

HRO(Fujito) vs CMOR vs Video vs Visual(AMS)

——電波観測(HRO)が見ているもの

2021/mm/dd OnlineMSS

日本流星研究会

小関正広

要旨：ビデオ観測と HRO の特性の差を検討し、同時観測が成立しにくい理由を示した。HRO は何を見ているのかわからないという批判もあるが、今回の調査によって、レーダーによる電波観測とビデオ観測の中間的な性格を帯びていることが示された。HRO は眼視観測とほぼ同じ領域の流星現象を捉えていると考えられる。

1. はじめに

2018年7月17日の観測から、毎日、NMS 同報に四日市の藤戸健司さんが毎日 HRO の観測を報告されている。FRO の時代にはこのような報告をよく見たが、その時にはよくわからないまま眺めていただけであった。HRO が盛んになった時期には、勤務していた高校で雨でも昼間でもできる天文活動として生徒に HRO のデータ処理に取り組みさせていた。熱心家たちによってビデオ観測との同時観測が HRO また MU レーダーの間で行われていたが、なかなか、同定できる観測が得られないという話を漏れ聞くままにしていた。最近、藤戸さんの観測とビデオ観測の同時が成り立つことがしばしば同報上で報じられるようになり、俄かに興味を引き立てられ、HRO と他の観測との対比を行ってみることにした。

2. 使用したデータ

(1) HRO

藤戸さんの2018年7月17日以降、2021年5月の月次報告まで NMS 同報に掲載されたデータ。当方の取り込み損ないにより一部のデータを失っている。また、HRO の特性上、周囲からの雑音、高層大気の状態による観測不良、発信機の故障等による欠測があるものの、統計的には十分な量のデータが与えられている。

(2) CMOR

カナダの流星レーダーによる観測で、29.85 MHz の電波を用いて電波等級で 6~8 等級の流星を捉えているとしている。2017年の太陽黄経 119 度の観測以降、Norb として表示されている数値を収録している。これも当方の取り込み損ないがあるが、データの更新が一定しないで発表が飛ばされることもあり、必ずしも全期間のそろったデータではない。また、観測の都合か不明であるが極端に Norb が少ない日がある。この極端に Norb が少ない日については欠測として扱った。2021年5月までのデータを使用した。

(3) Video 観測

SonotaCo ネットの 2007~18 年の 12 年間のデータを用いている。月明の影響と地球軌道上における位置が 1 年ごとにずれることを考慮すると 12 年の観測は光学観測の一つの基本単位である。もちろん、光学観測であるので薄明や天候の影響もあるがこれらについては後で触れることにする。また、EDMOND のヨーロッパでの観測も比較として用いた。

