

## Halley Type 及び 長周期流星群の発光高度の特徴

司馬康生 (SonotaCo Network)

### 要旨

SonotaCo Network の 15 年間の観測データから、Halley Type および長周期タイプの 96 流星群について発光点及び消滅点高度を統計調査した。観測結果の発光点高度、消滅点高度から、強く相関する地心速度の影響を取り除くと、流星の平均光度、平均突入角との相関があった。更にこれらの効果も取り除くと、近日点距離が小さい流星群の発光点高度が低い傾向だった。また、軌道周回数が多いと見られる流星群の発光点高度も低い傾向だった。これらは、流星物質が太陽に接近することで、流星物質に変成作用が起こると考えられる。変成作用の詳細には複数の可能性があり、これを議論する。なお、一部の流星群(#101 PIH, #183 PAU, #187 PCA, #246 AMO, #1119 LAV) は、特異的に発光高度が低かった。これらの流星群は、流星物質の中の揮発成分が統計的に枯渇傾向、もしくは表面に軟弱な物質を纏わない物質の可能性もある。また、撮影流星数の多い 6 群に対する調査で Per 群を除く 5 群が太陽活動の活発な年で発光点高度が高くなる傾向があったが、消滅点高度と太陽活動の相関はネガティブだった。

### 序論

地球に突入する流星物質は、真空の宇宙から発光可能な大気密度である高度に達したとき、地球大気と衝突して発光、もしくは電波を反射するプラズマを作ることによって地上から観測可能になる。本研究は、発光高度の調査、すなわち流星物質に関する研究であると共に、この高度帯である地上 80-115km 付近の大気に関する光学研究である。

流星の発光点側の高度を左右する理由はいくつかある。スーパーシュミットカメラの写真観測では流星物質の起源が彗星由来か小惑星由来かによって 10km 程度の差が生じるとされた (Cook 1970)。その後、TV 観測で、速度に最も依存することが注目され (Sarma&Jones 1985)、群流星 (Roggemans 2017) でも確認された。速度が強く影響するのは、流星物質が持つ運動エネルギーが光エネルギーに変換されるからである。運動エネルギーは、その速度の二乗に比例し、その質量に比例する。つまり、流星体の速度の効果が質量の効果 (Sarma&Jones 1985) より発光に効く。このため大気密度の薄い高空から効率よく光学観測可能な電磁波を発出すると理解できる。流星体の表面積も発光高度に影響するだろう。表面積が広いと多くの大気分子と衝突でき、発光効率上がり、発光点はより高く認識できるだろう。同じ質量の流星物質でも表面積が大きくなる理由は 2 つ有る。一つは、流星体の密度が最初から低い場合であり、もう一つは、希薄大気中で流星物質が崩壊する場合である。この崩壊では、melting meteor 現象 (Ward 2016) を引き起こす、おそらく全体が軟弱な流星物質の場合がある。また、流星物質への spattering が表面物質を引きはがしプラズマのカスケードが形成する現象 (Li et al 2014) も考えられている。流星体に揮発物質が多く含まれ、それが可視光～赤外域で発光しやすいプラズマとなる場合もある。これは、低速の流星において重要かもしれない。さて、特に高速 ( $V_g > \sim 60\text{km/s}$ ) かつ火球クラス (-5 等以上) の明るい流星では、かつての常識を越えた高い空 (130-170km) での発光が近年の TV 観測で記録され (Fujiwara et al 1988, Koten et al 2006, Spurny et al 2014a)、電波でも高空での Echo が観測 (Li et al 2014) されている。高空におけるスペクトルは大気成分である酸素、窒素の赤外領域の発光が卓越する (Spurny et al 2014b) と共にジェットを伴う拡散したイメージとして捉えられ、低空での ablation とは違ったメカニズムによる発光とされる (Vonkovic 2007, Spurny et al 2014b)。つまり発光高度を左右する理由を考えるには流星体のみならず大気状態にも注目すべきである。一般に、地球上の大気密度と高度の関係は比較的安定である。それでも流星の発光高度帯である宇宙空間と接する領域 (中間圏上部～熱圏下部) の大気状態を変化させる理由がいくつかある。一つは、太陽活動である、電波観測ではその報告が多数ある (Batubara et al 2018, Premkumar 2018; Campbell-Brown 2019)。一方で、ペルセウス座流星の大きな流星物質に対する調査に該当する写真観測では、太陽活動との相関はネガティブであるという報告もある

(Bu.cek et al 2012; Porubcan et al 2012)。電波観測におけるエコー高度は、日変化、散在流星に対する季節変化 (Roggemans 2017)、planetary wave (Rossby waves)、地磁気変化 (Campbell-Brown 2019)、中間圏の環境気温 (Lee et al 2021) の影響も報告されている。

一方、消滅点高度は、流星体のサイズが小さくなることで発光量が小さくなるか、流星体の速度が十分遅くなることで発光できるエネルギー供給が止まるために発光が終息する高さである。一般に、高速流星を含むほとんどの流星は前者の効果が卓越し、高速のまま発光が途絶える。反対に隕石の落下が期待できるような低速大質量のごく一部の流星物質では後者の効果が卓越する。この消滅点高度を決定する理由も複雑である。まず、突入質量が大きいなら ablation によって質量が削り取られてもなお長く残存できるだろう。次に速度が遅いことで消滅点が低くなる効果である。速度が遅い場合、大気との衝突によるエネルギーが小さいため、流星物質の破碎や ablation による流星物質の蒸発が抑制され、消滅点高度は低くなる。また、密度の大きな流星物質も消滅点が低くなる。同じ質量であれば密度の大きな物質ほど大気との衝突断面積が小さくなり、ablation は大気密度の高い低空まで遅延する。一方、流星物質の機械的強度が低い "dust ball" のような場合 (Campbell et al 2000) は破碎が促進され消滅点高度が高くなる。一般に、流星物質が大気の濃い領域に達すると、その前面に蓄えられた大気圧 ( $p = \rho v^2$ ) は、容易に流星物質を破碎させる力を持つ。破碎した流星物質は、その表面積が急増するため、ablation が促進し、速く消滅してしまう。また、発光点の高かった流星は、ablation が早く開始し、消滅のプロセスも速くに訪れる。流星物質に特に揮発しやすい物質が含まれている場合も、速やかに消滅し、その高度が高くなるだろう。大気に突入する角度も消滅点に影響する。一般に、人工飛翔体の大気突入は低い角度になるよう企画される。それは、ablation 過程を緩やかにして、回帰飛翔体への負荷を減らすことに貢献することが知られているためである。すなわち流星物質が低角度で突入すると消滅点高度が低くするかもしれない。(Sarma&Jones 1985) は、突入角が低いときに消滅点が低くなるとされた。一方、(Molau&SonotaCo 2008) ではペルセウス座流星群で浅い角度の突入が発光高度を高くするという逆の結果を報告している。

発光点や消滅点高度という物理量は、実に多くの理由の複雑な組み合わせで決定される。ただ、これらの発光点高度、消滅点高度を決める理由は起源が異なる流星群別に違っているかもしれないし、一つの流星群にも多様な流星物質が含まれているだろう。それでも一つの流星群で多くの流星が観測されたなら、流星群毎の統計的傾向は読み取ることができるはずである。日本の自動 TV 流星観測ネットワーク、SonotaCo Net では 2007 年から 2021 年までの観測の蓄積で、10 万を超える流星軌道が取得できた。ここではこの大量のデータから Halley Type と長周期の流星群毎の発光点、消滅点高度の特徴を調べた。

## 方法

基礎データは、SonotaCo Network のサイトからダウンロードし、UFOOrbitV2 によって軌道を計算した (SonotaCo 2009)。データ期間は 2007 年 1 月-2021

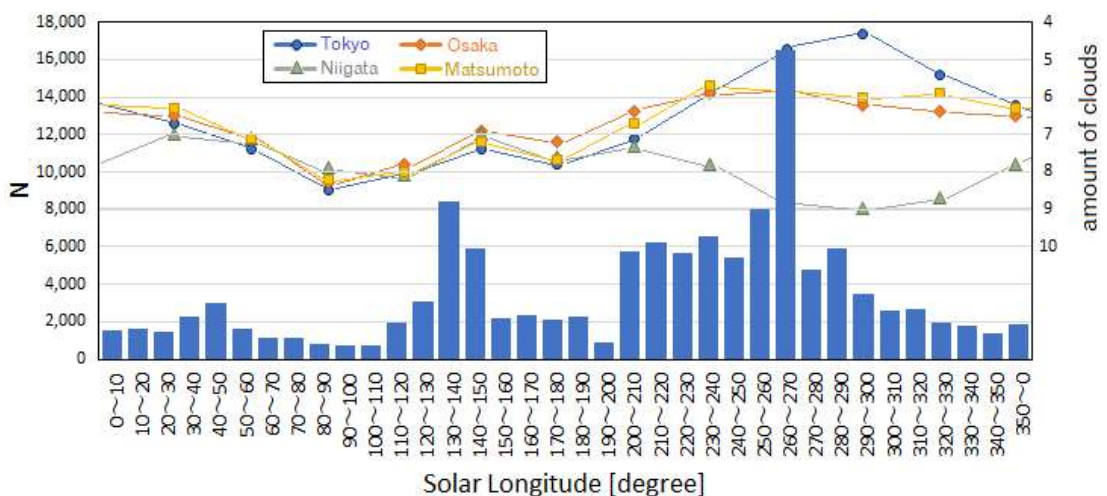


図 1 太陽黄経に対する軌道数と雲量

年 12 月の 15 年間である。このとき、流星の地心速度を求めるために大気減速を統計的な修正を行う数値  $V_{oi}=0.3\text{km/s}$  を採用した。3 点以上から撮影されている場合、全撮影データを考慮した "unified" デー

タを採用している。また、UFOOrbitV2 の軌道計算では、精度の低いデータはやや排除する設定である  $quality=Q2$  を使った。この結果、扱った全軌道数は 126,184 だった。太陽黄経  $10^\circ$  毎に得られた軌道数は図 1 に示す。図 1 には観測者が分布する東京、大阪、新潟、松本の毎月の平均雲量(日本気象協会)も併記した。太陽黄経  $70-110^\circ$ 、 $190-200^\circ$  付近は天候不良が多く、観測密度が低い。

流星群の判定のため、太陽黄経で  $10^\circ$  間隔で輻射点の分布図を 2 種類描いた。一つは赤経-赤緯、もう一つは(輻射点黄経-太陽黄経)輻射点黄緯、である。図の中で集中部分を目視で検出し、速度、及び平均軌道との差を示す D 判定式  $Dd$  を確認し、集中から外れた流星を取り除いた。こうして残った輻射点の集中部を流星群と判断した。太陽黄経で  $10^\circ$  を超えて輻射点の位置、速度が連続している場合は、それらを同一の流星群と考えた。一つの流星群に属するとした全流星の平均データを、その流星群の軌道諸元などとした。なお、平均軌道半長径は、単純平均では無く、平均の近日点距離と平均離心率から求めた。ここでは、各流星群の軌道半長径が 5[AU] を超えるものを、Halley Type もしくは長周期の流星群として、調査対象とした。その結果、調査対象流星群は、114 だった(付表 1)。この中には、IAU MDC に未登録の 3 群が含まれる。これらのうち、統計的信頼性の観点から 15 流星以上含まれる 96 流星群について、その高度を調査した。

**結果**

(1) 速度との相関

流星の発光高度が速度と強く関連することはよく知られている。本研究で得られた各流星群の地心速度に対する発光点及び消滅点高度を図 2 に示す。上は発光点、下は消滅点の流星群毎の平均高度を示す。発光点高度で (#101 PIH, #183 PAU, #187 PCA, #246 AMO, #1119 LAV) の 5 つの流星群は、他の全ての流星群より発光点高度が低い。これについては後に議論する。この 5 群を除いた相関係数は次の通り。

