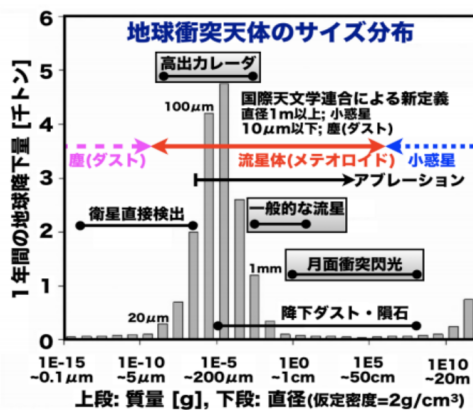


Figure 2. Impact rate of meteoroids on the Earth as a function of mass and size.

典型的な LIF は 10 km/s 以上の超高速でメテオロイド

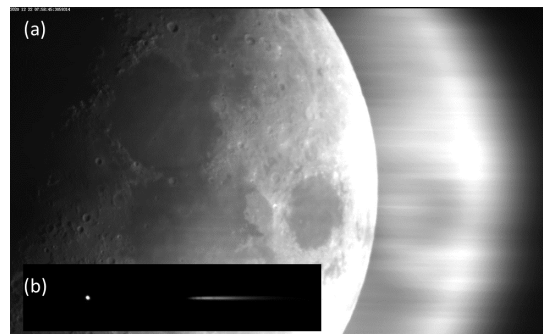


Figure 3. Spectrum of lunar surface(a) and Sirius(b).

$$u' = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

$$F' = \frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \frac{e^{hc/\lambda_2 kT} - 1}{e^{hc/\lambda_1 kT} - 1} \quad (2)$$

2. 観測

2.1 2007年ふたご座流星群

観測はふたご座流星群が活発となる2007年12月15日の日本時間17:30-20:15、兵庫県佐用郡西はりま天文台公園（北緯：35°01'31.4"，東経：134°20'08.0"）にて行った。当時カラーカメラでの衝突閃光の観測は世界初であった。

観測機材には超高感度EM-CCDカラーカメラ「NC-R550a」と13倍ズームレンズ(Fujinon xxx/Fxxx)を使用した。このカメラは三板式と呼ばれる方式で、光源をダイクロックプリズムでRGBの3つの波長域に分解し、3枚のセンサを用いて各色のチャンネルごとに撮影することにより、高解像度のままで正確なカラー動画を記録することができる特徴を持つ。

観測データの計測を行う上で、モノクロメーターを用いた観測機材の校正データの撮影をした。データには2種のホワイトバランス(PST3200&PST5600)で波長カットフィルター(B,V,R,760)を用いながら、各センサの単波長ごとの強度を測定した。観測システムはRGBそれぞれのチャンネルで波長ごとに異なる強度を持ち、得られた強度からフィルター特性を除いて作成した感度曲線をFigure 4に示す。なお、各ホワイトバランスでのRの最大値を1として規格化し平滑化することでRGB感度曲線を得た。

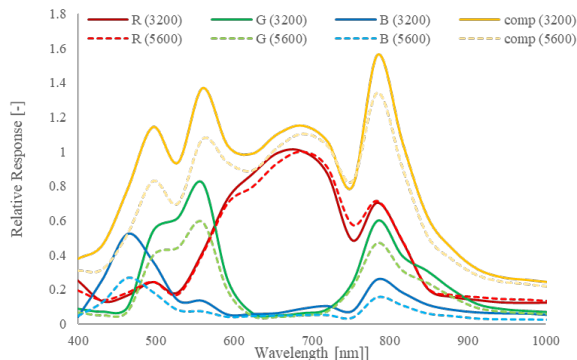


Figure 4. Sensitivity curve (PST=3200 & 5600).