(4) 眼視観測

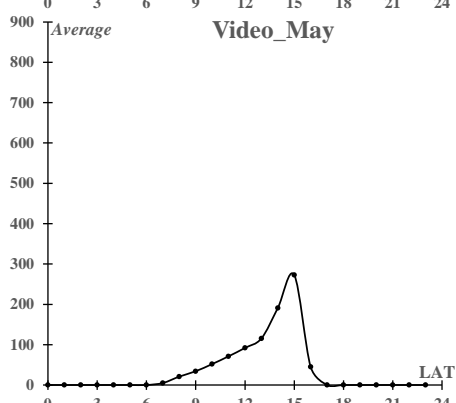
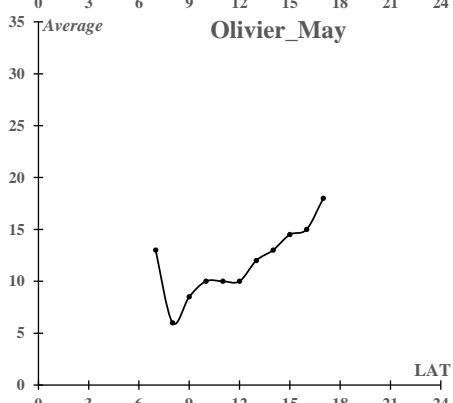
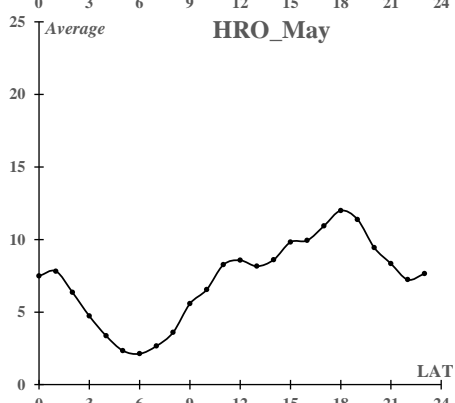
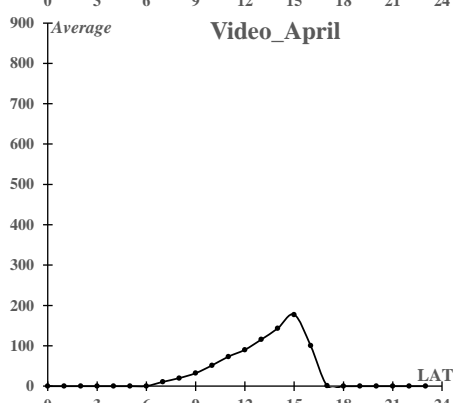
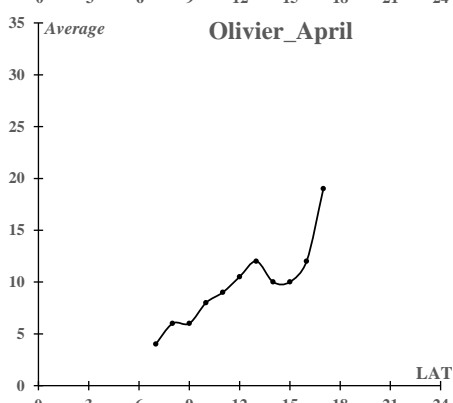
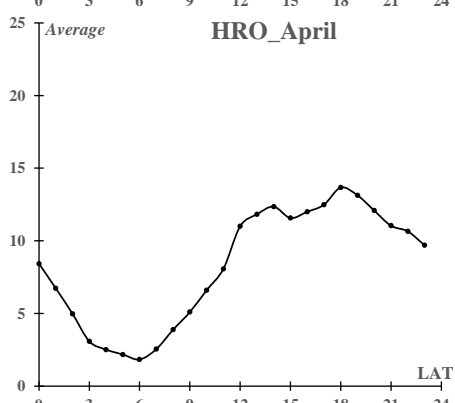
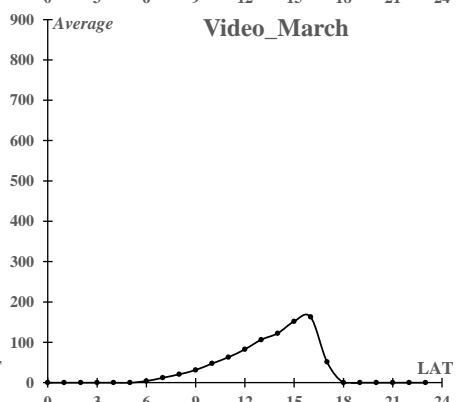
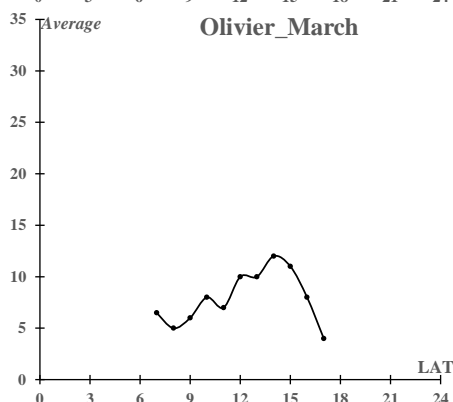
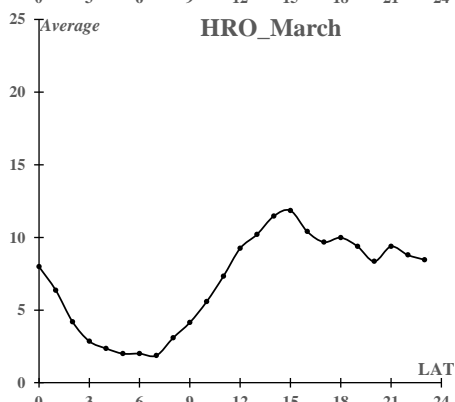
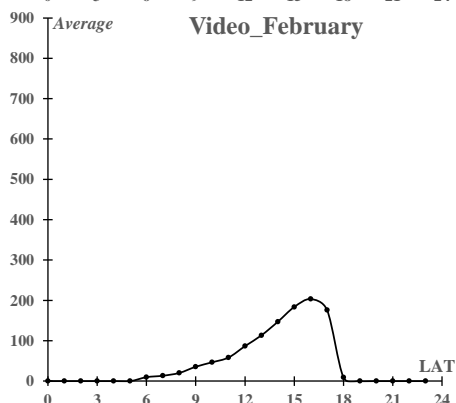
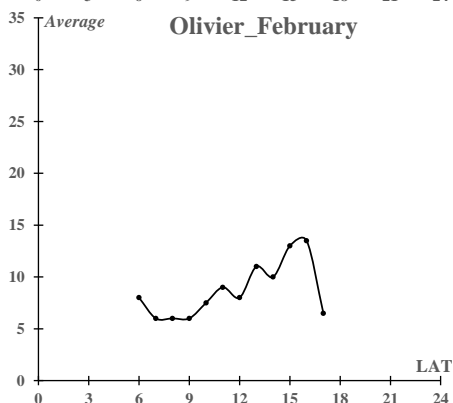
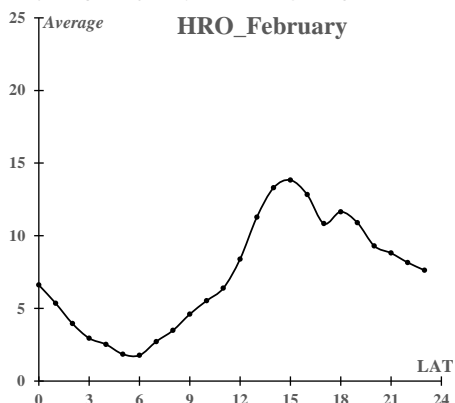
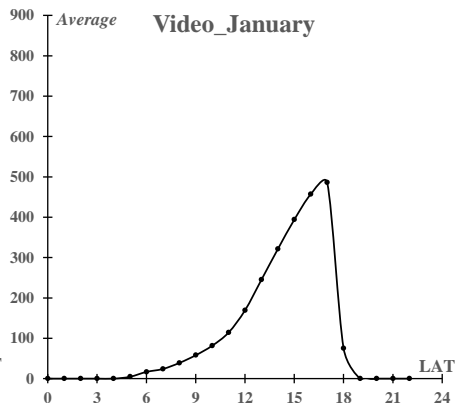
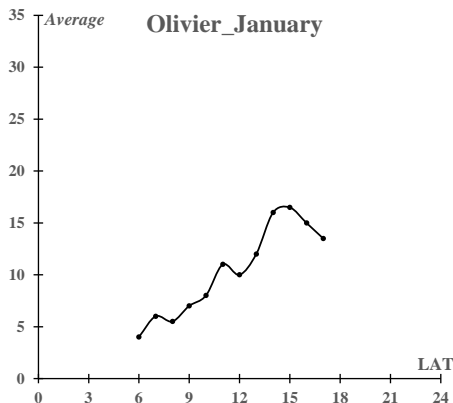
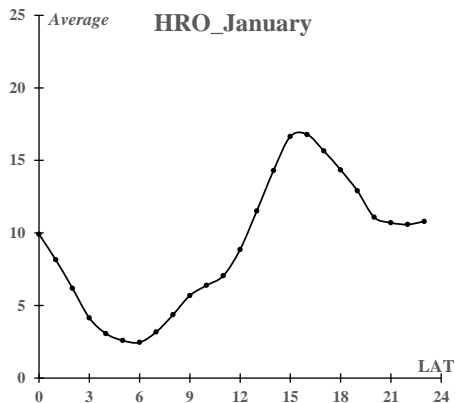
AMS(American Meteor Society)は NMS の親分のようなものである。AMS の初代会長 Olivier と NMS の創立者小槇孝二郎先生とは親交があり、小槇先生の「流星の研究」は Olivier の 'Meteors' を雛形にしている。Olivier は眼視観測のデータを日毎に 1 時間ごとの流星数をカタログにしている。彼は二回カタログを発表し、二回目のカタログ(1958~63 年)には小槇先生が送られた日本のデータが使用されている。しかし、使用されたデータの期間が短く、データの得られていない時間帯が多いため、今回は日本の観測が含まれない一回目のカタログ(1901~58 年)を用いた。