発光点  $H_b : 0.92$

消滅点  $H_e : 0.80$

特に発光点で強い相関がある。

直線近似式は次の通り。

$$H_b = 0.334V_g + 89.67 \text{ [km]} \quad \dots (1)$$

$$H_e = 0.333V_g + 73.85 \text{ [km]} \quad \dots (2)$$

ここで  $V_g$  は地心速度である。

(2) 平均絶対光度との相関

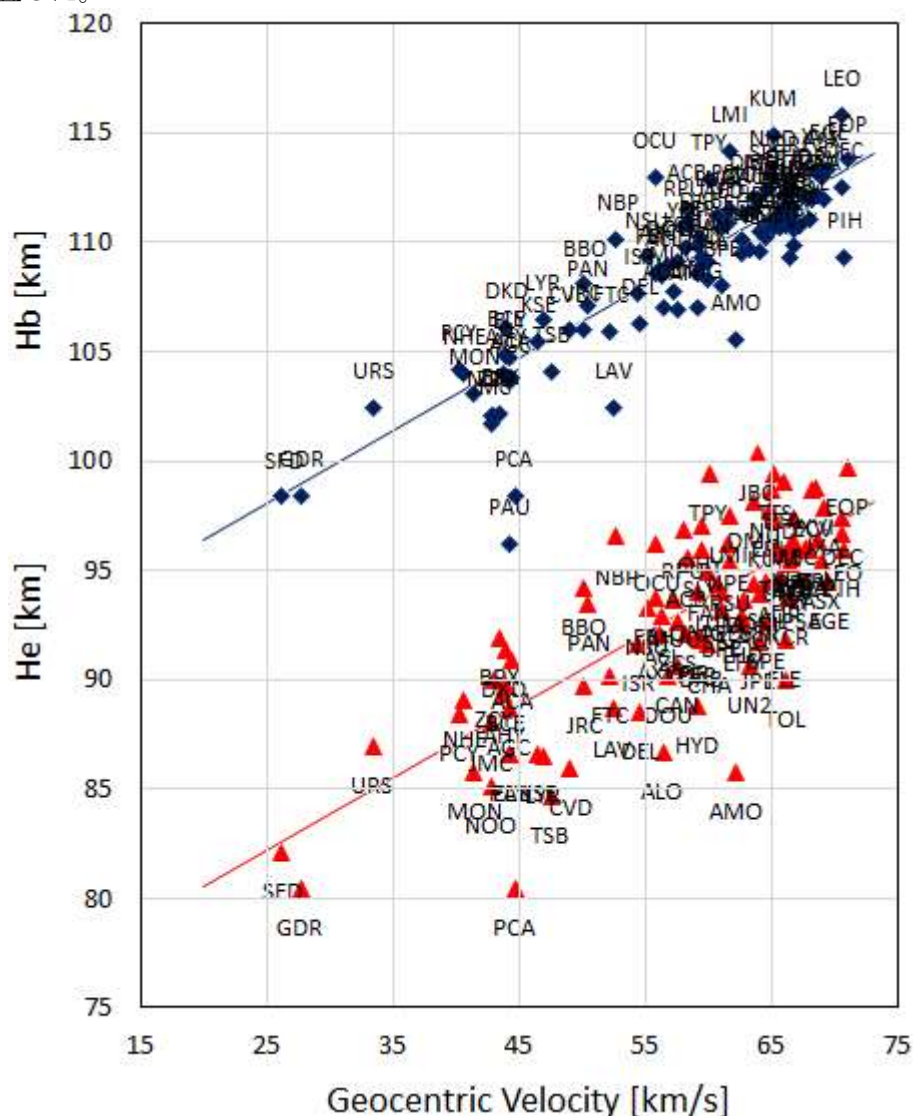


図 2 流星群の速度に対する発光高度

図2に示した各流星群の平均高度と式(1),(2)から計算される高度との差を求め、発光点と消滅点でそれぞれ $\Delta H_b, \Delta H_e$ とする。その結果を図3に平均光度に対して示した。

$$\Delta H_b = H_b - (0.334V_g + 89.67) \dots (3)$$

$$\Delta H_e = H_e - (0.333V_g + 73.85) \dots (4)$$

図3左(a)が発光点、右が消滅点高度の偏差である。特異な5群を除いた相関を調べた。その結果、それぞれ明るい流星ほど発光点が高く消滅点が低い傾向だったが、相関係数はやや低い。

$$\Delta H_b \text{ と平均光度の相関係数 : } -0.314$$

$$\Delta H_e \text{ と平均光度の相関係数 : } 0.416$$

直線近似式は次のとおり

$$\Delta H_b = -1.09 \text{ mag} - 1.58 \dots (5)$$

$$\Delta H_e = 2.57 \text{ mag} + 3.74 \dots (6)$$

ここで、mag は流星群の平均光度である。

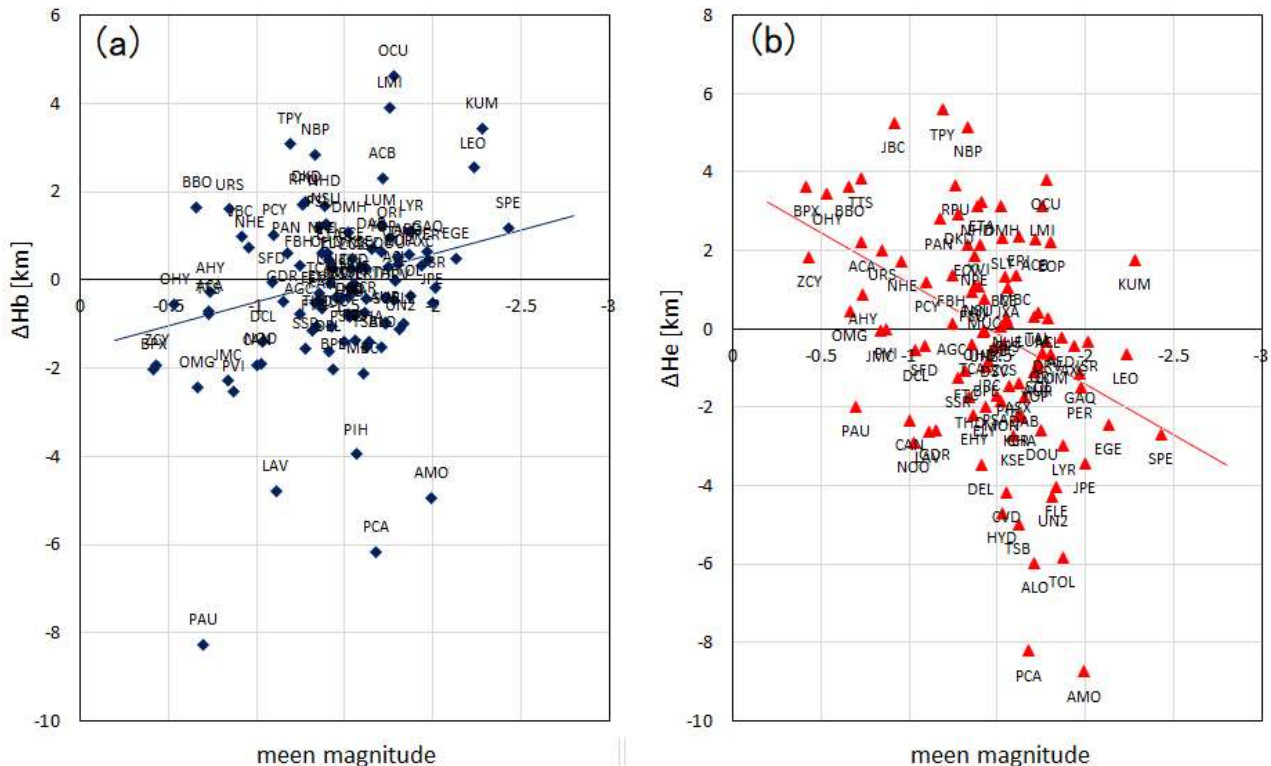


図3 流星群の平均絶対光度に対する  $\Delta H_b$  および  $\Delta H_e$

(3) 輻射点仰角（経路仰角）との相関

続いて、図3に示した $\Delta H_b, \Delta H_e$ から式(5),(6)から得られる数値(図3中の直線)との差を求めた。すなわち、さらに流星群毎の明るさの影響を除去し、 $\Delta \Delta H_b, \Delta \Delta H_e$ とした。その結果を縦軸に、流星の突入仰角(=輻射点の地上高度)に対して図4に示した。結果、突入仰角が高いほど発光点も消滅点も低い傾向が見られ、(Molau&SonotaCo 2008)を支持する結果である。ただし、負の相関係数は発光点で弱い。

$$\Delta \Delta H_b \text{ と経路仰角の相関係数 : } -0.234$$

$$\Delta \Delta H_e \text{ と経路仰角の相関係数 : } -0.609$$

直線近似式は次のとおりである

$$\Delta \Delta H_b = -0.027 E_v + 1.09 \dots (7)$$

$$\Delta \Delta H_e = -0.120 E_v + 4.86 \dots (8)$$

ここで  $E_v$  は輻射点の平均仰角である。

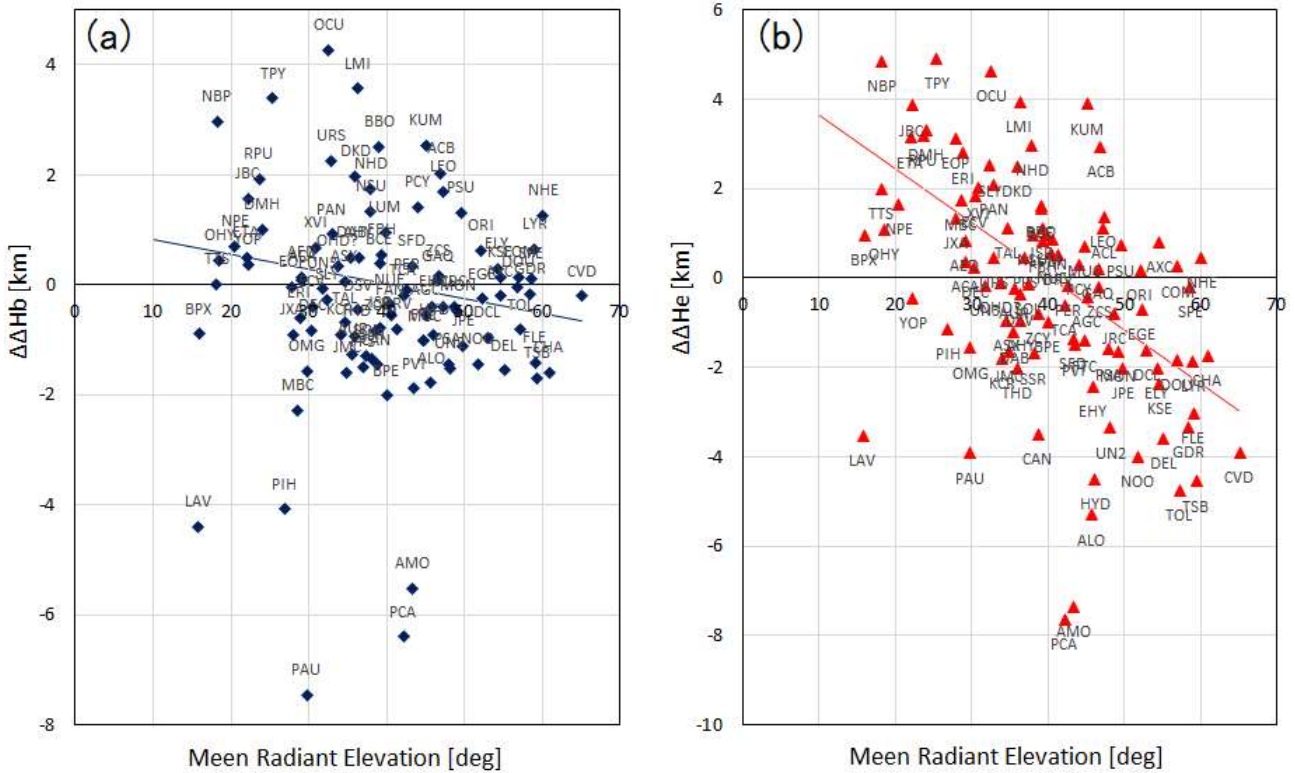


図4 流星群の突入仰角に対する  $\Delta\Delta Hb$  および  $\Delta\Delta He$

(4) 近日点距離との相関

更に、図4に示した  $\Delta\Delta Hb, \Delta\Delta He$  から、式(7),(8)で求められるは突入仰角の影響を除去し、その偏差を  $\Delta\Delta\Delta Hb, \Delta\Delta\Delta He$  と表し図5に近日点距離に対して示した。

