月の我が家は大丈夫？

NO.
DATE

―ペルセウス座流星群による月面衝突閃光についての考察―

慶應義塾湘南藤沢高等部 3年　宮内 唯衣

1. 目的

8月12日、ペルセウス座流星群の活動が極大を迎えた。新型コロナウイルスの影響から、実際に見に行くことはできなかったが、ペルセウス座流星群による月面衝突閃光を捉えた動画をニュースで見た（図1）。月面衝突閃光とは、流星物質が月面に衝突した際、その部分が発光する現象だ。地球に宇宙からの物質が衝突すると、周囲への影響は甚大で、酷い時には生物を絶滅させたり、気候を変動させたりする。今回、地球からでも月面の発光が見えたということは、衝突時に生じたエネルギーは大きく、月に与えた影響も大きいのではないかと感じた。私は、Lunar Embassy が発行する、月の土地の権利宣言書を保有している（図2）。そこで今回の衝突が自分の土地に影響を及ぼしているのではないかと心配になった。自分の敷地内に衝突した以外にも、衝突により発生した粉塵が飛んできた可能性もある。今回の月面衝突の自分の土地への影響を調べたいと思ったのが研究の動機であり、それを解明することが本紙の目的だ。

※閃光が最も大きく見えたところをもかり取っている。

［図1：閃光を捉えた動画の一部］

［図2：（左）：土地の権利宣言書
（右）：土地の位置（赤点）］

2. 方法

今回の月面衝突閃光を撮影した、平塚市博物館の学芸員、藤井大地さんにお話を伺い、撮影した向き等を教えてもらった。自分の観測データではなく、詳しい値は分からない為、動画や過去のペルセウス座流星群の月面衝突閃光に関する論文を参考に検証を進めた。

3. 考察

藤井さんから聞いた情報は以下の通りだ。

- 撮影した動画は上が東向きである。
- 発光した明るさについて、詳しい測定はしていないが、約7〜8等級と考えられる。
- 月面の様子は不明なので、衝突した物体がペルセウス座流星群由来だと断言はできない。

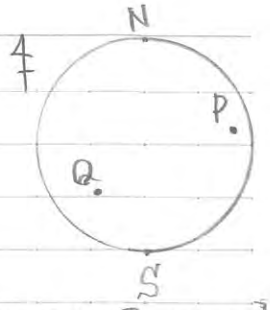
この情報を頼りに考察を進めた。3点目について、観測時期がペルセウス座流星群の極大期であったことから、ペルセウス座流星群由来の物質が衝突したと仮定し、本紙では検証した。

KOKUYO

3-1、物体の衝突位置

3-1-1、衝突位置と保有地との関係

図1の上が東であることから、物体は月の北半球に衝突したことが分かる。一方、私の保有地は、20〜24°S / 32〜36°Wに位置し、南半球にある。衝突位置を点P，保有地を点Qとすると、地球から見える面における2地点の位置関係は図3のようになる。よって、物体が保有地に衝突した可能性は消去できる。



[図3：衝突位置と保有地の位置関係]

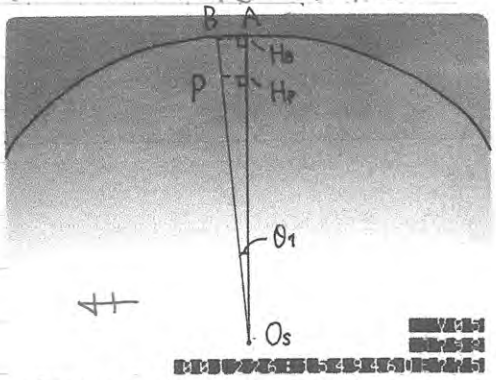
3-1-2、衝突位置〜保有地間の距離

次に図3の点PとQがどれ程離れているのかを求める。月は球体であるため、まず、点Pの座標を求める。以下では月を完全な球体と仮定する。

写真を印刷し、必要な長さを定規で測って緯度、経度を求める。定規の最小目盛は1mmより、画像が小さいと誤差が大きくなるため、拡大した画像を用いる。又、測る時はなるべく長い部分を選んだ。写真の月の縁に合う円をコンパスで描き、月面の中心O_sを定めた。測定時の写真を約32%に縮小したのが図4だ。図4において、点A，Bは円周上にあり、点Pは発光部分の中心である。又、点H_B，H_Pはそれぞれ点B，Pから線分O_sAに下ろした垂線の足である。これらの点は、地球側の月の半球面上にある。測定値は以下のようになった。