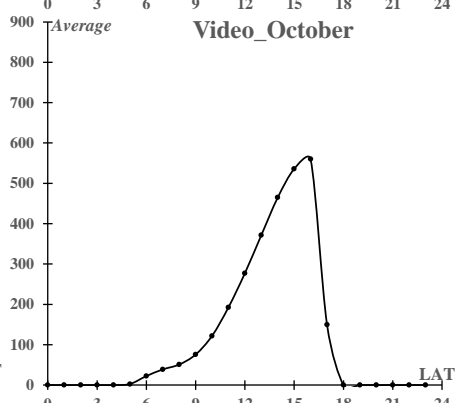
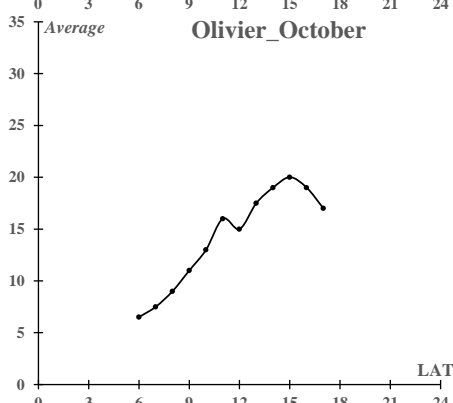
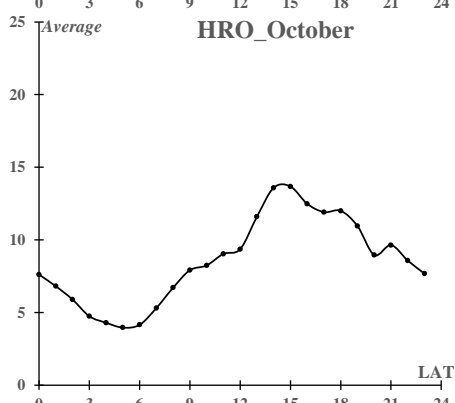
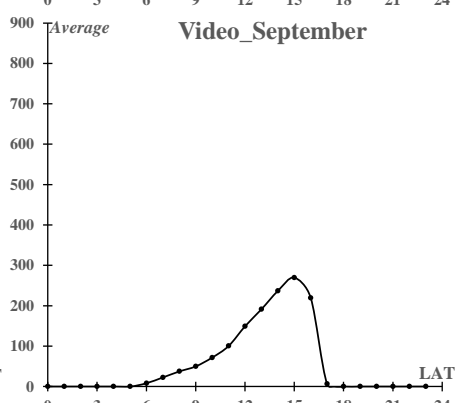
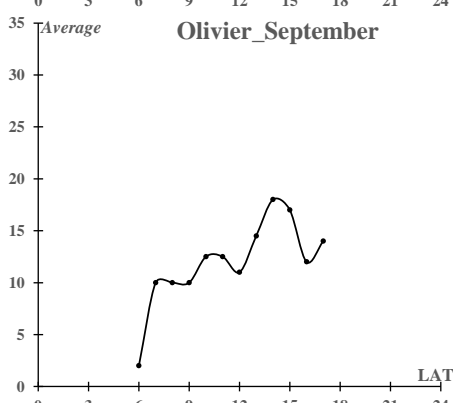
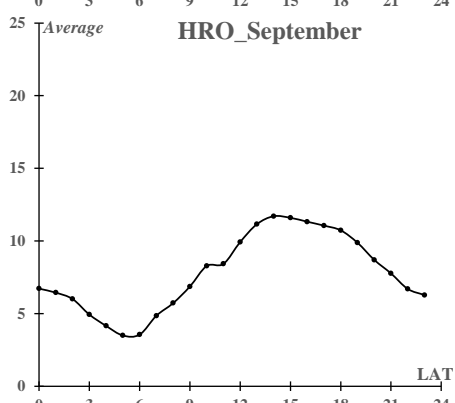
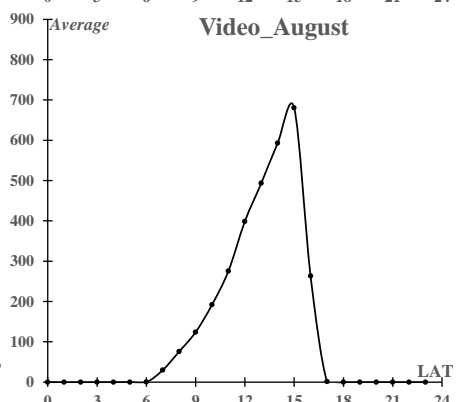
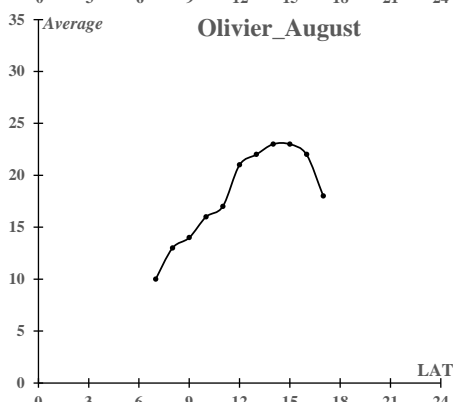
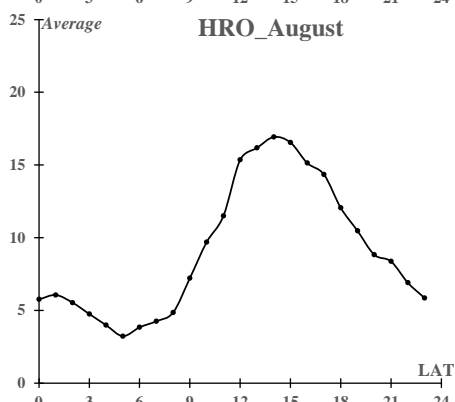
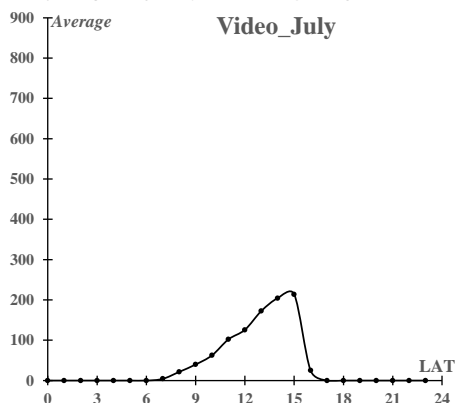
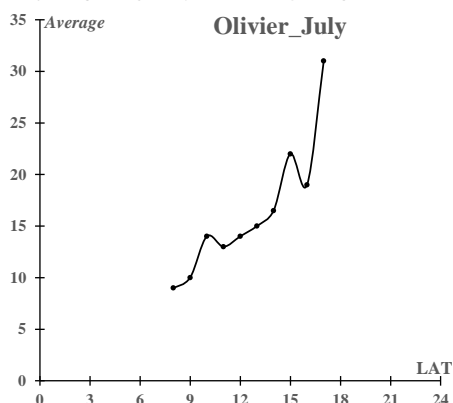
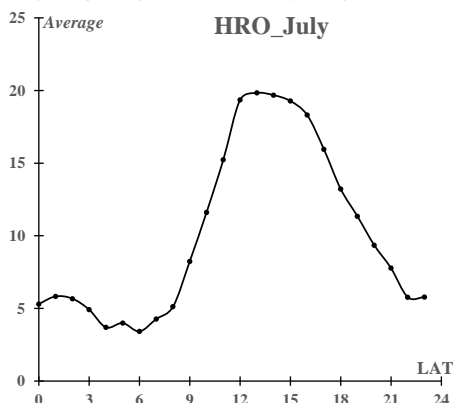
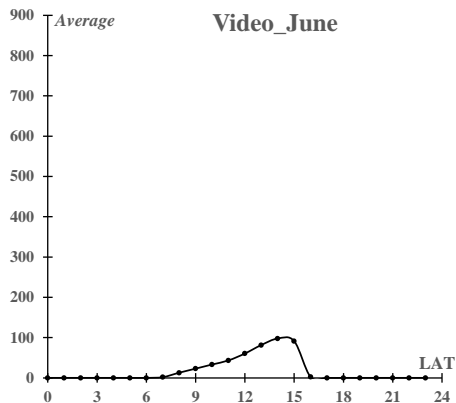
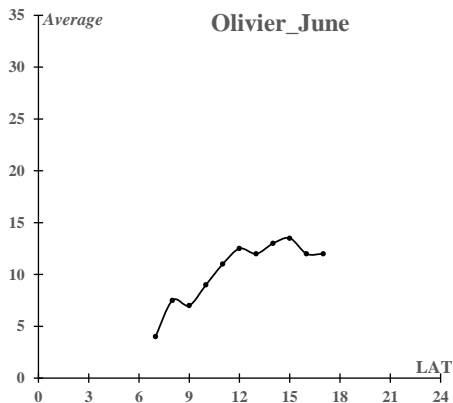
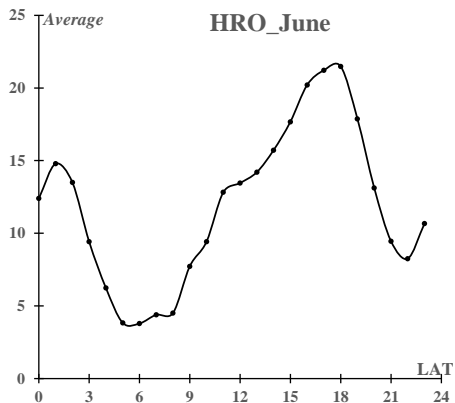
3. 流星数の日変化