結果は、近日点距離が小さいほど発光点、消滅点が低くなる傾向が明確にある。図5(a)において、JLEとPAUの近日点距離が小さく、発光点が低いことに注目して欲しい。相関係数は次の通り。

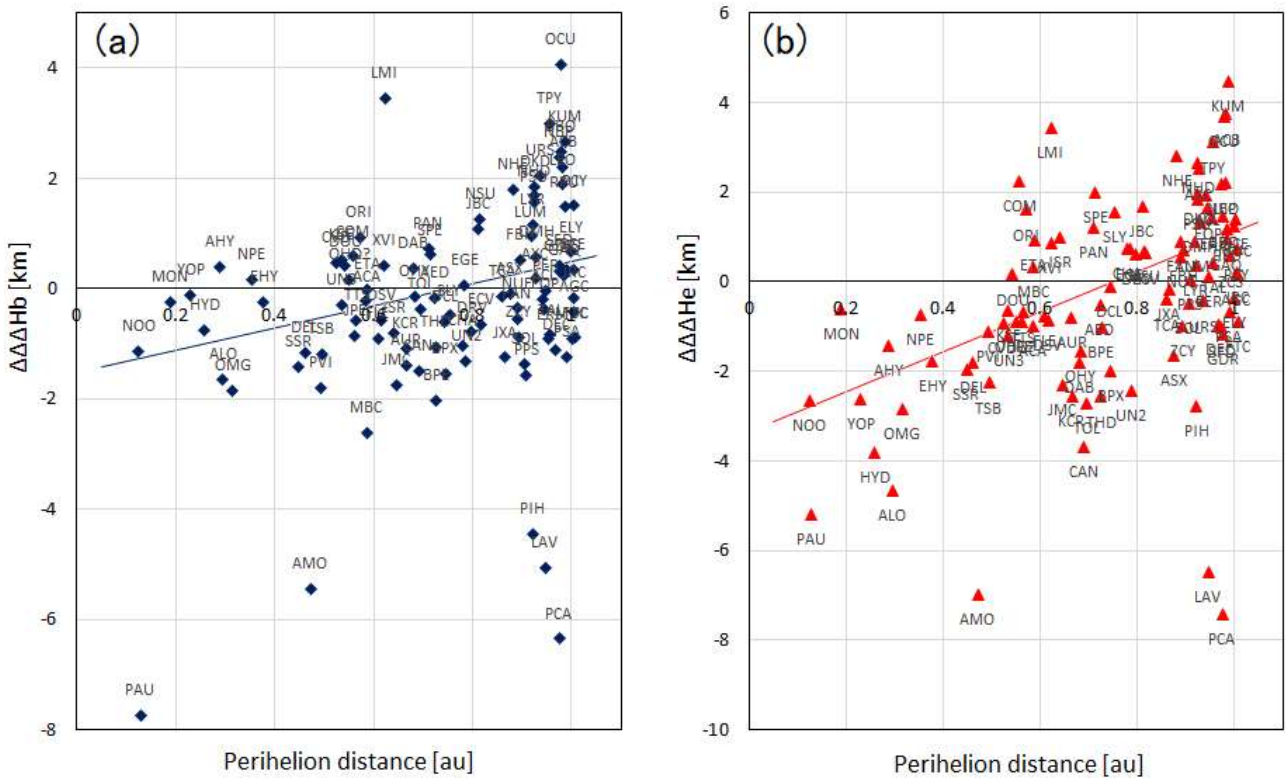


図5 流星群の近日点距離に対する  $\Delta\Delta\Delta Hb$  および  $\Delta\Delta\Delta He$

$\Delta\Delta\Delta Hb$  と近日点距離の相関係数： 0.356

$\Delta\Delta\Delta He$  と近日点距離の相関係数： 0.566

直線近似式は次の通り

$$\Delta \Delta \Delta Hb = 2.02 q - 1.51 \quad \dots (9)$$

$$\Delta \Delta \Delta He = 4.47 q - 3.36 \quad \dots (10)$$

(5) 軌道半長径の逆数 (1/a) との相関

図5に示した  $\Delta \Delta \Delta Hb, \Delta \Delta \Delta He$  から更に近日点距離の影響を式(9),(10)を使って除去し、 $\Delta \Delta \Delta \Delta Hb, \Delta \Delta \Delta \Delta He$  とした。結果を縦軸に、横軸を 1/a に図6に示した。図は、軌道の小さな流星群ほど発光点も消滅点も低い傾向があるが、負の相関係数はゼロに近く相関は無いと言うべきか。

$\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  の相関係数 : -0.027

$\Delta \Delta \Delta \Delta He$  の相関係数 : -0.079

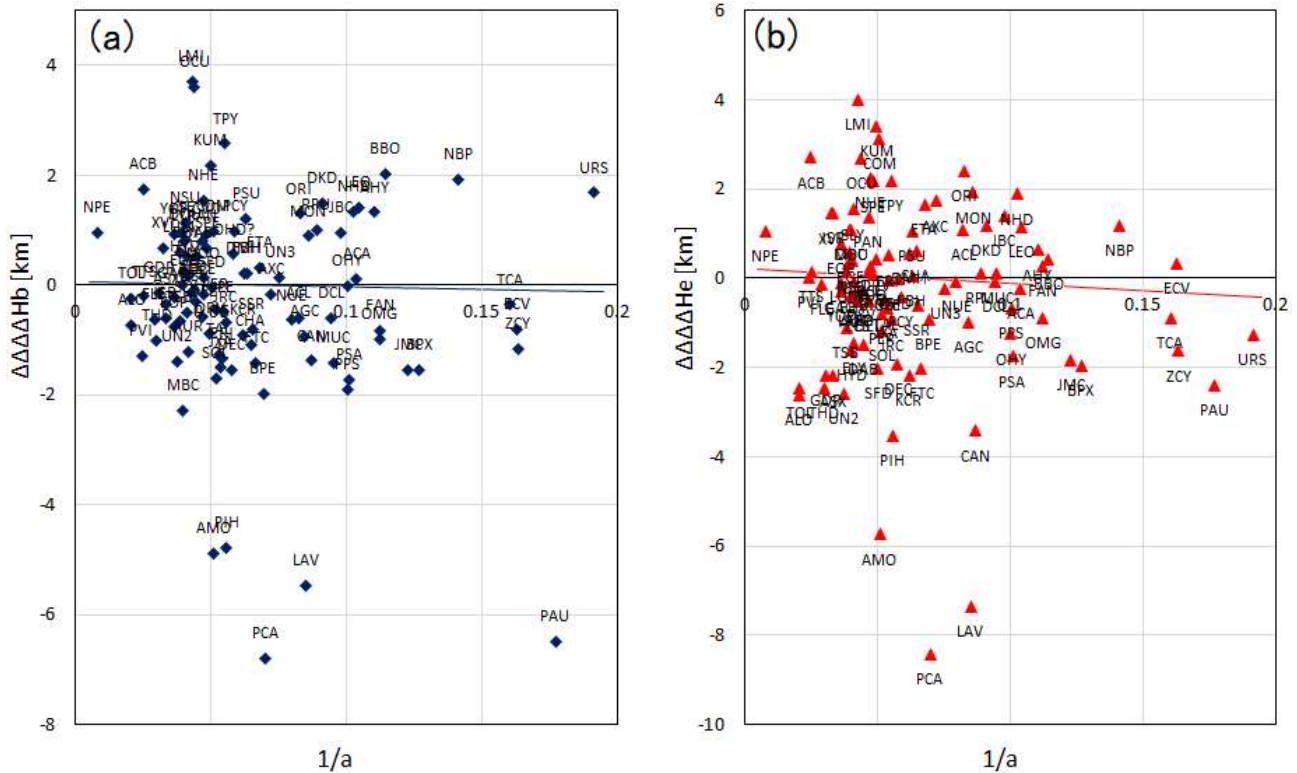


図6 流星群の 1/a に対する  $\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  および  $\Delta \Delta \Delta \Delta He$

(6) 軌道傾斜角との相関

$\Delta \Delta \Delta \Delta Hb, \Delta \Delta \Delta \Delta He$  と軌道傾斜角  $i$  との関係を図7に示した。軌道傾斜角が大きいほど発光点が低い傾向があったが消滅点はごく弱い負の相関である。

$\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  と  $i$  の相関係数 : -0.234

$\Delta \Delta \Delta \Delta He$  と  $i$  の相関係数 : 0.095

軌道傾斜角は、流星速度と強い相関がることに注意が必要である。つまり図7 (a) (b) の右端、 $i = 180$  度で有れば、 $V_g \sim 70\text{km/s}$  となる。

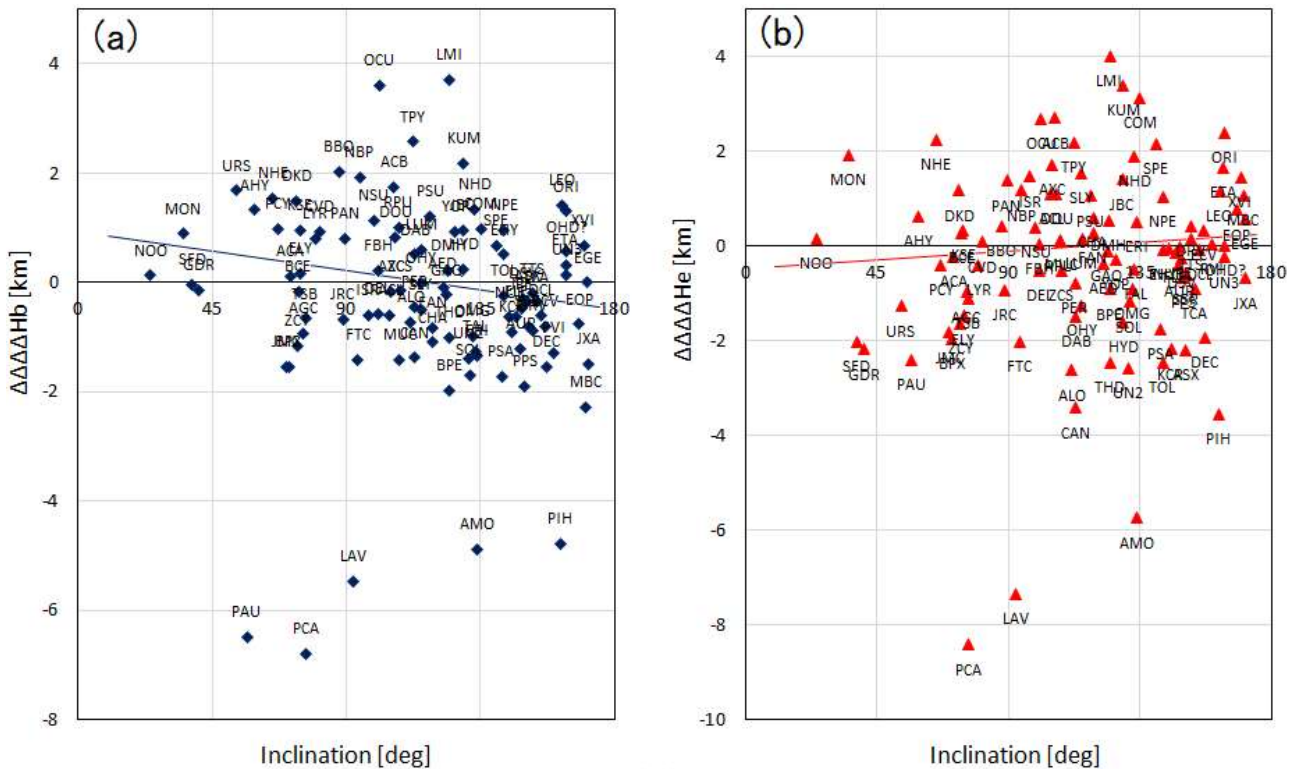


図7 流星群の軌道傾斜に対する  $\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  および  $\Delta \Delta \Delta \Delta He$