ホワイトバランスにより波長ごとの感度が異なり、色温度が高いほど短波長側の感度が下がっていることがわかる。つまり、ホワイトバランスが大きくなるほど、長波長側、つまり2000Kほどの低温側の検出に適しているといえる。実際に観測に用いたPST 3200での各バンドでのピーク波長 $\lambda_R = 688 \pm 2.49$, $\lambda_G = 560 \pm 3.17$, $\lambda_B = 464 \pm 2.09$ となる。この時、校正データにはランダムノイズがのっている。ノイズの分布はポアソン分布にのっているはずであるためFWHMを算出し、その値を誤差範囲とした。

2007年12月15日には4つのLIFが観測され、その内の3つ(B,C,D)のもので異なる観測システムでの同時観測に成功している(Table 1^[3])。観測されたLIFの内、Dの閃光について解析した。

Table 1 Observed Flash (2007/Dec/15)

No.	Time (JST)	Duration time (s)	Magnitude (Mag)	mass (kg)
A	17:28:18	0.033	8.9	0.12
B	17:54:25	0.017	5.6	1.8
C	17:55:26	0.18	5.4	3.0
D	19:08:10	0.12	5.4	5.3

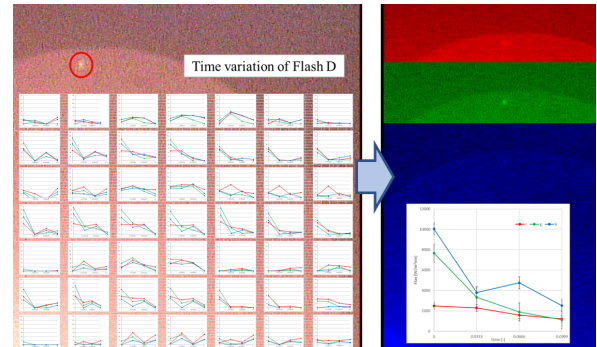


Figure 5. Flash No. D (2007/Dec/15 19:08:10).

衝突閃光が写っている動画は24bit-TIFF画像に分解し、RGB(8bit x 3channels)チャンネルごとに解析ソフト「Makalii」を用いて測光した。測光直径を十分に含む5pixelの正方形を設定した。測光値をFigure 5に示す。測光値より、RGBの3波長域のエネルギーフラックスを算出し、Eq. 1を用いて各波長のピーク波長(代表波長)での温度Tを導出した。また、RGBの内2色(R/G,G/B,B/R)からも同様にEq. 2から2色温度を導出し、それぞれFigure 6に示す。

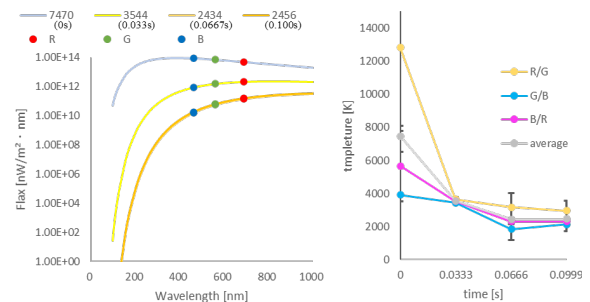


Figure 6. RGB temperatures, -3 colors(left), 2 color(right).

Figure 6(左)より、衝突点温度は衝突直後が最も高く、時間とともに温度が急速に下がっていることがわかる。月面の表面温度は夜側であれば100kほどであるので、温度変化率は衝突時から $\Delta T/\Delta t = 2.21 \times 10^5$, -1.18×10^5 , -3.34×10^4 , -7.21×10^2 K/sとなっている。大気のない月面では熱放射と熱伝導が支配的であるが、室内での衝突再現実験でも同様に、クレーター内部温度が低下していることが確認されている。二色温度図(Figure 6(右))で発光開始時に温度分散が大きくなっている(R/G > B/R > G/B)のは、衝突直後であればB波長が強くR波長が弱い黒体放射の特徴ではなく、Figure 5(右)ではRGBフラックス値は発光開始時にGの値は突出した形になっていることから継続時間の短いプラズマ輝線が担っていると考えられる。短波長での鉄(FeI)、マグネシウム(MgI)など金属輝線などが候補となるが、これらの元素は一般的な石質隕石の構成鉱物である輝石