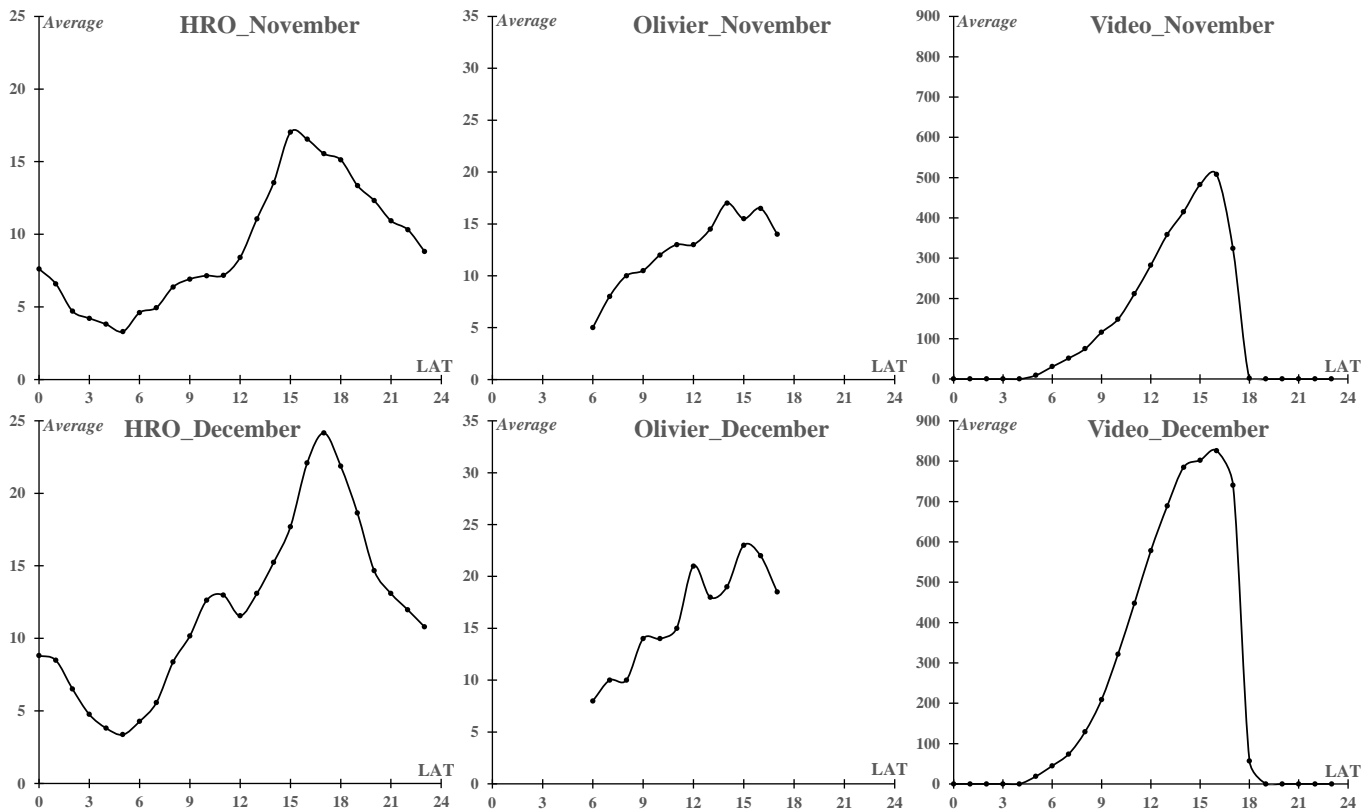
観測される流星数は夕方から増加し、日の出頃にピークに達することが眼視観測の時代からよく知られていた。Olivier による日変化のグラフによりこのことが確認される(第1図)。Olivier のグラフの横軸は「地方天文時(Local Astronomical Time)」(註参照)が使われている。これに合わせて、HRO とビデオ観測でも地方天文時(LAT)を用いることにする。

第1図の縦軸はそれぞれの最大値に合わせてあるので、グラフの外観から三者の違いを知ることができる。光学観測では薄明の影響を避けることができずに極大・極小の時間が季節によって多少変動しているが、HRO では年間を通して、ほぼ極小が LAT=6h、極大が LAT=18h になっている。また、この極大・極小の時間はいずれの観測でも流星群の活動の影響をほぼ受けていない。