(7) 軌道進化段階との相関

流星物質が母天体から放出された後、繰り返し太陽系内を周回する間に、軌道がぼらつき、その結果輻射点は広がり活動期間は長くなるだろう。これらのうち、次の2つを軌道進化の指標と採用した。

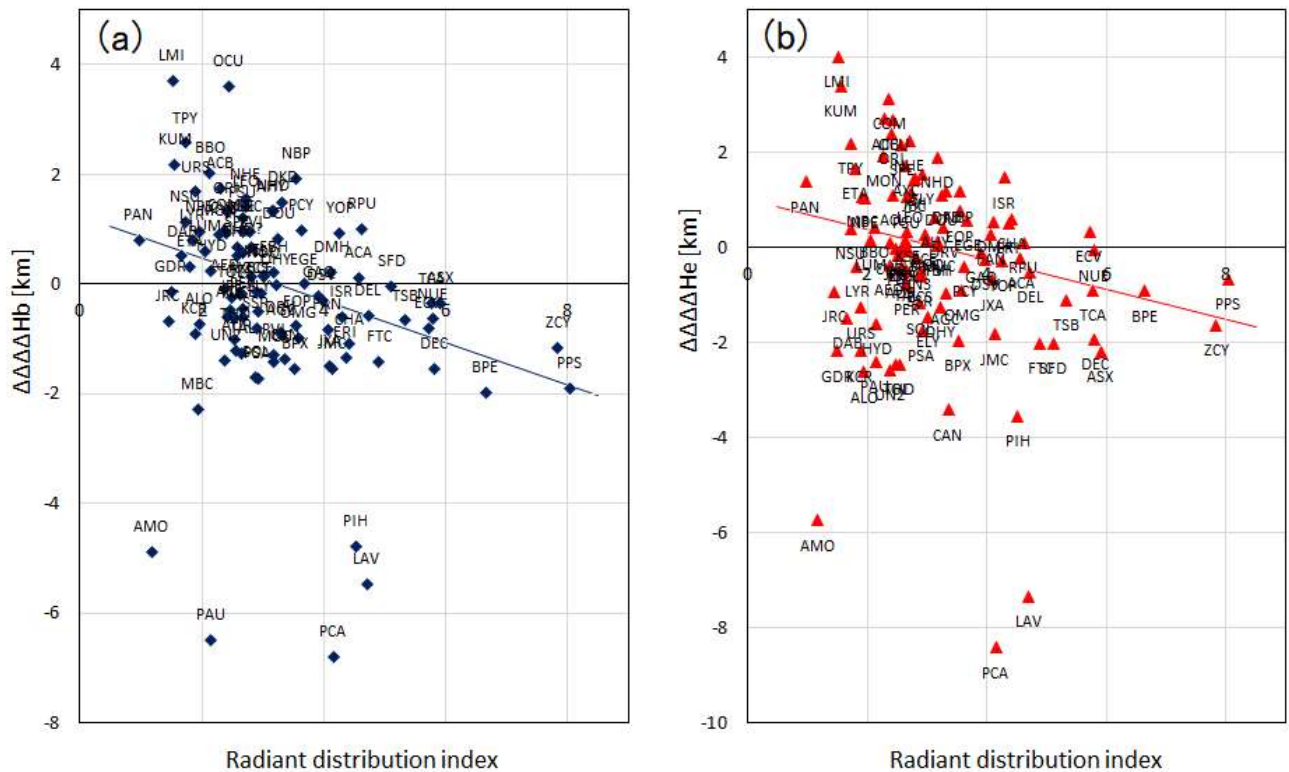


図8 流星群の輻射点拡散度に対する  $\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  および  $\Delta \Delta \Delta \Delta He$

(i) 輻射点の広がりを評価した。個々の流星の輻射点位置を輻射点黄経-太陽黄経( $\lambda - \odot, \beta$ )、輻射点黄緯の組み合わせで表し、平均位置と個々の位置との角距離を求めそれらを平均し、Lとした。Vg が遅い場合に輻射点広がって見える効果を考慮し、L と対地速度 Vg から次の値を各

流星群に対して計算した。ここでは、これを Radiant Distribution Index (RDI) として輻射点拡散度の指標とした。

$$RDI = L \log(Vg)$$

結果は図 8 に示す。図 8 ではグラフの右側の輻射点が拡散した流星群ほど、発光点も消滅点も低くなった。相関係数は次の通り。

$\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  と輻射点拡散度との相関係数 : -0.430

$\Delta \Delta \Delta \Delta He$  と輻射点拡散度との相関係数 : -0.288

(ii) 群流星と判断した全ての流星について、個々の流星の軌道と群全体の平均軌道の差を D 判定式 (Drummond 1981) で求め、その平均を求めた。結果は図 9 に示す。図 9 では右側が軌道が拡散した流星群であり、発光点も消滅点も低い傾向を示した。

$\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  と軌道拡散度との相関係数 : -0.348

$\Delta \Delta \Delta \Delta He$  と軌道拡散度との相関係数 : -0.169

結果は、輻射点拡散度と似た傾向で、流星群の軌道が拡散することで、発光点は低下する傾向がある。一方、消滅点の低下は発光点より相関は弱い。

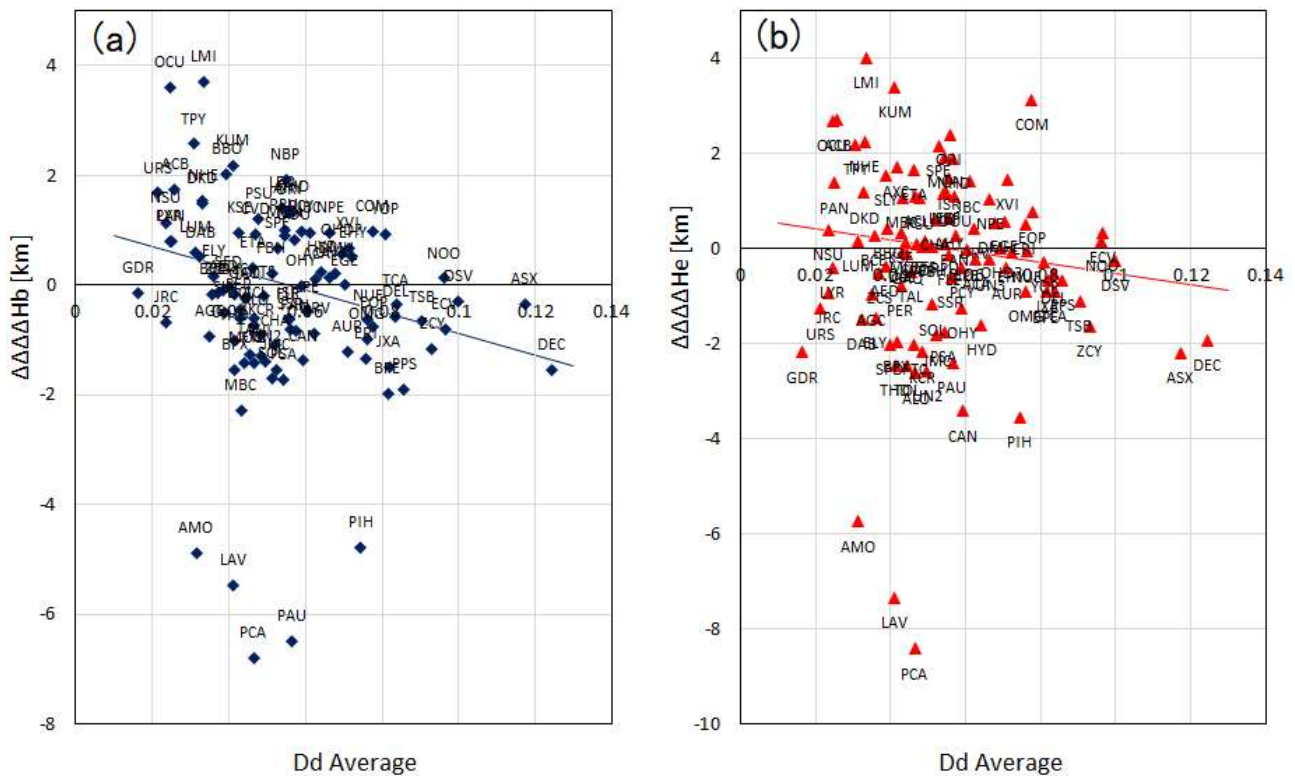


図 9 流星群の軌道拡散度に対する  $\Delta \Delta \Delta \Delta Hb$  および  $\Delta \Delta \Delta \Delta He$

(8) 太陽活動との相関

該当する時期の国立天文台による太陽黒点相対数 (Wolf Number) の年平均を使った (NAOJ 2022)。一方流星群は調査 15 年間で 1000 以上の軌道が得られた 6 流星群を使った。結果は図 10 に示す。図 10 の上部に平均発光点高度を、下部に平均消滅点高度を各年に対して示した。棒グラフが Wolf Number である。結果は明確に見えない。そこで、図 11 に Wolf number に対する発光高度を描いた。左が発光点、右が消滅点である。結果は、調査した全ての流星群に対して発光点高度は右上がり、全体として太陽活動が活発になる年に発光高度が高くなる傾向がある。唯一、Per 群はほぼ水平で相関には否定的である。一方、消滅点は一定の傾向を見出し難い。それぞれの相関係数は Table 1 に示した。

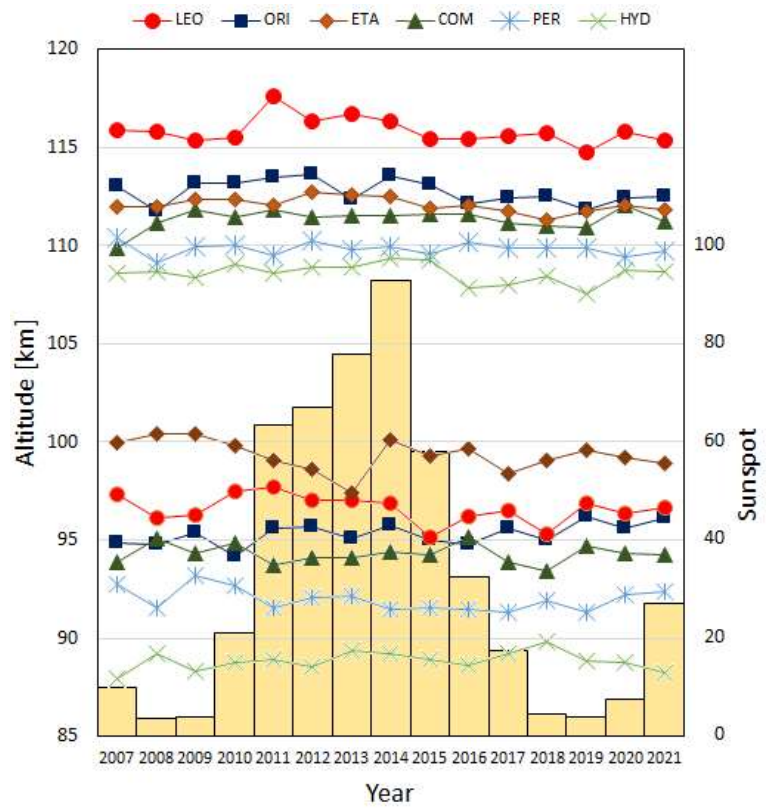


図 10 太陽活動と発光高度 (1)

Table 1 Correlation coefficient of luminous height and solar activity

shower	Vg [ km/s ]	begin	end
LEO	70.53	0.632	0.256
ORI	66.31	0.566	0.149
ETA	65.88	0.607	-0.395
COM	63.46	0.337	-0.143
PER	59.06	0.094	-0.272
HYD	59.07	0.574	0.193