$O_sA = 12.45\,cm$，$O_sP = 10.79\,cm$，$BH_B = 1.18\,cm$

これらを用いて、緯度、経度を求める。

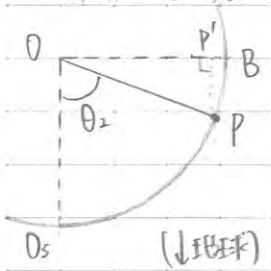


[図4：地球側から見た月面]

(i) 経度

東経θ_2度とする。月を点O_s，P，Bと月の中心Oを通る平面で切った断面を考え、図5のようにP'をふる。測定値は平面的に捉えたものだから、$OP' = OP$

OB，OPは月の半径に対応することから、$OA = OB = OP$ より、



[図5：断面図(i)]

$$OP\cos(90^\circ - \theta_2) = OP' \text{ より}$$

$$OA\cos(90^\circ - \theta_2) = OP$$

$$12.45\sin\theta_2 = 10.79$$

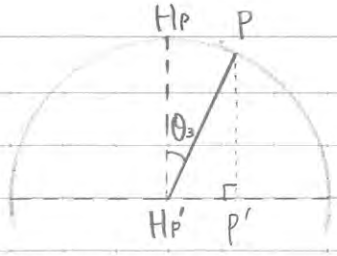
$$\sin\theta_2 = \frac{10.79}{12.45} = 0.8667$$

$\sin 60.0^\circ = 0.8660 < \sin\theta_2 = 0.8667 < \sin 60.1^\circ = 0.8669$ より、

$$\theta_2 \simeq 60.0^\circ$$

(ii) 緯度

北緯θ_3度とする。月を、点P，H_Pを通り、経度0°の子午線に平行な平面で切った断面を考え、図6のようにP'，H_P'をふる。



※奥側に月の中心がある。

【図6：断面図(ii)】

図4において、$PH_P = O_SP \sin\theta_1 = O_SP \cdot \frac{BH_B}{O_SB}$

$= O_SP \cdot \frac{BH_B}{O_SA}$

ここで(図4のPH_P) = (図6の$P'H_P'$)より、

$P'H_P' = PH_P' \cos(90^\circ - \theta_3)$

$\cos(90^\circ - \theta_3) = \frac{P'H_P'}{PH_P'} = \frac{O_SP \cdot \frac{BH_B}{O_SA}}{O_SA}$

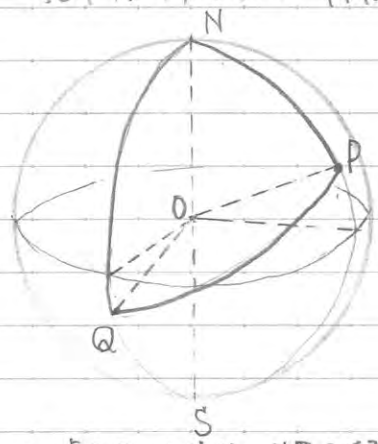
$= \frac{10.79 \times 1.18}{12.45 \times 12.45} = 0.0821$

$\cos 85.3^\circ = 0.0819 < \cos(90^\circ - \theta_3) = 0.0821 < \cos 85.4^\circ = 0.0836$ より

$(90^\circ - \theta_3) \simeq 85.3^\circ$ $\therefore \theta_3 \simeq 4.7^\circ$

(i)(ii)より、発光の中心は北緯4.7°、東経60.0°辺りである。

求めた座標をもとに保有地との距離を求める。保有地(点Q)の座標は20〜24°S/32〜36°Wより、平均を取って、22°S/34°Wとする。



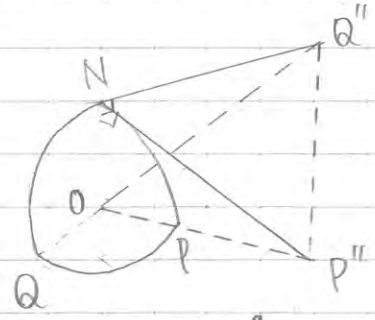
【図7：点P・Qの立体的な位置関係】

$\angle POQ$が求まれば、$\widehat{PQ}$の長さを求められる。

$$\left.\begin{aligned} \angle PON &= 90^\circ - \theta_3 = 85.3^\circ \\ \angle QON &= 90^\circ + (\text{点Qの緯度}) = 90^\circ + 22^\circ = 112^\circ \\ \angle PNQ &= \theta_2 + (\text{点Qの経度}) = 60.0^\circ + 34^\circ = 94^\circ \end{aligned}\right\} \cdots ①$$