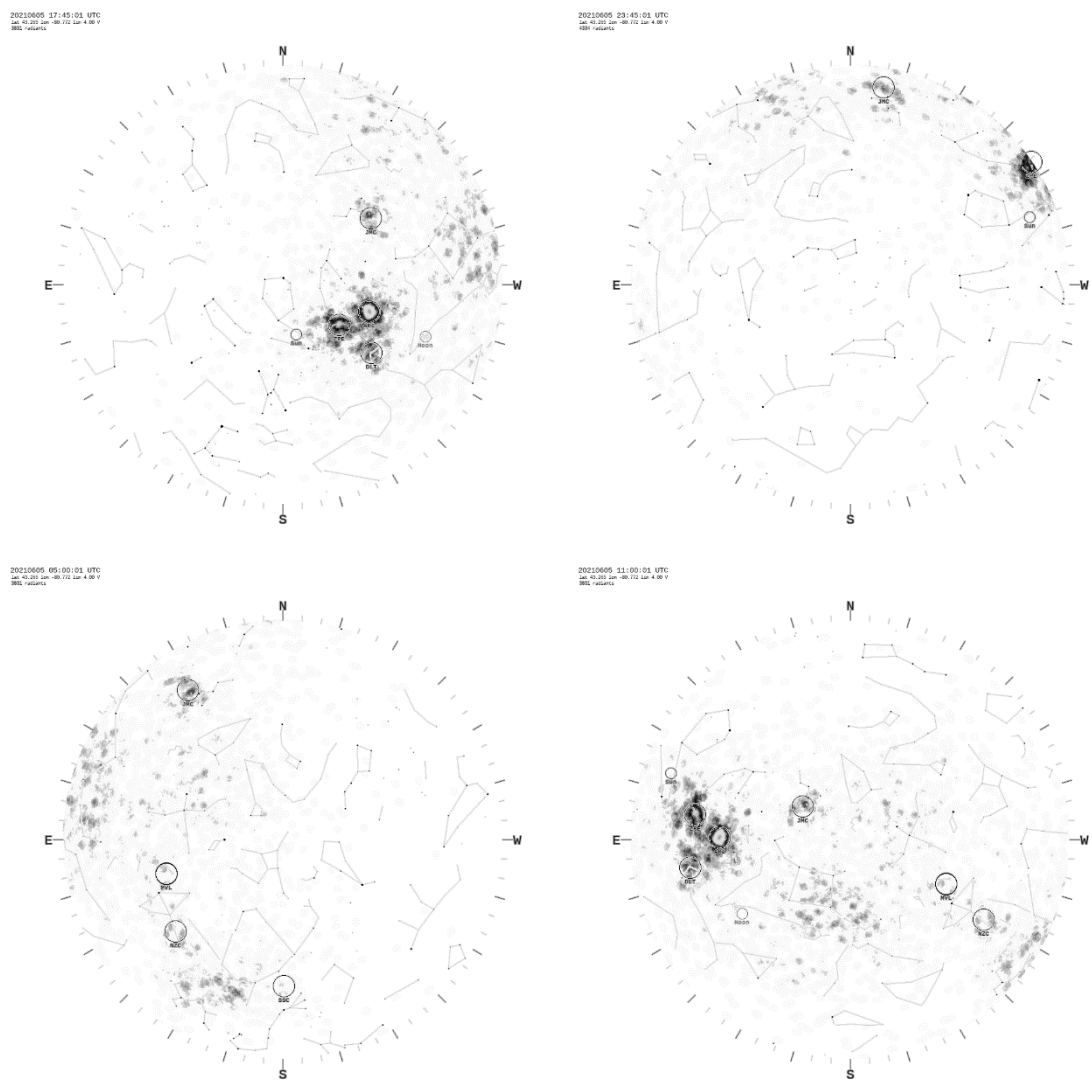
第1図：観測される流星数の日変化。月ごとの平均値で示している。HRO はエコー数、Olivier による眼視観測は修正された流星数。ビデオ観測は SonotaCo ネットによって捉えられた輻射点数。







第2図：2021年6月5日のCMORの観測による輻射点分布図（色調を反転して、モノトーンにしている）。左上(LAT=0)、右上(LAT=6)、左下(LAT=12)、右下(LAT=18)

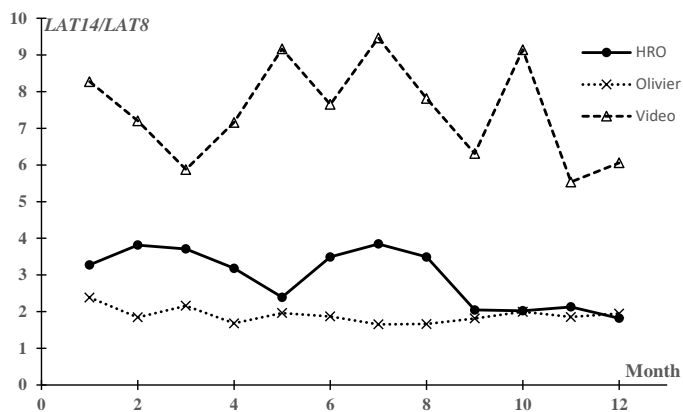


CMOR では発表が1日単位のため、日変化の様子はわからないが、地球の自転に合わせて回転させた輻射点分布図が発表されており、これを第2図に示した。電波観測であっても輻射点が地平線に近ければ観測される数は少ないのだが、第2図のCMORの輻射点分布図は1日分の輻射点すべてを示しており、それぞれの時間帯に観測される実際の輻射点ではない。しかし、CMORの輻射点分布図は夕方が極小、朝方が極大となることは地球向点と地球背点の輻射点数の違いによるものであることを明らかに示している。

日変化のグラフはHROでもビデオでも似た形になる。6月のHROの極大が昼間群の活動により他の月よりも遅くなっていることが目立つ程度である。ビデオ観測では6月と12月の極大値の差が大きくなっているが、これは明らかに天候の影響によるものである。HROではこの差が小さく、6月と12月がほぼ同じ極大値になっており、昼間群の活動がいかに強いものであるかを示している。

このように3者の観測は外観上よく似ている。しかし、眼視(Olivier)とHROに比べてビデオ観測は明らかに特別なものである。夕方から朝方にかけての増加率をみてみよう。極大、極小に近い時間帯は季節により薄明の影響を受けるため、8~9(LAT)に対する14~15(LAT)の観測数比を調べると第3図のようになる。年間を通してビデオ観測は眼視やHROに比べて朝方の増加率が2~3倍高いことが分かる。この違いについては「5. 検討」で触れることにする。