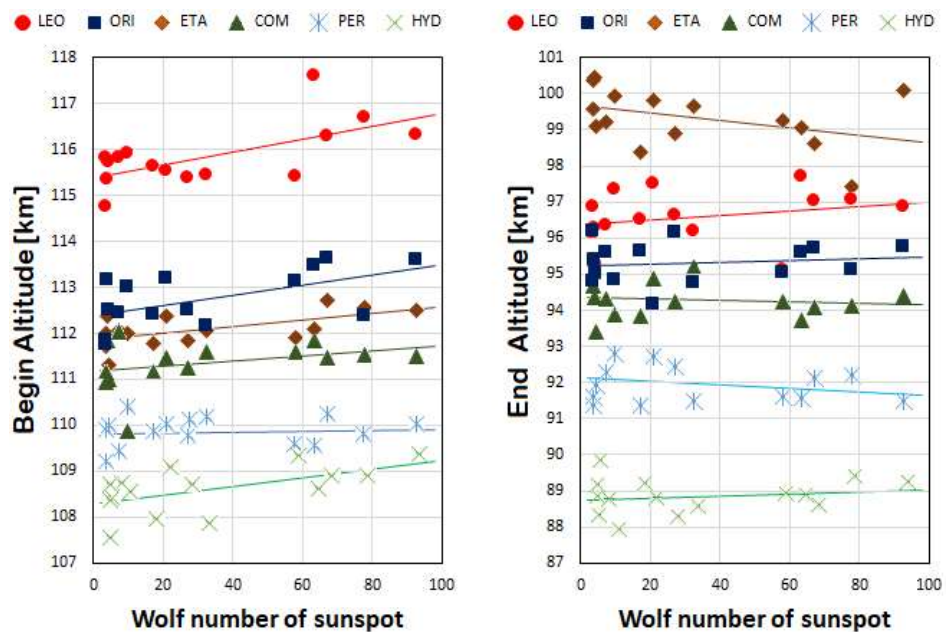


図 11 太陽活動と発光高度 (2)

## Discussion

得られた高度データの精度を損ねる理由がいくつかある。透明度が劣る空や明るい月光の下では流星経路は短く写っているだろう。撮影点が流星から遠いなら、距離効果に大気吸収も加わって、発光部、消滅部の暗い部分は撮影困難だろう。発光点や消滅点が視野外の場合や、雲や障害物の遮蔽で写らない場合は、撮影できた飛跡の範囲で発光、消滅が決定されるので、明らかに誤った位置決定である。また、SonotaCo Network における撮影カメラの選択は撮影者に一任されていて一定の観測精度水準を保証しない。より感度の高いカメラを使った観測点による発光点は高く記録されるだろうし、消滅点は低く記録されるだろう。また、レンズの焦点距離やF値によっても同様に差が生じる。UFOAnalyzerによる解析段階でも一般的な測定誤差に加え、いくつかの設定によって差が現れる。使用実感として角速度の遅い流星の特に発光点側で、モニタ上の目視では見えている光跡が、Analyserでは認識困難になりがちだ。

このように、多くの理由によって個々の流星の発光点や消滅点高度には多様な誤差が含まれる。それでも、SonotaCo Network を構成する多くの小型カメラは、長期間の使用に耐えてその活動初期から現在まで目立った劣化無く稼働している。途中で観測者やカメラの交代があっても多数の観測者によって安定的に記録された多数の軌道データは統計的なばらつきを消すだろう。ただし、統計的な誤差を懸念する場合もある。ここでは、一つの流星群に15に満たない流星数しか含まない13の流星群は調査対象から除外した。結果として、抽出できた10万を超える流星からHalley type および長周期流星群の96流星群が、統計的に、かつ定性的な議論を行うには十分な数だと考える。

さて、発光点と消滅点の高度は、複数の要因が関与することをIntroductionで説明した。得られた結果をそれらの要因と関連づけて考えてみよう。

まず、流星の対地速度と高度の関係は図2に示したとおり良好に直線近似できた。一方、散在流星の研究(Molau&SonotaCo 2008)では低速流星で直線からずれる。散在流星に含まれる25km/s以下の流星を含まないこの研究では直線近似が可能だったが、より低速での直線近似は保障しない。

図2において発光点が近似直線から下に目立ってずれた流星群が5つ(#101 PIH, #183 PAU, #187 PCA, #246 AMO, #1119 LAV)ある。他のほとんどの流星群と明確に相違するこの特徴は、違った特徴の流星物質を含むと推定する。(Cook 1970)でCeplech's Class A (小さな軌道を持つ一惑星起源)とされた流星を主とする流星群かもしれない。この中で#183 PAUは図5に示すとおり、その軌道が太陽に特に近づく上に、軌道の大きさ(a)も小さい(図6)事は注目したい。これらから、この5群のうち3群(#187 PCA, #246 AMO, #1119 LAV)は、消滅点が更に低い。この結果から、揮発物質が枯渇した流星物質が多く含まれる、もしくは固結した密度の高い流星物質であると推定する。なお、#187 PCAは資料数が少なく、Errorによる偏りかもしれない。一方、(#101 PIH, #183 PAU)の2群は、発光点は低いが消滅点は低くない。このうち(#183 PAU)は図3から暗い流星群であるが、(#101 PIH)には目立った特徴を探せない。これらの流星群の発光点は低いが消滅点は目立って低くない特徴を合理的に説明できる流星物質は、表面が固結しながらも内部が緩く結合した流星物質か、密度は高いが壊れやすい流星物質のような可能性が低いモデルだけだろうか。

反対に、発光点が目立って高い流星群が2つある(#22 LMI, #333 OCU)。これらは母天体から放出されてから太陽周回数が少ない、軌道進化の初期段階にある流星群と推定する(図8, 図9)。特に揮発しやすい成分、もしくは遊離しやすい構造が流星物質表面に存在するのだろう。

図3の光度-発光高度の関係は、明るい群ほど高い空で発光し、低くまで光り続けるという結果となった。これは、過去の観測や理論的予測どおりである。

図4の突入仰角との関係は、仰角が低い方が発光点が高い傾向がある。これは、(Molau&SonotaCo 2008)を裏付ける結果だった。低仰角の突入で大気との衝突加熱時間が長くなることで、衝突熱が蓄積されて発光高度が高くなると説明できる。消滅点も低仰角の流星ほど同様に流星体の長い加熱時間で、物質の蒸発高度が高くなったと解釈できる。これは、人工飛翔体の大気突入とは相違する結果である。Halleyタイプ、および長周期流星と、人工飛翔体とでの正反対の結果となった理由は、次の2つと推

定する。一つは対地速度の違いである。もう一つは、Ablation が起きる高度の差、つまり希薄大気領域での発光が重要になる Halley Type や長周期流星群と、連続流領域における発光が重要になる人工飛翔体の大気突入の違いである。ここでは、空気抵抗の大きさを支配する抵抗係数が希薄大気領域と連続流領域とで比べると、前者で約 2 倍大きい事(ReVelle 1976:Appendix A)に注目したい。つまり、Halley Type、長周期タイプの流星群はその主要な発光高度で、低速流星の主要発光高度とは違い 2 倍程度のブレーキが効くのである。

図 5 では、近日点距離が小さい流星群で発光点高度が低い。これは、流星体が太陽に接近することで変成作用が働いていると考える。発光点に関与する変成作用は、流星物質表面のスパッタリングを受けて剥がれやすい物質が太陽風で既に除去されること、ダストボール的軟弱流星物質の軌道からの取り除きが有力候補である。一方、消滅点高度は近日点距離が小さいほど更に低くなっている。この原因は、揮発物質の減少、流星物質の固化による機械的強度の向上、小さなサイズの流星物質の取り除き効果などが変質の候補と推定する。

図 6 では、軌道の大きさと発光点の高さでほとんど相関は見られない。しかし、軌道の小さい流星群ほど消滅点高度がわずかに低い傾向が見られる。これは、流星体が太陽から遠い所に長く存在することは流星体の固結効果が働きにくい、もしくは表面の緩く付着した物質が除去されにくい可能性がある。

図 7 の軌道傾斜角との相関は、その解釈が難解である。発光点は軌道傾斜角が大きいほど低く、消滅点は逆に高くなる。これは、軌道傾斜角の大きな流星群に、より小さな流星物質が属している可能性である。ただし、流星物質のサイズの修正は「結果」の(2)の結果から修正を終えているはずである。合理的な説明が可能な流星物質のモデルは、密度は高いが壊れやすい流星物質である。軌道傾斜角の大きな流星群は、太陽周回中に他の流星物質と衝突確率が高く、表面の緩やかに結合した物質は除去されたのかもしれない。ここで、軌道傾斜角の大きい流星群ほど速度が速いという強い相関にも注意が必要である。軌道傾斜角が大きな流星は、発光効率が良いため、小さな物質でもより明るく光り観測可能になることを示しているに過ぎないかもしれない。また、発光高度に強く影響する速度の効果は既に除去しているが、その方法が適切でなければ不正な結果を導く事にも注意しなければならない。

図 8, 図 9 では、違った方法で似た相関を得た。つまり、流星体が軌道進化するほど発光点高度が低くなる。流星物質が母天体から放出された後、太陽周回を繰り返す度に、変成作用が働くと推定できる。これは、近日点が太陽にごく近づく軌道を持つ場合と似たメカニズムの可能性が高いが、相関係数はより小さく、より弱い作用と推定する。

図 11 では、太陽活動の活発な年で 5 つの流星群で発光点高度が高くなる弱い相関が見られた。唯一、Per 群だけは過去の光学観測では写真観測に基づいた研究(Bu.cek et al 2012; Porubcan et al 2012)と同じく、相関にはネガティブな結果だった。なお、他の 5 つの流星群に対する過去の光学観測に基づく太陽活動との相関の研究結果は発見できなかった。この研究でペルセウス群に対してだけネガティブな結果となった理由は、参照した太陽の Wolf Number 年平均値が流星群の活動時期の太陽活動と差があった事が影響したのかもしれない。また、ペルセウス群は極大の前後で光度に差があることはよく知られている。活動時期によって流星物質が違えば、活動期の一部に天候の悪い時期があったとき、結果に歪みが生じるだろう。ペルセウス座流星群については、日々の太陽活動と、発光点高度を調べるなど、より詳細な研究が望まれる。また、この研究で選んだ流星群は全て  $V_g > 60\text{km/s}$  の高速流星群で、発光帯は平均で 107-118km の高度帯に該当する。このうち、130km を超える高い高度で発光する流星が含まれ、それが太陽活動と強く相関した結果が平均値に影響している可能性がある。一般的に、太陽活動と光学的な発光高度を調べるについて、より低速の流星群で調査をしたときに、熱圏下部から中間圏に該当する連続流領域での大気状態が太陽活動と関係するかどうかが見えるだろう。これらは今後の課題である。

## 結論

Halley Type および長周期流星群の TV 観測から得られた発光点、消滅点の統計的調査を行うことで、

いくつかの新たな知見を得た。この観測領域は、高さでは熱圏下部から中間圏で、流星物質のサイズでは写真観測より小さく、電波観測より大きな流星物質を対象とした領域であり、流星の速度では主として高速の流星を取り上げた研究である。

まず、流星群の地心速度と発光高度との間には、明確な相関を示す直線関係が見られた。ただし、この関係から外れる5つの特異的に低い発光帯の流星群も認められた。これは、他の彗星起源の流星群と違った流星物質の特徴があると推定する。

上記5群を除く一般的な流星群は、明るい流星、すなわち、大きな流星物質ほど希薄な大気で発光を始め、より低空まで達するという予想どおりの結果となった。一方、落下弾道の傾斜角が低い場合、大気との衝突できる時間が引き延ばされ、**ablation** は高度に対してより早く進行している。これは、低速で大気に突入させる人工飛行体の再突入のような、ごく低速の物体の落下現象とは逆である。発光高度に与える近日点距離の効果と、流星群の軌道進化の効果は共通の傾向を示し、共通の原因を強く示唆する。つまり、流星物質が流星群の進化や太陽との位置関係によって変成するという統計的証拠と考える。すなわち、流星物質が母天体から放出された後、繰り返し太陽に接近することで、変性効果を起こす何らかの作用が働いている。考えられる作用は次のいずれか、もしくは複数だろう。(1)流星物質に含まれる揮発分子、原子を取り除いている。(2)流星物質の固結強化を促している。(3)流星物質の表面にある物理的に弱く結合した物質を取り除いている。(4)太陽との接近で **dust ball** のような軟弱な、もしくは小さな流星物質をその軌道から取り除いている。これらの効果は、流星物質が太陽に強く接近することで強く作用する。