現段階で求められる以上の値を用いて、$\angle POQ$を求める。

図7の内、立体OPQNを取り出し、扇形OPQが底面となるように回転させる。そして、点Nから、扇形ONP, ONQの接線を引き、OP, OQの延長線と交わる点を点P'', Q''とする(図8)。



【図8：立体OPQN】

$ON = 1$とすると、$\angle ONP'' = \angle ONQ'' = 90^\circ$ より、

$NP'' = \tan\angle PON$

$NQ'' = \tan(180^\circ - \angle QON) = -\tan\angle QON$

ここで、$\triangle P''NQ''$に注目し、余弦定理を用いると、以下の式が成り立つ。

$P''Q''^2 = NP''^2 + NQ''^2 - 2NP'' \cdot NQ'' \cdot \cos\angle P''NQ''$

$= \tan^2\angle PON + (-\tan\angle QON)^2 - 2 \cdot \tan\angle PON \cdot (-\tan\angle QON)\cos(180^\circ - \angle PNQ)$

$= \tan^2\angle PON + \tan^2\angle QON + 2\tan\angle PON \cdot \tan\angle QON \cdot (-\cos\angle PNQ)$

$= \tan^2\angle PON + \tan^2\angle QON - 2\tan\angle PON \tan\angle QON \cos\angle PNQ \cdots ②$

また、同様に、

$OP'' = \sqrt{1 + \tan^2\angle PON} = \frac{1}{\cos\angle PON}$, $OQ'' = \sqrt{1 + (-\tan\angle QON)^2} = \sqrt{1 + \tan^2\angle QON} = -\frac{1}{\cos\angle QOP}$

$\triangle OP''Q''$に注目して余弦定理を用いると、次の式が成り立つ。

$$P''Q''^2 = OP''^2 + OQ''^2 - 2\,OP''\cdot OQ''\cdot\cos\angle P''OQ''$$
$$= \frac{1}{\cos^2\angle PON} + \frac{1}{\cos^2\angle QON} - 2\cdot\frac{1}{\cos\angle PON}\cdot\left(-\frac{1}{\cos\angle QON}\right)\cdot\cos\left(180^\circ - \angle POQ\right)$$
$$= \frac{1}{\cos^2\angle PON} + \frac{1}{\cos^2\angle QON} - 2\cdot\frac{1}{\cos\angle PON}\cdot\frac{1}{\cos\angle QON}\cos\angle POQ \quad \cdots ③$$

②③より、

$$\tan^2\angle PON + \tan^2\angle QON - 2\tan\angle PON\cdot\tan\angle QON\cos\angle PNQ$$
$$= \frac{1}{\cos^2\angle PON} + \frac{1}{\cos^2\angle QON} - 2\frac{1}{\cos\angle PON}\cdot\frac{1}{\cos\angle QON}\cdot\cos\angle POQ$$
$$= \left(1+\tan^2\angle PON\right) + \left(1+\tan^2\angle QON\right) - \frac{2\cos\angle POQ}{\cos\angle PON\cdot\cos\angle QON}$$

より、

$$-2\tan\angle PON\cdot\tan\angle QON\cdot\cos\angle PNQ = 2 - \frac{2\cos\angle POQ}{\cos\angle PON\cdot\cos\angle QON}$$

$$\left(\cos\angle PON\cdot\cos\angle QON\right)\left(-\tan\angle PON\cdot\tan\angle QON\cdot\cos\angle PNQ\right) = \cos\angle PON\cos\angle QON - \cos\angle POQ$$
$$\left(\cos\angle PON\cdot\cos\angle QON\right)\left(-\frac{\sin\angle PON}{\cos\angle PON}\cdot\frac{\sin\angle QON}{\cos\angle QON}\cdot\cos\angle PNQ\right) = \cos\angle PON\cdot\cos\angle QON - \cos\angle POQ$$
$$-\sin\angle PON\sin\angle QON\cos\angle PNQ = \cos\angle PON\cdot\cos\angle QON - \cos\angle POQ$$