第3図: 日変化におけるLAT=14hの流星数とLAT=8hの流星数の比。

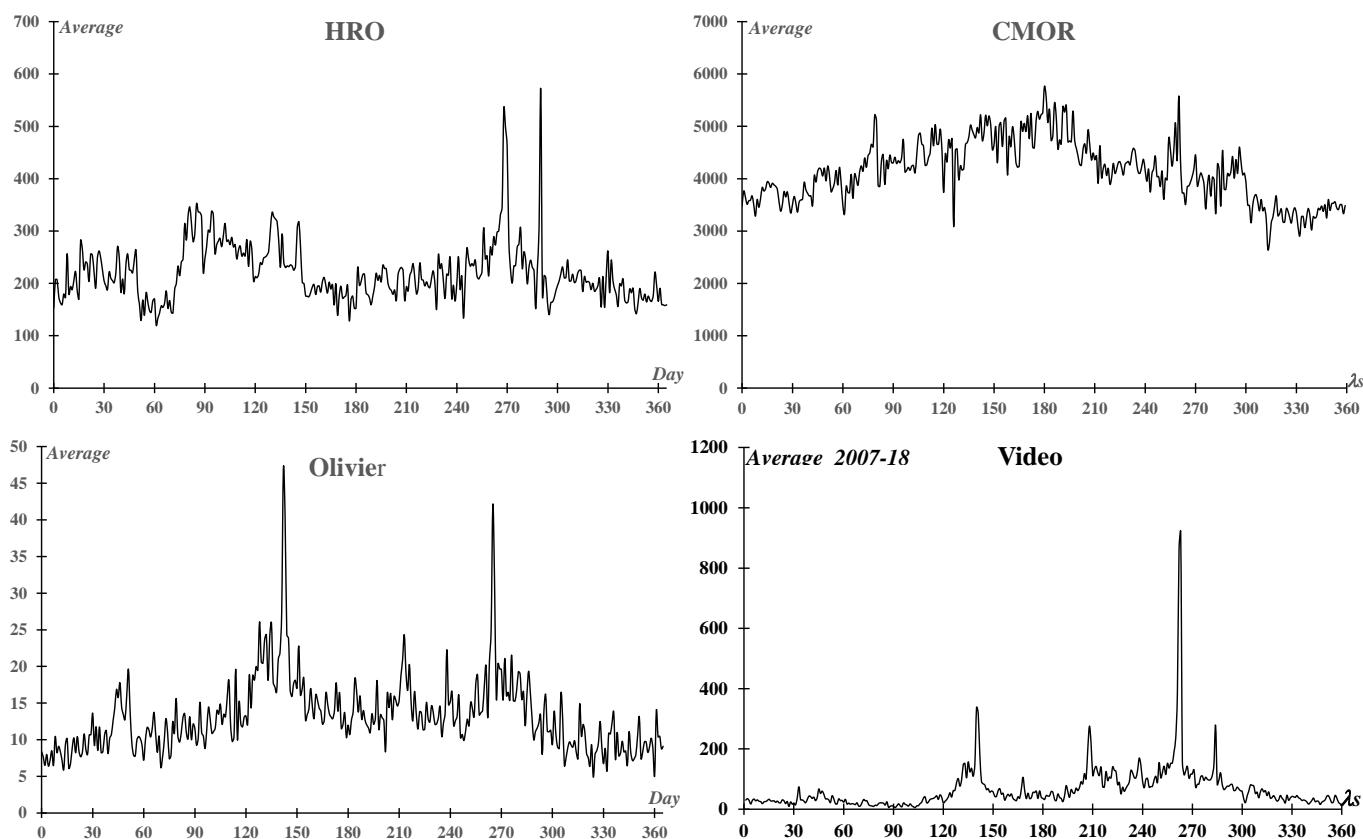


註: ある年代から上の方は思い出される方もあろう。地方天文時は夜間の天体観測で時刻表示が23時、0時と途切れるのを防ぐために導入された昼の12時を0時とする表記である。流星観測で二重日付や25時のような表記が用いられるのと同様の目的である。しかし、現在では地方天文時をインターネットで検索しても見つからない。

4. 流星数の年変化

観測方法による流星数(輻射点数)の年変化の違いを第4図に示した。CMORとビデオ観測では太陽黄経1度ごとの集計になるが、HROと眼視(Olivier)では1日ごとの集計である。見かけ上は4つの観測をほぼ同じ条件で示すために、HROと眼視観測のグラフは3月22日を0として描いている。

第4図: 観測流星数の年変化。

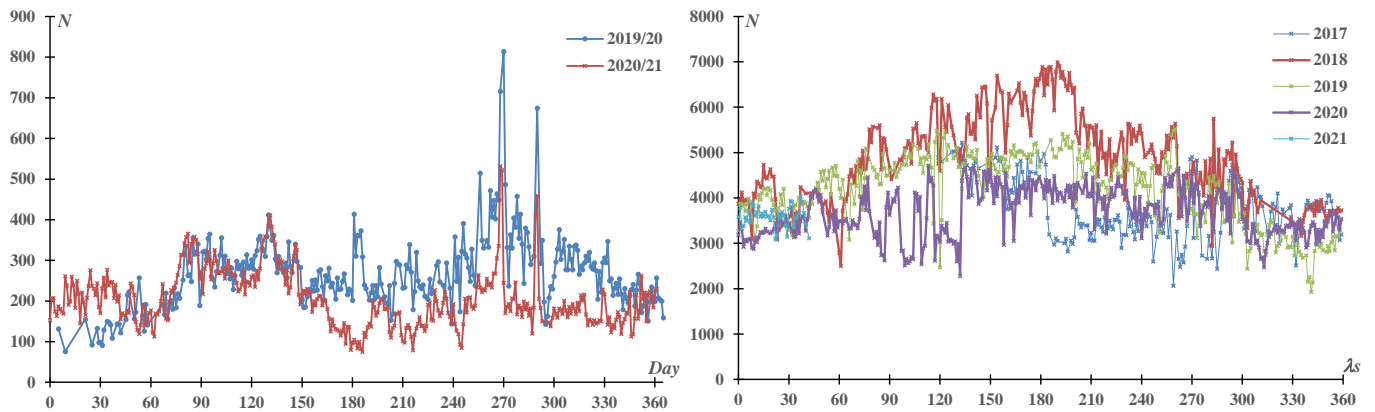


CMOR とビデオ観測の違いは歴然としている。ビデオ観測のグラフでは主要流星群（ペルセウス群、オリオン群、ふたご群、しぶんぎ群）の極大が一目でわかるが、CMOR のグラフでは全体が9月を極大とする一つの波で、流星群の活動はこの波にほぼ埋もれている。両者の中間的な性格を示すのが HRO と眼視(Olivier)である。この2つのグラフでは、主要流星群の存在が明らかではあるが、ビデオ観測ほど極端な山にはならない。両者ともに、夏と冬に2つの極大を持つ基本変化に流星群の活動が加わった形になっている。

しかし、HRO と眼視にも違いがみられる。HRO でペルセウス群とオリオン群が、眼視(Olivier)ではしぶんぎ群が明確な極大を示していない。しぶんぎ群については AMS の観測気象条件がよくないこと、また、「5. 検討」で述べるように観測特性の違いがあると考えられる。基本的な HRO と眼視観測との違いは、先にも触れた6月の昼間群の活動が強く表れている点だけであろう。

一方で、HRO と CMOR には共通点がある。両者ともに年ごとの変動が大きいことである（第5図）。同じ太陽黄経（日）でも年により2倍程度、流星数に違いがでることが稀ではない。しかも、CMOR で多い年に HRO でも多いというわけではない。電波観測では高層大気の変動（太陽活動の変動を含む）の影響を大きく受ける。E スポの発生が季節的なものであるように、受信環境の変化は観測地特有の現象である。

第5図：電波観測による流星数の年変化。HRO：左、CMOR：右。CMOR については、差が大きい2018年と2020年の観測を太い線で表している。



5. 検討

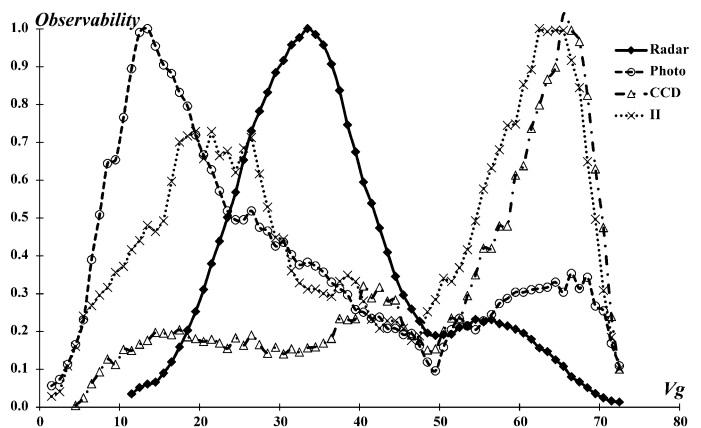
HRO とビデオで同時観測が成立しにくい問題に触れて、これが HRO の問題点ではなく、当然のことであり HRO は眼視観測とほぼ同一領域の流星を観測していることを示すことにする。