太陽活動が活発な時期には、ペルセウス群を除く高速流星群で発光高度が高くなっていた。これは、これまで電波観測で見いだされた結果と整合する。つまり、太陽活動が活発な時期にこれらの流星が発光する高度帯では大気密度が上昇している。

## 謝辞

この研究は SootaCo Network によって取得されたデータを使い、SonotaCo 氏を中心に開発されたソフトウェア、ネットワークに依存して実行したものです。長きにわたり、多くのアマチュア観測者が、多大な時間、労力を傾けて作り上げた知的資源の活用の結果です。皆様の貢献に深く感謝します。最後に、SonotaCo Net の初期から観測報告を続けられた室石英明氏の訃報に接し驚き、残念に思いますと共にお悔やみ申し上げます。

## References

- Batubara,M., Yamamoto,M.-Y., Madkour,W., Manik,T., 2018,"*Long-term distribution of meteors in a solar cycle period observed by VHF meteor radars at near-equatorial latitudes*", J. of Geophys.Res.: Space Phys., 123,
- Bucek,M., Porubcan,V., Zigo,P., 2012, "*Solar activity and Perseid meteor heights*", Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 42, pp.22-32,
- Campbell,M.D., Brown,P.G., Leblanc,A.G., Hawks,R.L., Jones,J., Worden,S.P., Correll,R.R., 2000, "*Image-intensified video results from the 1998 Leonid shower: I. Atmospheric trajectories and physical structure*", Meteoritics & Planetary Sci. 35, p.1259-1267
- Campbell-Brown,M.D., 2019, "*Solar cycle variation in radar meteor rates*", MNRAS 485, p.4446-4453
- Cook,A.F., 1970,"*Discrete levels of Beginning height of meteors in streams*", SAO Special Report #324
- Drummond J. D.,1981, "*A test of comet and meteor shower associations*". Icarus, 45, 545-553.
- Fujiwara,Y., Ueda, M.,Shiba,Y., Sugimoto,M., Kinoshita,M., Shimoda,C., 1998,"*Meteor luminosity at 160km altitude from TV observations for bright Leonid meteors*", Geophys.Res.Lett.,Vol.25,No.3,p.285-288
- Japan Meteorological Agency,2022,<https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
- Koten,P., Spurny,P., Borovicka,J., Evans,S., Elliott,A., Betlem,H., Tork,R., Jobse,K.,2006, "*The beginning*

- heights and light curves of high-altitude meteors*", Meteoritics & Planetary Science 41, Nr 9, pp.1305-1320
- Lee,W., Lee.C., Kim,J.-H., Kam,K., Kim.Y.H., 2021,"*A Modeling analysis of the apparent linear relation between mesospheric temperatures and meteor height distributions measured by a meteor radar*", J. of Geophys. Res. Space Phys., 127
- Li,G., Ning,B., Wan,W., Reid,I.M., Hu,L., Yue,X., Younger,J.P., Dolman,B.K.,"*Observational evidence of high-altitude meteor trail from radar interferometer*",Geophysical Res. Lett. Vol.41, Issue19,p.6583-6589
- Molau,S., SonotaCo, 2008, "*On the average altitude of (video) meteors*" , WGN, Journal of the IMO, **36:6**, 124-128.
- Porubcan,V., Bu .cek,M. Cevolani,G., Zigo,P., 2012, "*Variation of Meteor Heights and Solar-Cycle Activity*", Publ. Astron. Soc. Japan 64, 86,
- Premkumar,B, Chenna Reddy,K. Yellaiah,G. ,2018, "*Variation of the meteor count rate and echo height during solar cycle 23 and 24*",Proceedings IAU Symposium No. 340,
- ReVelle,D.O.,1976, "*A quasi-simple ablation model for large meteorite entry: theory vs observations*", J. atmospheric and terrestrial physics, Vol.41,pp.453-473
- Roggemans,P., "*Variation in heights of CAMS meteor trajectories*",eMeteorNews, 2017-3
- Sarma,T., Jones,J., 1985, "*Double-station observations of 454 TV meteors*", Bull. Astron. Inst. Czechosl.36, 9-24
- Solar Science Observartory, NAOJ Mitaka, 2022,  
[https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/activity/activity\\_backnumber.html](https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/activity/activity_backnumber.html)
- Spruny,P., Betlem,H., Leven,J.V., Jenniskens,P., 2014a, "*Atmospheric behavior and extreme beginning heights of thirteen bright photographic Leonid meteor from the ground-based expedition to China*", Meteoritics & Planetry Sci., 35,243-249
- Spurny,P., Shrbeny,L., Borovi.cka,J., Koten,P., Voja.cek,V., Stork,R.,2014b, "*Bright Perseid fireball with exceptional beginning height of 170 km observed by different techniques*", Astronomy & Astrophys. Vol.563, id.A64, 6 pp.
- SonotaCo, 2009. "*A meteor shower catalog based on video observations in 2007,.2008*", WGN, Journal of the IMO, **37:2**, 55-62.
- Vinkovic D., 2007, "*Thermalization of sputtered particles as the source of diffuse radiation from high altitude meteors*",Advances in Space Res. 39:574-582
- Ward,B. 2016, <http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=3630>

付表1 流星群諸元

No.	Meteor Shower Name	Code	Activity	S. Lon	S.L.Beg	S.L.end	RA	DE	dRA	dDE	Vg	dVg	a	q	e	P	Peri	Node	Incl	N	mag	H1	H2	Ev	RDI	Av_Dd
				[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[km/s]	[km/s]	[AU]	[AU]	[yr]	[yr]	[deg]	[deg]	[deg]			[km]	[km]	[deg]		
6	April Lyrids	LYR	annual	32.18	29	35	272.2	33.4	0.78	-0.21	46.8	0.17	25.1	0.921	0.963	125.4	214.0	32.2	79.7	601	-1.9	106.4	86.5	59.0	1.84	0.025
7	Perseids	PER	annual	138.06	119	152	45.5	57.5	1.45	0.21	59.1	0.04	19.3	0.949	0.951	85.1	150.6	138.1	112.9	8862	-2.0	109.9	92.0	42.6	2.67	0.043
8	Orionids	ORI	annual	210.17	198	226	97.0	15.7	0.80	0.03	66.3	-0.06	12.1	0.572	0.953	41.9	82.7	30.2	164.0	3909	-1.8	112.8	95.3	52.1	2.41	0.056
13	Leonids	LEO	annual	236.57	217	259	154.6	21.4	0.64	-0.40	70.5	0.03	9.6	0.983	0.897	29.6	173.5	236.6	162.4	1507	-2.2	115.8	96.7	47.3	2.73	0.054
15	Ursids	URS	annual	269.74	266	272	217.4	75.7	1.62	-0.33	33.4	-0.12	5.2	0.937	0.820	11.9	206.5	269.7	53.2	281	-0.8	102.4	87.0	32.9	1.89	0.021
16	sigma Hydrids	HYD	annual	256.71	237	280	125.8	2.3	0.85	-0.27	59.1	-0.04	24.9	0.258	0.990	124.2	119.0	76.7	129.2	1898	-1.5	108.6	88.8	46.1	2.15	0.064
19	December Monocerotids	MON	annual	258.99	247	269	101.0	8.1	0.67	-0.13	41.4	-0.18	11.6	0.189	0.984	39.7	129.1	79.0	35.3	606	-1.5	103.1	85.8	49.1	2.28	0.054
20	Comae Berenitids	COM	annual	273.15	248	324	165.8	28.4	0.87	-0.43	63.5	0.00	19.7	0.558	0.972	87.3	263.1	273.2	135.1	1259	-1.8	111.4	94.3	57.0	2.37	0.077
22	Leonis Minorids	LMI	annual	209.98	204	216	160.9	36.6	1.10	-0.33	61.6	-0.05	23.3	0.623	0.973	112.6	104.0	210.0	124.8	162	-1.8	114.2	97.5	36.3	1.52	0.034
23	epsilon Gemnids	EGE	annual	207.05	196	218	102.9	27.7	0.83	-0.14	69.4	-0.03	25.2	0.784	0.969	126.5	235.1	207.1	171.0	137	-2.1	113.4	94.5	52.2	3.67	0.070
27	kappa Serpentids	KSE	annual	24.57	21	27	247.0	18.2	0.74	-0.14	46.4	-0.10	25.5	0.534	0.979	129.1	266.8	24.6	74.4	21	-1.6	105.5	86.6	54.6	2.67	0.043
31	eta Aquarids	ETA	annual	46.55	38	63	338.5	-0.6	0.68	0.34	65.9	0.04	14.7	0.588	0.960	56.4	98.5	46.7	163.6	1519	-1.4	112.1	99.0	22.0	1.81	0.046
40	zeta Cygnids	ZCY	annual	23.98	3	45	306.3	42.3	0.92	0.11	43.0	0.00	6.1	0.893	0.854	15.1	140.4	24.0	73.4	145	-0.4	102.1	89.99	38.7	7.83	0.098
81	September Lyncids	SLY	annual	169.05	164	175	111.4	55.7	1.69	0.01	59.4	-0.13	24.4	0.754	0.989	120.2	119.4	169.1	115.1	48	-1.5	109.3	95.9	32.4	2.93	0.039
89	January pi Virginids	PVI	annual	290.20	285	296	177.3	11.0	1.02	-0.31	66.3	0.01	41.1	0.493	0.988	263.4	270.2	290.2	159.7	18	-0.9	109.3	95.7	43.5	3.18	0.048
101	pi Hydrids	PIH	annual	315.91	303	328	211.2	-23.5	0.98	-0.38	70.6	-0.01	18.0	0.922	0.949	76.1	29.4	135.9	161.9	72	-1.6	112.7	97.4	26.8	4.52	0.059
145	eta Lyrids	ELY	annual	49.33	46	54	290.8	43.5	0.33	0.14	44.2	-0.02	24.2	1.000	0.959	118.8	190.8	49.3	74.7	100	-1.4	104.7	86.6	54.2	3.03	0.036
175	July Pegasids	JPE	annual	114.40	104	128	352.7	12.6	0.84	0.30	64.0	-0.06	18.4	0.562	0.969	78.6	264.8	114.4	148.8	113	-2.0	110.5	91.7	49.8	2.47	0.061
183	Piscis Austrimids	PAU	annual	134.77	129	140	352.6	-20.9	0.88	0.32	44.3	-0.03	5.6	0.129	0.977	13.4	140.1	314.8	56.7	33	-0.7	96.2	86.6	29.8	2.15	0.057
184	July gamma Draconids	GDR	annual	125.17	123	127	280.6	50.7	-0.19	-0.04	27.7	-0.15	32.4	0.977	0.970	184.8	202.6	125.2	40.6	47	-1.2	98.4	80.5	58.4	1.50	0.016
187	psi Cassiopeids	PCA	annual	115.87	108	122	356.2	71.1	1.57	0.28	44.6	0.18	14.3	0.976	0.982	53.9	156.8	115.9	76.5	15	-1.7	101.9	86.7	42.1	4.16	0.046
190	beta Perseids	BPE	annual	129.67	117	143	54.1	48.0	1.42	0.17	60.9	0.03	14.4	0.726	0.950	54.7	114.7	129.7	124.7	83	-1.4	108.0	93.2	40.0	6.65	0.082
191	eta Eridanids	ERI	annual	138.57	114	158	45.2	-10.8	0.90	0.39	64.8	0.04	18.5	0.954	0.948	79.5	27.9	318.6	134.0	351	-1.6	110.9	97.8	28.9	4.37	0.076
206	Aurigids	AUR	annual	154.87	135	171	87.1	38.8	1.13	0.12	65.6	0.02	24.2	0.665	0.972	118.8	107.9	154.9	148.4	107	-1.7	110.6	94.7	35.6	2.56	0.071
208	September epsilon Perseids	SPE	annual	170.36	163	198	51.7	39.5	1.19	0.05	64.6	0.03	20.7	0.714	0.965	94.0	245.9	170.4	140.4	299	-2.4	112.4	92.7	58.6	2.57	0.053
245	November Hydrids	NHD	annual	223.14	213	235	119.7	-6.7	0.91	-0.07	65.0	0.06	9.7	0.925	0.905	30.4	30.6	43.1	133.1	47	-1.4	113.1	98.6	37.9	3.17	0.057
246	alpha Monocerotids	AMO	annual	240.93	237	247	118.5	0.7	0.98	-0.15	62.1	0.02	19.6	0.472	0.976	87.0	93.3	60.9	134.0	40	-2.0	105.5	85.8	43.4	1.18	0.031
250	November Orionids	NOO	annual	248.69	232	267	91.8	15.2	0.75	-0.05	42.7	-0.15	21.2	0.124	0.994	97.6	139.2	68.7	24.1	480	-1.0	102.0	85.2	51.7	3.00	0.096
281	October Camelopardalids	OCT	annual	192.48	191	193	173.5	77.6			45.5		29.1	0.986	0.966	157.3	166.4	192.5	76.8	5	-1.0	105.9	93.5	26.0	3.51	0.035
319	January Leonids	JLE	annual	282.24	281	284	147.8	23.7	0.69	-0.16	52.7	-0.12	7.4	0.051	0.993	20.2	334.6	282.2	106.8	14	-0.8	97.6	84.9	48.6	1.77	0.044
320	omega Serpentids	OSE	集計せず										存在不確か													
331	alpha Hydrids	AHY	annual	282.17	273	294	126.0	-8.1	0.67	-0.16	43.8	-0.08	9.1	0.288	0.968	27.3	116.0	102.2	59.3	191	-0.7	104.0	89.3	36.4	3.14	0.056
333	October Ursae Majorids	OCU	annual	202.61	201.1	204.6	145.6	64.1	1.14	-0.94	55.8	0.28	22.8	0.979	0.957	108.9	164.5	202.6	101.1	70	-1.8	112.9	96.2	32.5	2.43	0.025
335	December chi Virginids	XVI	annual	261.32	248	275	190.3	-9.9	0.68	-0.36	68.5	0.07	30.8	0.622	0.980	171.1	284.9	81.3	169.6	129	-1.4	113.2	98.8	30.9	2.81	0.071
336	December kappa Draconids	DKD	annual	251.92	247	258	185.9	70.4	0.72	-0.46	43.8	0.06	11.0	0.925	0.916	36.4	209.3	251.9	73.1	171	-1.3	106.1	91.4	35.9	3.52	0.033
337	nu Eridanids	NUE	annual	171.66	160	187	71.0	2.3	0.78	0.35	66.5	0.06	12.5	0.891	0.929	44.4	40.0	351.7	144.8	139	-1.6	111.7	96.3	40.4	5.79	0.076
339	psi Ursae Majorids	PSU	annual	253.02	245	258	170.0	43.3	1.15	-0.55	61.6	0.09	15.9	0.924	0.942	63.2	209.1	253.0	118.0	81	-1.4	111.5	95.3	49.6	2.66	0.048
340	theta Pyxidids	TPY	annual	249.51	247	252	138.6	-25.7	1.31	-0.13	60.0	0.23	18.1	0.956	0.947	77.0	20.2	69.5	112.3	49	-1.2	112.8	99.42	25.3	1.72	0.031
362	June mu Cassiopeids	JMC	annual	74.13	71	75	9.9	55.5	1.19	0.72	42.7	-0.29	8.14	0.646	0.921	23.2	104.0	74.1	69.7	15	-0.8	101.7	88.0	34.9	4.13	0.052
372	phi Piscids	PPS	annual	111.47	76	138	24.5	27.9	0.42	66.8	0.00	10.0	0.909	0.909	31.4	142.7	111.5	149.8	358	-1.6	110.6	96.3	37.0	8.03	0.086	