やカンラン石に豊富に含まれる。また、前述したように点光源である LIF は、地球大気や望遠鏡光学系によりエネルギー分布はガウシアンとなる。より高精度の測定を行うにはアパーチャー径を円形にし、中心の光度から最適なサイズを設定する必要がある。それぞれの温度は Liakos et al. 2019^[1]では、衝突点温度は 1600~6000K という推定となっており、R と B、B と G のバンドで算出した温度はおおよそ近い値になっていると考えられる。

2.2 2020 年こぐま座流星群

観測はこぐま座流星群が極大となる 2020 年 12 月 21 日の日本時間 18:06 - 20:20、22 日の日本時間 17:43 - 20:51 に千葉県船橋市・日本大学理工学部船橋キャンパステクノプレース横（北緯：35° 43' 30"，東経：140° 03' 32"）にて行った。

観測機材には本研究室所有のガンダム望遠鏡(口径 40cm/F3.8, 口径 20cm/F3.0 の 2 連望遠鏡) に GPS 同期した 2 台の CMOS カメラを使用し、それぞれで分光録画と撮像録画をすることにより同時観測を行い、撮像された LIF と同時刻の分光データを調べる方法で実施した。分光観測には QHY 174 GPS カメラに Φ400mm, F3.8 の RiFast を用い、分光器には溝本数 100 本/mm の Star analyzer 100 を使用した。撮像観測には AWO ASI174MM-Cool カメラに Φ200mm, F3.0 の Veloce を用いた。

分光観測システムでの、センサーサイズと焦点距離、月面までの距離からそれぞれの視野と分解能は Figure 7 のようになる。



Figure 7. GUNDAM telescope, field of views and corresponding moon surface regions (12/22/2020).

観測設定は分光観測と通常観測で以下のようにする。

	QHY 174	ZWO 174
Pixel format	1920x1200	1200x730
Bit length	MONO 16bit	MONO 16bit
Exposure (ms)	16.67	33.33
Gain	230	220
Binning	2x2	1x1

観測時間は 2 日間でおおよそ 6 時間であった。そのため、録画データは Eq. 3 より、

$$data = \frac{16bit}{8} \times Total\ pixels \times \frac{Recording\ time}{Exposure} \quad (3)$$

となり、分光観測ではおおよそ 1.5 TB、撮像観測では 1.1TB ほどになった。今回のような高深度、高解像度、長時間の観測では一日に保存するデータ量が多量かつ高負荷のものになってしまう。そのため観測システムにはそれに応じるスペックの録画機器と大型のストレージが必要である。今回の観測では、ストレージ容量不足から波長分解能は必要としない分光観測には binning をかけているのでデータ量は想定 of 4 分の 1 となり、撮像観測では観測エリアの制限と露光時間の変更をすることでデータ処理容量を抑えている。しかし、実際の観測中に外部ストレージを追加、キャプチャのダウンなどの問題もあり、今後の観測を考慮するとシステム面において現状のものでは不十分であると考える。

衝突閃光はとても微光のものであるため、分光観測を行う際には、ゲイン補正をかけたカウント値からノイズとの判別をすることで観測可能であるか評価する必要がある。この時、校正用のデータとしてスペクトルデータが既知である恒星を閃光観測と同条件で別日 (1/22/2021) に撮影した。

観測されたデータではピクセルと波長の関係が不明のため、波長が既知の光源データの取得が必要である。そこで既知のものである明るい恒星のスペクトルを取得し、水素の吸収線を用いながら、波長 - ピクセル関係を算出する。以下にその図と式を示す、

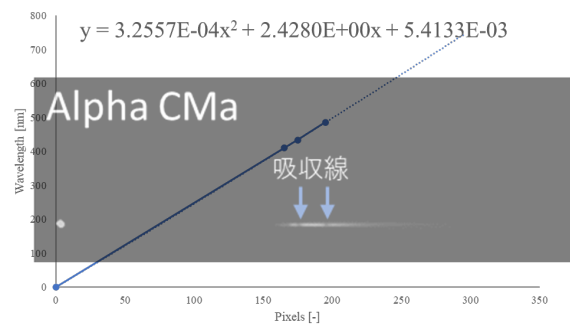


Figure 8. Relations of pixel & wavelength.