よって、$\angle POQ$は以下のように①の値を用いて表せる。

$$\cos\angle POQ = \cos\angle PON\cdot\cos\angle QON + \sin\angle PON\cdot\sin\angle QON\cdot\cos\angle PNQ$$

具体的な値を代入すると、

$$\cos\angle POQ = \cos 85.3^\circ\cdot\cos 112^\circ + \sin 85.3^\circ\sin 112^\circ\cos 94^\circ$$
$$= \cos 85.3^\circ\cdot(-\cos 68^\circ) + \sin 85.3^\circ\sin 68^\circ(-\cos 86^\circ)$$
$$= -0.0819\times 0.3746 - 0.9966\times 0.9272\times 0.0698$$
$$= -0.0952$$

$\cos(180^\circ - 84.5^\circ) = -0.0958 < \cos\angle POQ = -0.0952 < \cos(180^\circ - 84.6^\circ) = -0.0941$ より、

$$\angle POQ \simeq 95.5^\circ \quad \cdots ④$$

$\overset{\frown}{PQ}$の長さは、

$$\overset{\frown}{PQ} = (\text{月の半径})\times\angle POQ\ [\mathrm{rad}]$$

より、(月の半径) = 1738 km (JAXA, 2014) 及び④を代入すると、

$$\overset{\frown}{PQ} = 1738\times 95.5\times\frac{\pi}{180}$$
$$= 2896 = 2.90\times 10^3$$

以上より、物体の衝突位置は、私の保有地から、約 2.90×10^3 km 離れていたことが推測できる。

NO.

DATE

3-2. 衝突について

衝突位置が分かったため、衝突という現象について次に考察する。

3-2-2. 発光継続時間

公表された動画をスローで撮影し、動画に入っていたタイマーを基に調べた。残像が残る時間は計測せず、光がはっきりと見える時間を調べた。すると、発光は、8月12日の0時49分46秒745～0時49分46秒842の間の0.097秒間、継続していた。しかし、スローで撮影した動画では、タイマーの目盛りは0.033～0.035秒毎にしか変化しなかった。(フレームレートの影響だと考えられる。)よって、最大0.066～0.070秒(0.033×2～0.035×2)の誤差が生じる可能性がある。以上を踏まえると、発光継続時間は0.027～0.167秒の範囲にある。2012年から2013年のペルセウス座流星群の月面発光の研究グループが発表する論文(Madiedo et al, 2015)に、観測されたものの発光継続時間は0.02～0.16秒だったと書かれているため、算出した値は取り得る。

3-2-3. 衝突した物体の質量

質量を求めるため、物体が持っていたエネルギーを算出する。実視等級において、1等級は6等級の明るさの100倍、と定義されており、明るさは等比数列で表される。n等級, (n-1)等級……, 1等級, …という数列を考え、この時の公比をrとすると以下の式が成り立つ。

定義より　$r^{(6-1)} = r^5 = \frac{1}{100}$

両辺の対数をとると、　$\log_{10} r^5 = \log_{10} \frac{1}{100} = -2$

$$r = 10^{-\frac{2}{5}}$$

0等級の光のエネルギーをL_0とすると、n等級の光のエネルギーL_nは以下の式で表わせる。

$$L_n = L_0 \cdot r^{(n-0)} = L_0 \cdot 10^{-\frac{2}{5}n} \quad \cdots ⑤$$

ここで、0等級の星を地球で観測した時に受ける輻射エネルギーは、波長555.6nmの時、3.56×10^{-11} W/m²nmであるので(『理科年表2020』より)、$L_0 = 3.56 \times 10^{-11}$を式⑤に代入する。

$$L_n = 3.56 \times 10^{-11} \times 10^{-\frac{2}{5}n} = 3.56 \times 10^{(-11-\frac{2}{5}n)} \quad \cdots ⑥$$