まずは、一口に流星観測というが、方法によって、捉えられる流星はかなり異なったものであることに注意しておく必要がある（第6図と第7図は2015年に wgn 誌上で使用したものの引用である）。第6図に電波観測（Harvard の1961-65年の観測）、写真観測（主としてスーパーシュミットの観測）、CCD（2013年の SonotaCo ネットの観測）、II（重野さんの観測）が多くとらえる散在流星の速度分布を示した。

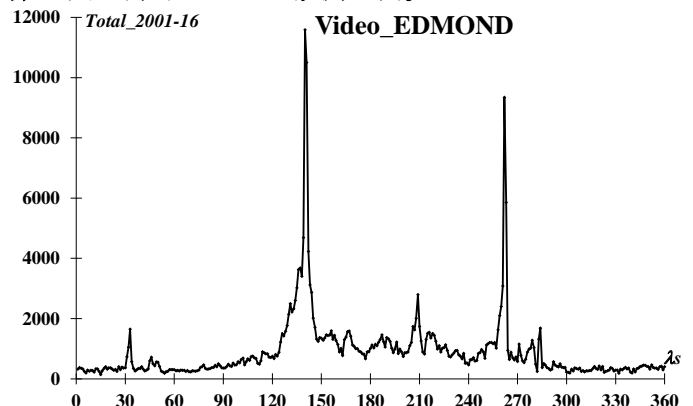
これにより、同じ光学観測でも写真観測と CCD（ビデオ観測）とではまったく違う流星現象を記録していることが分かる。写真観測（主にスーパーシュミット）では低速、ビデオ観測では高速のものが圧倒的に多いことが分かる。さらに電波観測では記録されるもののほとんどは中速の流星である。ビデオ観測で捉えられる流星に高速のものが多くは、先に述べた朝方の流星数の増加率によっても裏付けられる。朝方の流星は地球と正面衝突する地球向点からの高速の流星が多いのである。

最近では流星観測といえば、ビデオ観測が最も信頼できるもののように扱われているが、ビデオ観測も独特のフィルターを通したものである。

第6図：観測方法によって捉えられる流星の速度依存。横軸は地心速度、縦軸は観測方法それぞれで散在流星と判定された流星数の最大を1として規格化した。



第7図：海外のビデオ観測の例。



第8図はヨーロッパのビデオ観測による年変化を示しているが、これも第4図と同様に流星群の活動が突出している。EDMOND が活動を始めた初期は流星群の出現期間中のみ活動していたために、縦軸は観測期間の平均値ではなく、合計である。また、そのような観測の偏りから、流星群の活動がより突出したものになっている。しかし、ビデオ観測が高速のしかも明るい流星を中心とする偏りをもった記録であるということをおぼろげに忘れてはならない。

他方の電波観測も独特のフィルターを通して流星を観測している。電波観測される流星の速度依存は本質的なものであり、1960年代に旧ソビエトで行われていた電波観測に関して Kasheev が示した速度依存のグラフを第8図に示す。これには観測機器が高感度のものと低感度のものが示されているが、第6図の Harvard の電波観測が高感度の例によく当てはまっている。HRO では低感度のものに近く、速度依存はそれほど強くないと想定される。しかし、ビデオ観測とは捉える流星の速度分布に大きな違いがある。これがビデオ観測と HRO での同時が成立しにくい一つの理由である。

ビデオ観測と HRO での同時が成立しにくいもう一つの理由は観測視野の問題である。眼視観測とビデオ観測では視野を自由に選択できる。しかし、流星の飛跡によって電波は鏡面反射するものと考え、電波観測では発信点、受信点、輻射点の幾何学的な関係により自動的に観測される流星の方向、地平高度が決まってしまう。ロングエコーのように飛跡が乱れ、拡散された状態になればこの条件は当てはまらなくなるが、この問題については「6. 補足」で触れることにする。

しかし、同時観測の成立には難しい条件があるにせよ。HRO と眼視観測には大きな共通点がある。ここで改めて第3図、第4図を見てみよう。2つの図より HRO は眼視観測とほぼ同等の0~4等級の流星を主に捉えていると考えることが妥当であろう。HRO が高層大気による影響を受けること、昼間群の活動を捉え得ることを考慮すれば、記録される流星数の年変化が眼視観測とこの程度の差を持つことは当然であろう。従って、HRO の観測を注意深く補正すれば眼視観測による ZHR にかかなり近い流星活動を捉えることができることになる。HRO は同じ電波観測とはいっても CMOR のように高感度で電波等級6~8の範囲の流星を記録しているわけではなく、また、高速で明るい流星を多くとらえるビデオ観測とも異なり眼視観測に近い領域の流星を観測しているのである。

ロングエコーは流星体が大きい場合に生じると考えられ、長いものでは分単位でエコーが継続する可能性がある。このようなロングエコーだけを計数すると、流星群の極大期を鮮明に捉えられる。この場合には眼視観測さらにはより明るい流星を記録しているビデオ観測と似た流星の領域を観測していることになる。

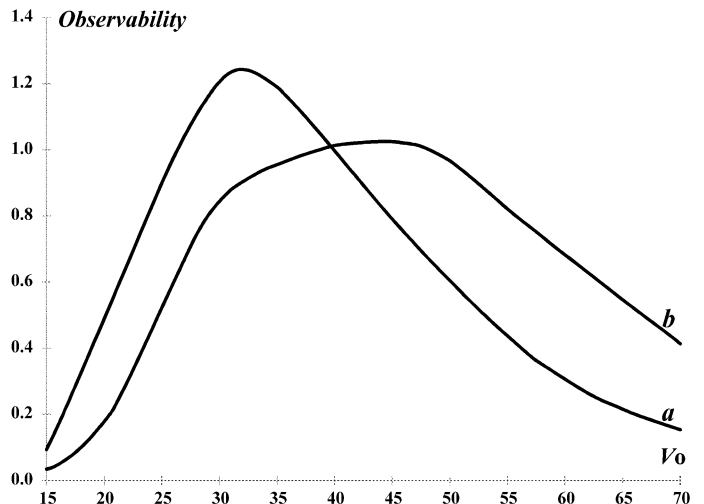
6. 補足

電波を鏡面反射する条件を満たすのは、発信点と受信点を焦点とする回転楕円体の表面に接して流星が飛行する場合である。第9図は発信点と受信点を含む鉛直面（断面）の場合を示している。2つの×は発信点または受信点である。1目盛り10kmで表しており、内側の楕円は短半径が図中の目盛りで10（発信点と受信点の中間点で高度が100kmに相当）、外側の楕円は長半径が図中の目盛りで30（中間点からの距離が300km）のものである。流星の出現高度をおよそ100~80kmと想定し、高度90kmで反射が起きると仮定している。流星経路が高度100kmと80kmになる場所に目印の*を置いた。この仮定を多少変更したとしても、以下の議論に定性的な違いは生じない。