付表1 流星群諸元 (続き1)

No.	Meteor Shower Name	Code	Activity	S. Lon	S.L.Beg	S.L.end	RA	DE	dRA	dVE	Vg	dVg	a	q	e	P	Peri	Node	Incl	N	mag	H1	H2	Ev	RDI	Av_Dd
				[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[km/s]	[km/s]	[AU]	[AU]		[yr]	[deg]	[deg]	[deg]			[km]	[km]	[deg]		
394	alpha Canis Majorids	ACA	annual	239.50	230	250	95.6	-19.9	0.67	0.15	44.4	-0.01	9.63	0.585	0.939	29.9	80.9	59.5	71.1	52	-0.7	103.8	90.8	29.1	4.57	0.063
410	delta Piscids	DPI	annual	93.52	90	97	12.5	5.4	0.93	0.19	69.6	-0.13	16.1	0.919	0.943	64.9	144.0	93.5	179.9	9	-0.7	110.9	99.0	24.0	3.44	0.050
411	c Andromedids	CAN	annual	107.18	93	118	29.5	47.3	1.20	0.35	57.4	-0.01	11.5	0.691	0.940	38.9	109.8	107.2	113.0	106	-1.0	106.9	90.6	38.7	3.36	0.059
424	September-October Lyncids	SOL	annual	179.59	170	190	107.9	49.8	1.44	-0.11	64.5	-0.03	19.3	0.906	0.953	84.8	143.3	179.6	131.4	36	-1.7	110.3	94.5	37.4	2.88	0.051
425	psi Aurigids	PSA	annual	199.42	186	213	119.1	42.8	1.28	-0.29	67.2	0.04	9.90	0.991	0.900	31.1	171.0	199.4	142.2	28	-1.5	110.7	94.5	47.9	2.91	0.054
427	February eta Draconids	FED	annual	314.55	314	315.5	240.3	62.1	-0.73	-0.36	34.8	0.36	15.9	0.971	0.939	63.1	193.9	314.5	54.7	9	-1.4	104.4	89.3	49.4	1.87	0.032
428	December sigma Virginids	DSV	annual	271.14	245	299	208.1	4.5	0.68	-0.13	66.5	-0.18	22.7	0.617	0.973	107.9	104.1	271.1	149.4	309	-1.5	111.5	95.5	36.3	3.98	0.100
429	alpha Coronae Borealis	ACB	annual	308.87	307	312	232.5	26.8	1.55	-0.65	58.3	0.06	39.9	0.982	0.975	252.3	175.4	308.9	106.0	16	-1.7	112.3	94.8	46.9	2.30	0.026
431	June iota Pegasids	JIP	annual	93.73	93.4	95.1	331.5	29.2	1.02	0.03	59.1	0.33	180	0.903	0.995	2408	219.1	93.7	112.7	13	-2.7	112.2	89.4	48.6	0.78	0.020
432	nu Bootids	NBO	集計せず										存在不確か													
439	alpha Sextantids	ASX	annual	227.39	200	250	146.3	-3.9	0.77	-0.21	68.9	0.06	29.9	0.876	0.971	163.3	320.7	47.4	150.8	158	-1.6	113.0	95.4	34.6	5.90	0.117
443	December Leonids	DCL	annual	265.10	262	270	164.3	20.5	1.09	-0.34	68.0	-0.04	10.6	0.744	0.930	34.5	240.4	265.1	155.5	25	-1.0	111.0	95.9	52.9	2.66	0.043
444	zeta Cassiopeids	ZCS	annual	114.29	106	119	9.1	51.1	1.71	0.30	57.5	0.08	23.5	0.992	0.958	113.8	162.3	114.3	108.1	133	-1.5	109.1	92.6	46.7	2.89	0.037
445	kappa Ursae Majorids	KUM	annual	225.12	221	235	146.9	44.9	1.25	-0.25	65.1	-0.04	20.1	0.987	0.951	89.9	186.9	225.1	129.4	116	-2.3	114.9	97.3	45.1	1.56	0.041
450	April epsilon Delphinids	AED	annual	20.08	14	30	307.8	11.5	0.93	0.35	61.0	-0.06	23.0	0.723	0.969	110.2	115.8	20.1	122.5	43	-1.9	110.7	94.0	29.1	2.38	0.039
458	June epsilon Cygnids	JEC	annual	82.51	81.8	83.5	315.1	33.6	1.98	0.29	53.3	0.42	10.4	0.922	0.991	106.7	215.4	82.5	95.9	13	-1.7	108.7	92.7	53.0	1.14	0.017
465	August xi Cassiopeids	AXC	annual	134.03	131	137	4.0	49.3	0.86	0.36	56.0	0.05	13.9	0.927	0.933	51.7	214.5	134.0	105.0	29	-1.9	108.7	92.1	54.5	2.65	0.042
480	tau Cancrids	TCA	annual	211.48	196	223	141.5	30.0	0.97	0.07	67.7	-0.01	6.22	0.861	0.862	15.5	135.6	211.5	153.8	128	-1.4	112.0	96.0	42.2	5.77	0.084
488	November sigma Ursae Majorids	NSU	annual	242.55	239.6	245.1	149.6	59.1	1.25	-0.27	55.1	-0.09	24.7	0.814	0.967	122.7	229.9	242.6	99.3	29	-1.4	109.3	93.3	38.0	1.72	0.023
493	December epsilon Craterids	DEC	annual	279.20	260	315	186.4	-17.0	0.82	-0.32	70.6	0.02	17.4	0.968	0.944	72.6	349.0	99.2	157.1	205	-1.5	112.5	97.4	30.4	5.81	0.124
494	December Lyncids	DEL	annual	245.53	231	260	125.8	51.3	0.92	-0.15	54.5	-0.13	21.4	0.462	0.978	98.7	274.4	245.5	100.7	58	-1.4	106.3	88.5	55.1	4.73	0.084
497	December alpha Bootids	DAB	annual	263.49	261.7	267	212.5	22.2	0.94	-0.31	59.3	0.05	22.4	0.680	0.970	105.7	111.8	263.5	113.0	34	-1.7	110.2	91.8	35.4	1.66	0.032
498	December nu Hydrids	DMH	annual	271.78	261	288	159.0	-26.0	0.98	-0.22	63.6	0.09	16.1	0.929	0.942	64.5	27.5	91.8	124.2	117	-1.5	112.0	98.1	24.0	4.12	0.068
502	December rho Virginids	DRV	annual	256.66	246	269	188.4	12.5	0.91	-0.15	68.6	-0.04	20.2	0.798	0.960	90.8	127.8	256.7	152.4	85	-1.8	112.1	96.3	41.3	3.28	0.062
510	June rho Cygnids	JRC	annual	84.94	83.4	85.3	321.4	44.3	0.70	0.36	50.1	-0.03	18.1	1.006	0.944	76.7	191.2	84.9	88.9	17	-1.5	106.0	89.7	48.7	1.45	0.024
512	rho Puppids	RPU	annual	228.02	219	237	127.1	-25.5	1.19	-0.18	58.0	0.09	11.2	0.987	0.912	37.7	0.9	48.0	107.4	61	-1.2	110.7	97.0	23.6	4.62	0.054
517	April lambda Ophiuchids	ALO	annual	15.45	12	21	244.6	1.1	1.00	-0.08	56.4	0.03	48.7	0.295	0.994	340.3	294.6	15.4	111.7	33	-1.7	107.0	86.7	45.7	1.95	0.047
520	May beta Capricornids	MBC	annual	55.32	49	62	302.5	-15.5	0.76	0.09	66.7	0.01	25.2	0.586	0.977	126.2	261.4	55.3	170.6	17	-1.6	109.8	97.4	28.6	1.93	0.043
523	August gamma Cepheids	AGC	annual	155.38	151	160	357.2	76.7	1.07	0.07	44.1	0.13	11.8	1.005	0.915	40.7	187.8	155.4	75.6	46	-1.2	103.7	88.7	45.1	3.31	0.035
524	lambda Ursae Majorids	LUM	annual	215.45	212.4	218.3	158.7	49.2	0.93	-0.41	60.7	0.06	26.1	0.918	0.965	133.6	147.8	215.4	115.2	30	-1.7	111.2	94.4	39.8	2.06	0.031
528	January zeta Draconids	JZD	集計せず										存在不確か													
529	eta Hydrids	EHY	annual	260.42	245	276	135.8	1.4	0.84	-0.21	62.7	-0.03	24.4	0.377	0.985	120.5	104.2	80.4	142.8	227	-1.4	110.1	92.5	45.8	2.58	0.072
530	eta Corvids	ECV	annual	299.28	280	319	189.2	-17.4	0.84	-0.11	68.2	-0.02	6.13	0.818	0.867	15.2	50.0	119.3	157.0	156	-1.3	111.9	98.7	30.4	5.72	0.097
531	gamma Aquilids	GAQ	annual	48.66	40	58	304.9	14.4	0.97	0.24	62.8	-0.03	27.5	0.985	0.964	144.5	197.7	48.7	123.7	40	-2.0	111.3	93.6	46.6	3.91	0.044
533	July xi Arietids	JXA	annual	114.37	94	130	36.7	9.3	0.73	0.23	69.0	0.04	18.6	0.866	0.953	80.4	314.8	294.4	171.3	70	-1.6	112.0	97.9	27.9	4.10	0.082
545	xi Cassiopeids	XCA	annual	155.86	154	159	9.5	50.6	1.19	0.31	52.7	0.32	31.2	0.728	0.977	174.3	244.2	155.9	95.5	12	-1.4	106.1	88.6	63.3	2.39	0.033
546	43 Cassiopeids	FTC	annual	144.13	140	148	28.2	68.5	1.74	0.44	52.2	0.07	15.1	1.007	0.933	58.4	173.7	144.1	93.8	41	-1.3	106.0	90.1	44.7	4.89	0.046
549	49 Andromedids	FAN	annual	115.51	103	123	24.9	46.8	1.13	0.25	59.9	0.05	8.89	0.891	0.900	26.5	137.9	115.5	119.1	63	-1.4	109.1	94.9	40.6	4.07	0.057
557	64 Draconids	SFD	annual	217.69	208	227	300.8	65.5	-0.17	-0.15	26.2	-0.15	19.9	0.975	0.951	88.7	195.2	217.7	38.1	58	-1.1	98.4	82.1	43.3	5.11	0.040
563	December omega Ursae Majorids	DOU	annual	271.91	262	283	162.7	42.2	1.30	-0.29	56.7	0.00	24.8	0.543	0.978	123.4	264.7	271.9	106.5	85	-1.7	108.9	90.1	56.8	3.24	0.057