恒星のスペクトルデータは国立天文台データベース^[5]のものより作成し、感度曲線は以下の Figure 9 のようになる。この時、簡単化のため最大値を 1 として相対化し典型的な大気吸収も含まれているものにスムージングをかけている。

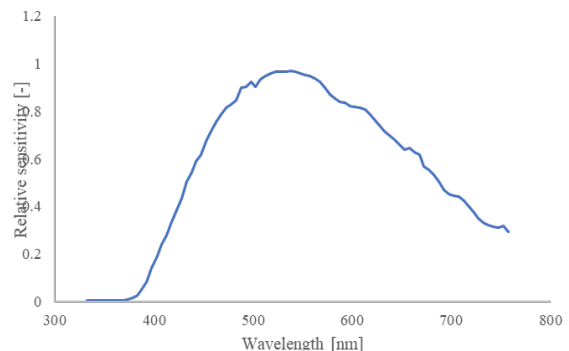


Figure 9. Sensitivity curve of GUNDAM telescope.

上記のものは、等級値が既知である明るい恒星を観測するためにゲインを 0 と設定したため、恒星の吸収

線以外の箇所でノイズが大きく表れていないが、実際の設定では暗い衝突閃光の観測ではゲインを 230 に設定するため、ノイズは増幅される。実際に観測中に月近傍にあった見かけの等級が 6.85 可視等級の恒星 HIP2323 を Figure 10 に示す (時刻は UTC)。

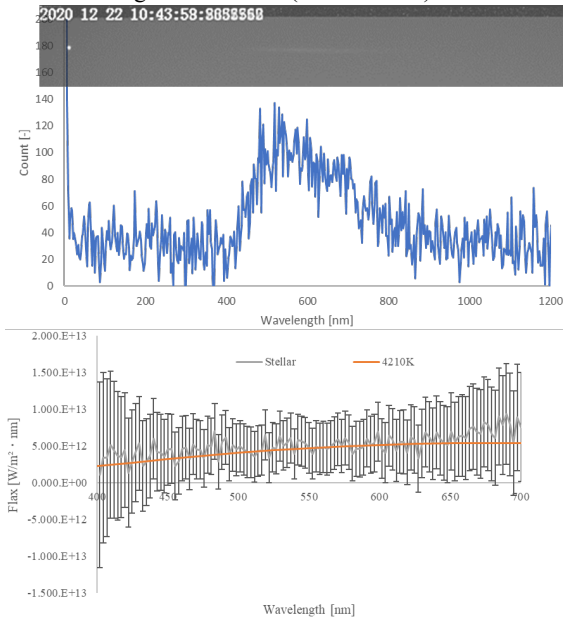


Figure 10. Near-moon stellar spectrum(top) and calibrated spectrum(bottom) by GUNDAM telescope with 1/30s exposure.

Figure 10(上)は、ガンダム望遠鏡で観測した感度補正前の恒星のベクトルである。観測可能な限界等級に近いため、地球大気によるシンチレーション、月の昼側からの迷光や地球照の影響による揺らぎが大きいが、明瞭な連続光スペクトルが確認できる。恒星分光画像からスカイバックグラウンド画像を減算し、感度補正した後のスペクトルを Figure 10(下)に示す。ピーク波長は $\lambda=689\text{nm}$ であり、プランクの放射式(Eq. 1)を用いて黒体放射温度 T を推定すると $T=4210\text{K}$ となる(図中の橙色線)。観測した恒星は、約 4000K の黒体で近似されるスペクトルタイプ K4III 型星であり、観測から導出された温度と誤差内で一致する。積分時間は 1/60 秒であるため、6 等級後半で、1/60 秒以上 (1 フレーム以上) の発光継続時間の LIF であれば、本観測システムでの検出が可能であることが確認できた。