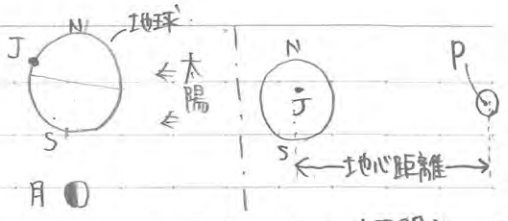
次に、今回の月面衝突閃光で放射された光のエネルギーを求める。式⑥は、1秒及び1nmあたりの値であるから、発光継続時間と、可視光線の波長幅をかければ、1m²に届く光エネルギーが求められる。時間はすでに求めた。JISにより、可視光線の波長の下限は360～400nm上限は760～830nmと定められているから、波長幅の平均をとると、以下の値が得られる。

$$\frac{(830-360)+(760-400)}{2} = 415\text{nm}$$

発光時間をt[s]とすると、　$3.56 \times 10^{(-11-\frac{2}{5}n)} \times 415\ t$　[J/m²]となる。更に、このエネルギーを持つ光が届いた面積を求める。表面に衝突した場合、光は半球状に等しく広がっていく(Zuluaga et al, 2019)。地球から光が観測されたことから、光は地球と月の距離を半径とした半球状に広がったと考えることができる。8月12日はちょうど下弦の月だったことから、

KOKUYO

0時頃の地球と月と太陽の位置関係は図9-(左)の通りで、その時の日本の位置は点Jである。図9-(右)は太陽の反対側から地球と月を見た図だ。図で、観測地(点J)と衝突位置(点P)の距離は半径の影響を受けていないことが分かるので、地心距離に近似することができる。8月12日0時49分46秒での地心距離は401969 kmである(国立天文台HPより)。よって光エネルギーE_l[J]は以下のように表せる。



[図9:(左):月・地球・太陽の位置関係
(右):月・地球の位置関係]

$$E_l = 3.56\times10^{(-11-\frac{2}{5}n)}\times415\times\frac{4\pi}{2}\times(4.019\times10^8)^2$$
$$= 3.56\times415\times2\times3.141\times(4.019)^2\times10^{(5-\frac{2}{5}n)} \quad \cdots ⑦$$

ここで、発光に使われたエネルギーE_lは、物体が持つ運動エネルギーE_k[J]の一部である。発光効率は0.2%と知られている(Madiedo, 2015)。よって、物質の質量と速さをm[kg], v[m/s]とすると次のようになる。

$$\begin{cases} E_k = \frac{1}{2}mv^2 \\ E_l = \frac{0.2}{100}E_k \end{cases} \text{より } E_l = \frac{0.2}{2\times100}mv^2 \quad \text{よって} \quad m = \frac{E_l}{v^2}\times10^3\ [\mathrm{kg}] \cdots ⑧$$

$v = 5.9\times10^4$ m/s (NASA, 2019)より、式⑦⑧から質量を求めると下の式になる。

$$m = \frac{E_l}{v^2}\times10^3 = \frac{3.56\times415\times2\times3.141\times(4.019)^2}{5.9\times5.9}t\times10^{(5-\frac{2}{5}n+3-8)}$$
$$\simeq 4306t\times10^{(-\frac{2}{5}n)} \simeq 4.31t\times10^{(3-\frac{2}{5}n)}$$

t, nを代入して最小値,最大値を求めると、

最小値 $m|_{t=0.027,\,n=8} = 7.335\times10^{-2}$ [kg] = 73.4 [g]
最大値 $m|_{t=0.167,\,n=7} = 1.139$ [kg] = 1.14 [kg]

∴衝突した物体の質量は、73.4 g ~ 1.14 kg の範囲にある。

3-2-4、衝突した物体の大きさ

物体を球体だと仮定し、求めた質量を用いておおよその物体の大きさを求める。直径D_{imp}[m]は、物体の質量m[kg]、密度ρ[kg/m³]を用いて以下のように表せる。

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{2}D_{imp}\right)^3 = \frac{m}{\rho} \quad \text{より} \quad D_{imp} = 2\sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}$$

ペルセウス座流星群を構成する物体の密度は1.2×10^3 kg/cm³ (Madiedo et al, 2015)より、$\rho_{imp}=1.2\times10^3$として直径の最小値・最大値を求めると、次のようになる。

最小値 $D_{imp}|_{m=7.335\times10^{-2}} = 0.04887$ [m] = 4.89 [cm]
最大値 $D_{imp}|_{m=1.139} = 0.1219$ [m] = 12.2 [cm]