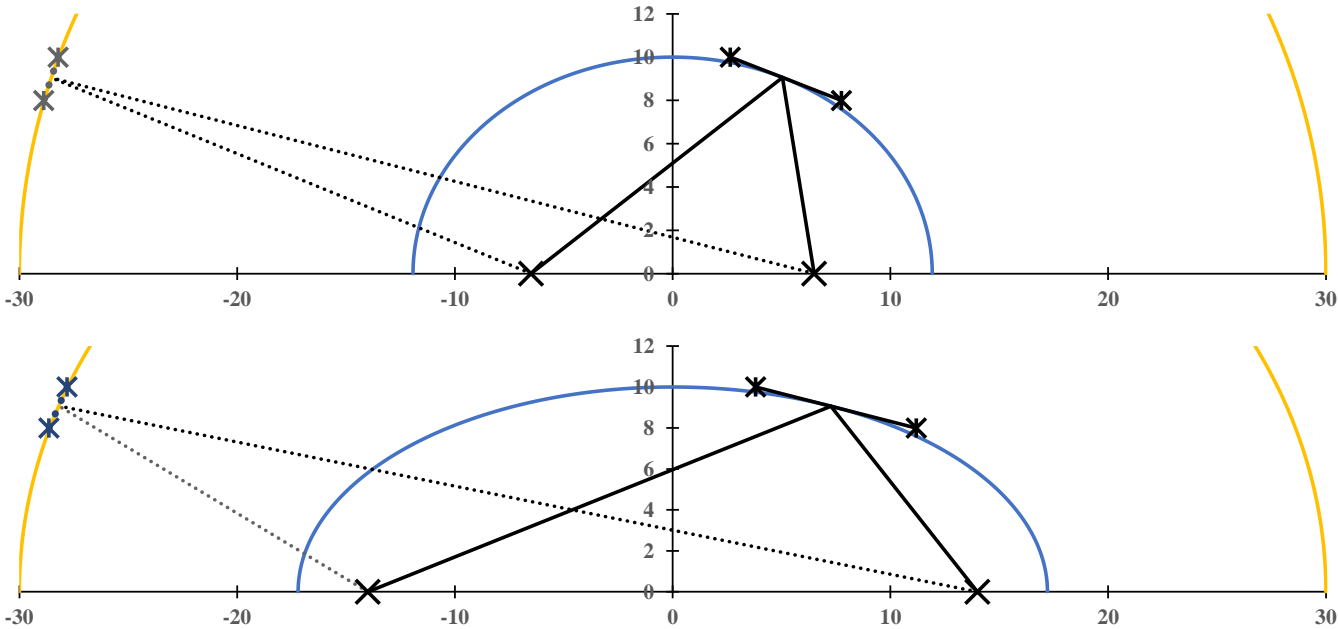
第9図上の場合、発信点と受信点の距離を130kmとしており、およそ福井-四日市の距離に相当する。発信点と受信点の間に出現した流星は経路の傾きが小さく、輻射点高度が低い場合であることが分かる。輻射点高度が低いことは出現数が少ないことを意味し、同時観測の成立が少ないことが分かる。捉えられる輻射点高度が高い流星は発信点や受信点から距離が離れた場所に出現した流星である。第9図上の場合で発信点（福井）を右側とみれば、受信点の間の流星は南方の高度21度の輻射点、左側の流星は北方の高度85度の輻射点からの流星であることを表している。輻射点为天頂に近い場合には、反射点が無限遠に近づき、鏡面反射で捉えられる流星はほぼ0になる。なお、図中に模式的に示した流星経路は、断面に投影されたものであり、実際には反射点を中心に回転した状態のものが存在し得る。それらの場合に輻射点高度は上に示した値よりも低くなる。以下で記す輻射点高度も同様である。

発信点と受信点の距離が福井-四日市の130kmより離れると、回転楕円体は細長くなり、発信点と受信点の間で反射条件を満たす流星の輻射点高度はさらに低くなる。このことは同時観測の条件を満たす流星数が

第8図：Kasheev が理論的に示した電波観測の速度依存。a は高感度、b は低感度のもので40km/sで規格化。



第9図：電波がエコーにより鏡面反射される様子。縦軸・横軸の単位を10倍して考えれば、流星が高度100kmで発光し、80kmで消滅する場合に相当し、90kmでの反射の様子を示している。その場合に上が福井-四日市、したが福井-八王子に相当する。

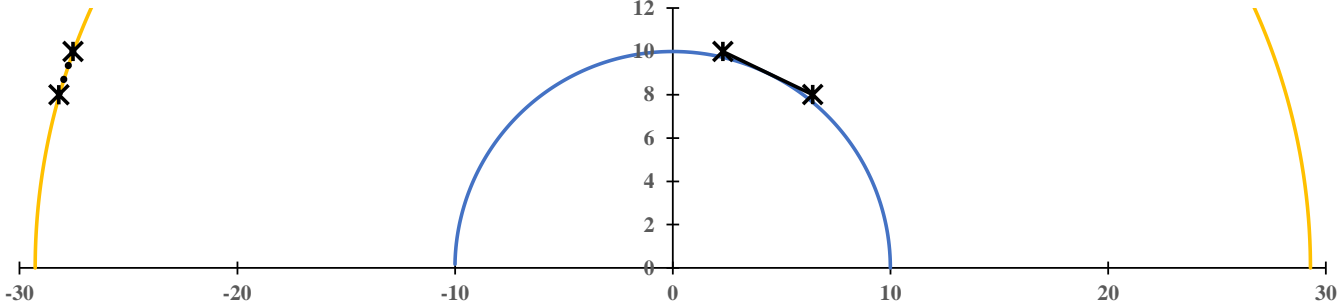


上の場合よりも少なくなることを意味する。また、輻射点高度が高く、反射条件を満たす流星は受信点や発信点からの距離が遠くなり、撮影される可能性が低くなる。第9図下は発信点と受信点の距離がおよそ280kmで福井-八王子間に相当する。この場合も発信点を右側とみれば、受信点の間の流星は東方の高度15度の輻射点、左側の流星は西方の高度68度の輻射点からの流星である。日本が島国であることを考えれば、輻射点高度が高く、鏡面反射の条件を満たす流星の多くは、海上に出現したものであろう。ビデオ観測でカメラは内陸に向けられていることが一般的であることを考えれば、HROとビデオ観測で同時が成り立つ機会は少ないことが分かる。

このような点から、直接波の影響を受けない範囲で、発信点と受信点の距離が短いほど電波とビデオ観測の同時の機会が増えると考えられる。福井を発信点とすると、大垣、京都、四日市は周囲にビデオ観測者もかなり多く、電波観測とビデオ観測の同時を得るには非常に適した地点であると考えられる。

また、発信点と受信点を結ぶ線に中間地点で直交する鉛直断面を第10図に示すが、回転楕円体の断面は当然、円で表される。この場合でも、流星経路の傾き（輻射点高度）は発信点と受信点に近い場合には低く、遠い場合には高くなる。

第10図：第9図上の回転楕円体の側面における反射。発信点と受信点の中間地点での断面を示す。内側と外側の円は第9図上の内側と外側の回転楕円体に相当する。



ロングエコーでは飛跡が拡散して電子密度は減少するが、受信できる範囲は広がるのでビデオ観測とHROの同時観測の機会は多くなる。しかし、ロングエコーは鏡面反射ではなく、観測時刻にもずれを生じるので、HROとビデオ観測の同定には注意が必要となる。