LIF の分光観測では、分散された LIF の 1 次光が地球照で薄らと光る月の夜側や、月の昼側領域に近い月近傍領域で観測されるため、バックグラウンドノイズの除去処理 (スカイ処理) が重要となる。検出された閃光候補フレームより前の安定した多数のフレームから大気揺らぎの少ないフレームをフーリエ変換処理で判別して加算平均を行うスカイフレームを作成し、閃光フレームから減算することで S/N を最大限向上させる。観測動画は全て 16bit の「ser 形式」で SSD に保存を行い、観測後に自動解析ソフト「ser_scan^[4]」を用いて LIF 候補の検出を行う。閃光候補が検出されたフレームは、Figure 11 のように LIF 候補にマークされた非圧縮 16bit 画像として保存される。

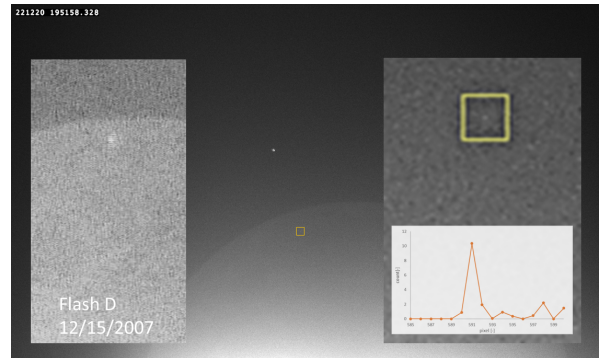


Figure 11. Detected LIF candidate and field star.

検出されたものは次のような条件で誤検出であるかどうかを検討する。

- ① 2 つ以上のカメラで同時刻・(ほぼ)同位置に観測できているか(宇宙線、機器ノイズ、人工衛星の可能性の排除)。
- ② 複数フレームで観測できているか(月の縁の恒星、境界の可能性、単一フレームの場合もある)。
- ③ S/N を用いて評価。

Figure 11 のものはシングルフレームのみであり、また、先の章で取り扱った 2007 年の Flash D と比べてもガウシアンとは異なるプロファイルの閃光であることが分かる。同時観測に関しては、分光データには確認できず他に観測者と現在照会中である。S/N はイベントとノイズのカウント値の比であるため今後の観測で設定する必要がある。同様なイベントが観測を行った 2 日間で数 10 個検出されたが、そのすべてが上記の条件を満たさなかつたため誤検出であったと推測される。そのため、今回観測されたイベントは LIF 現象ではなく、次回の観測には各項目について改善をする必要がある。

3. 結論

LIF を分光観測することで衝突温度の推定を行った。2007 年でのカラー観測データを用いたものでは RGB の 2 色温度と 3 色温度の算出した。色温度の時間変化から、極小期の発光は高温で短時間の「輝線」的発光であり、低温で継続時間の長い「黒体放射」が支配していることが示唆される。今年度、大口径短焦点 (40cm/F3.8) のガンダム望遠鏡と透過型回折格子を用いた分光観測システムでの観測を行った。7 等級程度の LIF であれば温度の推定が可能であることが恒星の観測から確認された。今後も分光観測システムを用いた LIF の定常観測を行う計画である。

参考文献

- [1] A.Liakos et al, NELIOTA: Methods, statistics and results for meteoroids impacting the Moon, *A&A*, 1-31, 2019.
- [2] R.M. Suggs et al, The flux of kilogram-sizes Meteoroids from Lunar impact Monitoring, *Icarus*, 238, 23-36, 2014.
- [3] 柳澤正久, ふたご座流星群に伴う月面閃光の 2 色測光, 電気通信大学, 2007.
- [4] M.Yanagisawa et al, Low dispersion spectra of lunar impact flash 2018 Geminids, *Planetary and Space Science*, 1-12, 2020.
- [5] 国立天文台 天文データセンター, <https://www.adc.nao.ac.jp/>