∴衝突した物体の直径は 4.89 cm ~ 12.2 cm の範囲にある。

3-3. 衝突によって作られたクレーターの大きさ

3-2で衝突時のエネルギー、衝突した物体の質量と大きさを求めた。次に、物体が作ったクレーターの大きさを求める。クレーターの直径 D [m] に関しては次の関係式が成り立つことが知られている (Madiedo, 2015 / Zuluaga, 2020)。

$$D = 0.25\, \rho_{imp}^{\frac{1}{6}}\, \rho_{moon}^{-\frac{1}{2}}\, E_k^{0.29} (\sin\theta)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{但し } D < 100000) \quad \cdots ⑩$$

ρ_{moon} は、物体が衝突したところの密度である。月の表面の密度は $1.6\,g/cm^3$ (Madiedo, 2015) より、$\rho_{moon} = 1.6\times10^3$ を用いる。θ は物体の入射角 ($\theta \leqq 90°$) だが実際の値は不明だ。式⑩に適切な m の値を代入すると最小値、最大値を求めることができる。

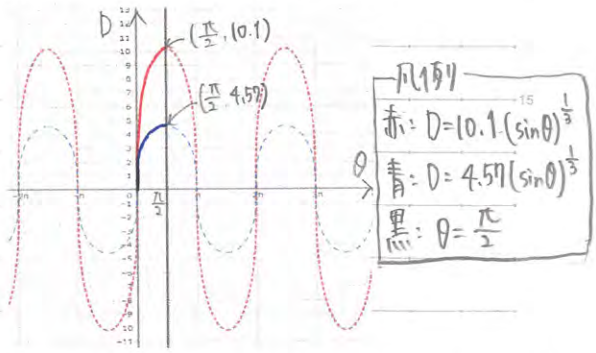
$$D = 0.25\cdot(1.2\times10^3)^{\frac{1}{6}}\cdot(1.6\times10^3)^{-\frac{1}{2}}\cdot\left\{\frac{1}{2}m(5.9\times10^4)^2\right\}^{0.29}\cdot(\sin\theta)^{\frac{1}{3}}$$
$$= 9.747\, m^{0.29} (\sin\theta)^{\frac{1}{3}}$$

最小値 : $D|_{m=7.335\times10^{-2}} = 4.5\cancel{6}7\cancel{9}(\sin\theta)^{\frac{1}{3}} = 4.57(\sin\theta)^{\frac{1}{3}} \quad \cdots ⑪$

最大値 : $D|_{m=1.139} = 10.1\cancel{8}(\sin\theta)^{\frac{1}{3}} = 10.1(\sin\theta)^{\frac{1}{3}} \quad \cdots ⑫$

D は θ の関数で、グラフは図10のようになる。$0° \leqq \theta \leqq 90°$ より、取り得る値は $0 \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{2}$ の実線で示した部分である。$(\sin\theta)^{\frac{1}{3}}$ の前の定数を A とおくと、

$$\lim_{\theta\to+0}\left\{\frac{d}{dx}A(\sin\theta)^{\frac{1}{3}}\right\} = \lim_{\theta\to+0}\frac{A\cos\theta}{3(\sin\theta)^{\frac{2}{3}}}$$
$$= \lim_{\theta\to+0}\frac{A}{3}\cdot\left(\frac{\theta}{\sin\theta}\right)^{\frac{2}{3}}\cdot\frac{1}{\theta^{\frac{2}{3}}}\cdot\cos\theta$$
$$= \infty$$



[図10: 物体の入射角とクレーターの大きさの関係]

$$\lim_{\theta\to\frac{\pi}{2}-0}\left\{\frac{d}{dx}A(\sin\theta)^{\frac{1}{3}}\right\} = \lim_{\theta\to\frac{\pi}{2}-0}\frac{A\cos\theta}{3(\sin\theta)^{\frac{2}{3}}} = 0$$

より、D は、θ が $0°$ を離れると急上昇し、$\theta = 90°$ の時の値に収束していく。よって、D を $\theta = 90°$ の時の値に近似して考える。式⑪⑫は、質量の最小値と最大値を代入しているため、A の取り得る値は、$4.57 \leqq A \leqq 10.1$ である。そして、$\theta = 90°$ の時、$\sin\theta = 1$ より、D と A は一致する。