付表1 流星群諸元 (続き2)

No.	Meteor Shower Name	Code	Activity	S. Lon	S.L.Beg	S.L.end	RA	DE	dRA	dDE	Vg	dVg	a	q	e	P	Peri	Node	Incl	N	mag	H1	H2	Ev	RDI	Av_Dd
				[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[km/s]	[km/s]	[AU]	[AU]	[yr]	[yr]	[deg]	[deg]	[deg]			[km]	[km]	[deg]		
569	omnicron Hydrids	OHY	annual	306.46	293	316	174.6	-32.9	0.81	-0.36	59.3	-0.06	10.0	0.683	0.931	31.4	68.7	126.5	115.0	97	-0.5	109.0	97.0	18.5	3.22	0.059
570	February beta Herculids	FBH	annual	311.32	301	318	246.5	23.9	0.93	-0.06	55.7	-0.12	15.9	0.897	0.943	63.2	144.6	311.3	100.7	35	-1.2	108.6	93.7	39.3	3.18	0.051
571	26 Bootids	TSB	annual	343.76	331	357	214.3	26.2	0.55	-0.34	47.5	-0.10	26.1	0.495	0.981	133.1	270.7	343.8	76.2	63	-1.6	104.0	94.7	59.4	5.34	0.090
580	chi Andromedids	CHA	annual	154.95	152	160	27.3	45.7	1.36	0.41	59.9	0.15	15.5	0.781	0.950	60.9	237.6	154.9	119.0	29	-1.6	108.3	91.6	60.9	4.42	0.052
581	90 Herculids	NHE	annual	34.75	31	40	261.8	37.5	0.58	-0.15	40.6	0.05	21.2	0.882	0.958	97.4	221.5	34.8	65.2	32	-1.0	104.0	89.1	60.1	2.71	0.033
582	January beta Craterids	JBC	annual	294.95	280	308	175.1	-27.9	0.96	-0.30	63.8	0.04	10.2	0.811	0.920	32.6	50.6	115.0	129.0	48	-0.9	112.0	100.3	27.2	2.79	0.061
593	28 Lynxids	TOL	annual	230.49	221	239	126.4	38.5	1.30	-0.33	66.0	0.02	48.4	0.696	0.986	336.8	246.3	230.5	142.9	27	-1.9	111.4	90.0	57.2	2.48	0.044
597	theta2 Sagittariids	TTS	annual	55.20	46	63	304.3	-32.7	1.12	0.30	65.2	-0.02	39.9	0.565	0.986	251.6	83.6	235.2	152.4	32	-0.7	110.7	99.4	18.1	2.63	0.049
602	kappa Craterids	KCR	annual	289.88	282	301	171.3	-14.9	0.85	-0.32	66.3	0.04	16.1	0.665	0.959	64.8	70.2	109.9	145.7	41	-1.6	111.1	93.7	34.0	1.89	0.049
618	12 Hydrids	THD	annual	241.09	236	250	123.6	-9.4	0.92	-0.10	62.5	0.06	33.5	0.725	0.978	193.7	62.4	61.1	124.8	25	-1.3	109.5	92.9	35.9	2.54	0.041
648	22 Aquilids	TAL	annual	24.32	20	29	283.6	4.3	1.02	0.24	65.3	-0.04	18.9	0.957	0.949	82.3	204.8	24.3	133.2	16	-1.7	111.1	96.0	34.6	2.66	0.045
665	May upsilon Cygnids	MUC	annual	56.12	47	63	317.2	28.7	0.91	0.38	57.1	-0.11	10.5	1.000	0.905	34.1	168.3	56.1	107.8	18	-1.4	107.7	93.6	44.8	3.19	0.044
684	omnicron Geminids	OMG	annual	166.17	152	178	118.3	37.9	1.10	-0.21	59.0	0.06	8.9	0.315	0.965	26.6	66.4	166.2	132.3	44	-0.7	107.0	94.0	29.8	3.58	0.076
707	beta Pixidids	BFX	annual	284.25	280	289	130.1	-35.9	0.73	-0.32	43.5	0.04	7.9	0.745	0.905	22.1	60.5	104.3	70.7	18	-0.4	102.2	91.9	15.9	3.52	0.042
715	alpha Camelopardalids	ACL	annual	185.20	175	191	75.5	66.3	1.85	0.08	56.3	0.12	12.2	0.942	0.923	42.4	208.7	185.2	104.6	23	-1.8	108.5	92.9	47.2	2.43	0.047
720	November gamma Bootids	NGB	annual	244.99	241	247	214.0	39.8	-0.13	-0.34	48.7	0.31	18.2	0.779	0.957	78.0	124.7	245.0	82.4	8	-1.9	107.7	93.3	33.9	2.48	0.033
722	15 Leonids	FLE	annual	251.22	241	260	145.3	30.6	0.95	-0.36	66.0	0.01	34.4	0.610	0.982	201.6	256.7	251.2	147.0	45	-1.8	110.7	91.8	59.1	2.53	0.056
727	iota Serpentids	ISR	annual	275.77	269	284	230.8	21.4	0.89	-0.37	54.4	0.04	30.0	0.642	0.979	164.5	107.3	275.8	97.3	24	-2.0	107.7	91.6	39.2	4.30	0.056
701	beta Cepheids	BCE	annual	172.88	168	179	11.7	86.1	-	-	43.8	-0.08	21.2	1.004	0.953	97.4	183.3	172.9	73.9	22	-1.5	104.8	89.8	39.1	2.96	0.036
814	January Canum Venaticids	CVD	annual	303.12	299	308	184.5	40.6	0.93	-0.37	49.0	-0.03	20.7	0.524	0.975	93.9	267.0	303.1	81.3	24	-1.6	106.0	86.0	65.1	2.39	0.047
818	October Aurigids	OAG	annual	204.73	199	208	68.2	35.6	1.25	0.22	57.4	0.16	-16.9	0.170	1.001	311.3	204.7	129.3	14	-2	109.2	89.4	58.8	1.69	0.076	
827	nu Pegasids	NPE	annual	25.71	10	39	326.7	1.7	0.82	0.27	61.5	0.04	128	0.354	0.997	144.6	72.6	25.7	142.9	31	-1.4	110.9	96.2	20.5	1.96	0.066
838	October delta Sextantids	ODS	2010-13	212.08	210.8	214	160.5	-3.6	0.72	-0.09	59.4	0.23	39.1	0.178	0.995	244.6	229.8	32.1	140.9	6	-1.8	109.0	85.4	28.8	1.26	0.037
854	psi Cygnids	PCY	annual	49.12	40	59	297.2	52.3	0.07	0.16	40.2	-0.03	17.0	1.006	0.941	70.1	173.7	49.1	66.9	35	-1.1	104.1	88.4	44.0	3.62	0.059
860	psi Andromedids	PAN	annual	72.11	71.7	72.7	355.5	46.7	0.89	0.55	50.4	-0.83	21.4	0.711	0.967	98.8	113.0	72.1	89.5	18	-1.2	107.1	93.4	32.9	0.97	0.025
862	16 Scorpiids	SSR	annual	5.35	355	15	245.9	-9.1	0.96	-0.12	64.1	-0.03	15.3	0.449	0.971	60.0	276.8	5.3	151.0	24	-1.3	109.6	93.9	38.1	2.89	0.056
877	omega Hydrids	OHD	annual	214.29	201	226	148.8	4.6	0.83	-0.29	66.7	0.05	17.2	0.550	0.968	71.2	275.3	34.3	163.9	29	-1.4	112.3	96.0	33.7	2.66	0.069
884	November beta Pyxidids	NBP	annual	245.31	239	248	132.0	-35.2	0.53	-0.07	52.7	0.10	7.1	0.975	0.862	18.8	12.1	65.3	94.5	16	-1.3	110.1	96.5	18.2	3.55	0.055
889	Y Ophiuchids	YOP	annual	318.03	307	327	268.9	-7.0	1.02	0.16	58.2	-0.09	27.6	0.229	0.992	145.0	57.1	318.0	126.6	22	-1.7	109.8	92.1	22.2	4.26	0.081
893	eta Ophiuchids	EOP	annual	1.92	346	16	263.2	-16.3	-0.03	0.00	70.9	0.00	27.6	0.946	0.966	145.3	205.4	1.9	168.1	46	-1.8	113.7	99.7	27.9	3.55	0.078
894	June nu-Draconids	JMD	annual	96.34	90	101	252.4	54.8	-0.24	0.25	24.1	-0.10	19.3	1.007	0.948	84.7	191.3	95.5	34.6	6	-2.7	98.8	80.3	62.1	2.86	0.021
900	beta Bootids	BBO	annual	285.03	278	290	223.9	42.2	0.68	-0.22	50.1	0.00	8.7	0.978	0.888	25.8	171.2	285.0	87.5	17	-0.7	108.1	94.2	39.0	2.13	0.039
1119	December lambda Velids	LAV	annual	257.86	252	263	135.3	-37.2	0.75	-0.35	52.4	-0.05	11.7	0.947	0.919	40.2	23.5	77.9	92.5	28	-1.1	108.8	96.3	15.8	4.71	0.041
1133	32 Cassiopeids	TCS	annual	105.58	104.7	106.9	14.6	67.4	0.61	0.28	45.7	0.11	10.3	0.863	0.917	33.3	133.2	105.6	78.8	5	-0.5	95.1	86.2	37.7	2.24	0.024
1137	August mu Perseids	AMP	拡散して集計困難																							
	不明群3	UN2	annual	22.11	10	35	266.3	-15.9	0.85	-0.02	65.9	-0.06	13.3	0.534	0.960	48.3	267.3	22.1	163.9	31	-1.4	111.6	96.72	48.1	2.38	0.050
	不明群2	UN3	annual	67.30	59	75	311.8	9.1	0.84	0.19	63.3	-0.03	26.8	0.787	0.971	139.0	236.9	67.3	130.9	22	-1.8	109.7	90.6	31.7	2.82	0.066
	不明群7	UN7	annual	277.01	274	279	164.3	54.0	1.29	0.17	48.0	-0.39	19.3	0.609	0.968	85.1	256.9	277.0	79.4	13	-0.4	93.5	85.33	48.5	2.39	0.033