∴ 衝突によってできるクレーターの大きさは 4.57 m ～ 10.1 m の範囲にある。

3-4. 衝突によって発生した粉塵の及ぶ範囲

衝突によって飛び散った粉塵が自分の保有地にまで到り着いたか、検証する。物体は cm 単位と非常に小さいため、クレーターからの放出物のみを考慮する。クレーターの形成でできた粉塵はクレーターの淵に堆積する。その厚さを T_{rim} [m] とすると、今回のクレーターは 1km より小さいため、T_{rim} と D には以下の関係式が成り立つ (Moore, 1974)。

$T_{rim} = 0.04\left(\frac{1}{2}D\right)$ より $T_{rim} = 0.02D$ …⑬

また、クレーターの中心から X[m] 離れた位置での堆積物の厚さ T[m] は、以下の式で表すことができる（Moore, 1974）。

$$T = T_{rim}\left(\frac{X}{\frac{1}{2}D}\right)^{-3} \quad \text{より、} \quad T = T_{rim}\left(\frac{2X}{D}\right)^{-3} \quad \cdots ⑭$$

式⑬⑭より、

$$T = 0.02D \cdot \frac{D^3}{8X^3}$$

$$= 2.5D\left(\frac{D}{10X}\right)^3 \quad \cdots ⑮$$

保有地への影響は、クレーターが最大の時を想定する。考察3-1-2及び3-3より、$X = \overline{PQ}$ [m] $= 2.896 \times 10^6$, $D = 10.12$ を式⑮に代入する。

$$T = 2.5 \times 10.12 \times \left(\frac{10.12}{10 \times 2.896 \times 10^6}\right)^3$$

$$= 1.099 \times 10^{-18} \text{ [m]}$$

$$= 1.08 \times 10^{-15} \text{ [mm]}$$

$$= 1.08 \times 10^{-9} \text{ [pm]}$$

最大でも 1.08×10^{-9} pm しか粉塵は積もらない。ただ、粉塵1粒子の大きさは求めた値よりも遥かに大きいと考えられるため、粉塵が私の保有地に影響を与えた可能性は限りなく0に近い。

4. 結論

8月12日0時49分46秒に発生した月面衝突閃光は、ペルセウス座流星群によるものだと仮定した場合、北緯 4.7°, 東経 60.0° 辺りに形成された、直径 4.57～10.1 m のクレーターが発光することによって生じた現象である。月面に衝突した物体は質量が 73.4 g ～ 1.14 kg で、直径が 4.89 cm ～ 12.2 cm である。

南緯 20～24°, 西経 32～36° W に位置する私の保有地は物体の衝突位置から約 2.90×10^3 km 離れており、今回の月面衝突による影響はなかったと推測できる。

5. 感想

発光が地球からも観測できたため、衝突の規模はかなり大きいのかと感じていたが、

実際に衝突した物体は数cmであったことに驚いた。しかし、同時に、数cmの物体で、数mのクレーターを形成することから、衝撃の強さ、物体の持つエネルギーの大きさを感じることができた。

今回の検証では、仮定に仮定を重ねたため、幅が広くなってしまった。宇宙での現象など、自ら行って確かめられない現象に関し、正確な値を導くことの難しさを痛感した。しかし、データさえあれば、数学を用いて検証し、現象を解明できる。身の回りの様々な現象を数学的な視点から捉え、より深い理解を目指したい。

6、参考文献　（HPの最終閲覧日は全て2020年8月27日）

Madiedo, J.M., Ortiz, J.L., Organero, F., Ana-Hernández, L., Fonseca, F., Morales, N., & Cabrera-Caño, J. (2015). Analysis of Moon impact flashes detected during the 2012 and 2013 Perseids. *Astronomy & Astrophysics*, 577, A118.

Moore, H.J., Hodges, C.A., & Scott, D.H. (1974). Multiringed basins-illustrated by Orientale and associated features. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings* (Vol.5, pp71-100).

Zuluaga, J.I., Tangmatitham, M., Cuartas-Restrepo, P., Ospina, J., Pichardo, F., Lopez, S.A., Peña, K., & Gaviria-Posada, J.M. (2020). Location, orbit and energy of a meteoroid impacting the Moon during the Lunar Eclipse of January 21, 2019. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(1), 1432-1499.

NASA Science SOLAR SYSTEM EXPLONATION. (2019.12.19). Perseids. https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/meteors-and-meteorites/perseids/in-depth/

国立天文台(1994). 月の地心座標. https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/moon.cgi

国立天文台.(2019.11.20).『理科年表 2020』. 丸善出版 発行