

要旨

ビデオ観測される流星数との比で、オリオン群はふたご群よりも HRO で捉えられるエコー数が少ない。特に輻射点高度が低い時間帯では HRO のエコー数が少ない。これは輻射点高度が低いと流星の高度が高くなることと関係し、電離層の影響を受けていると推測される。CMOR 等で用いられている波長に比べて影響は小さいと考えられてきたが、高速で流星の高度が 100km 以上になる流星群では電離層の影響を無視できない。

エコーで「スパイク」と呼ばれるものが観察される流星は発信点と受信点を焦点とする回転楕円体面に沿うものであり、発光とほぼ同時にエコーが受信されている。逆に「痕跡」と呼ばれるものは回転楕円体と流星経路のなす角が大きく、飛行後数秒の時間を経て観察される。また、「スパイク」は高速の流星で顕著である。

HRO の観測では観測地点に近く、回転楕円体面に沿う流星であれば、眼視観測とほぼ同等の光度の流星を捉えられるが、経路距離が 600km を超えると火球クラスの流星でなければ捉えられないことが示された。

1. はじめに

眼視観測に比べて、HRO ではペルセウス群、オリオン群の極大が明瞭でない。本稿では、その原因を探るとともに、オリオン群でみられるロングエコーについて検討する。また、ふたご群との比較により、オリオン群の特性を考察する。

2007~9 年にはオリオン群が活発化したので、その時のデータを利用することにより、HRO とビデオ観測の十分な同時データを得ることができる。ここでは 2009 年 10 月 20~22 日のデータを用いた。

2. ロングエコー

小さいエコーでは、流星によるものか雑音なのか判別が困難で、データを注意して選択しても両者の混在は避けられない。流星によるものである可能性が高いエコーを最初に分析することとした。

表 1 に対象としたエコーと対応するビデオ観測を示す。HRO と Video の下に示す 6 桁の数字は時分秒、 I はエコーの強度、 $Dur.$ はエコーの継続時間、 Δt はビデオ観測と HRO の時間差、 $amag$ はビデオ観測による絶対等級、 $abs(IP)$ は流星経路の midpoint における流星経路と発信点・受信点を焦点とする回転楕円体面の法線との内積の絶対値（流星経路と回転楕円体面との合致度を示す）、交差角は流星経路と回転楕円体面のなす角度、 D は発信点と流星経路の midpoint を経て受信点を結ぶ距離（以下、経路距離 D と呼ぶ）、class は SonotaCo ネットによる群判定である。*1 と *2 はそれら以外に同時に出現した流星が観測されていることを示している。それぞれ、表の下部に他に候補となり得るビデオ観測を示すが、ここではそれらは用いない。

表 1 : 顕著なエコーとそれに対応するビデオ観測。

Date	HRO	I	$Dur.$	Video	Δt	$amag$	$abs(IP)$	交差角	D	class
10/20	005232	21	23	005230	2	-4.0	0.114	6.6	336	ORI
	053104	28	67	053101	3	-3.8	0.150	8.6	377	ORI
10/21	004220	17	20	004219	1	-3.2	0.426	25.2	279	ORI
	004504	30	7	004503	1	-2.3	0.076	4.4	298	ORI
	015613	15	45	015606	7	-4.7	0.482	28.8	470	ORI
	025214	18	51	025210	4	-6.0	0.249	14.4	485	ORI*1
	033929	31	15	033929	0	-1.6	0.047	2.7	308	SPO
	035438	27	57	035435	3	-5.5	0.154	8.9	454	ORI
	045927	21	28	045925	2	-3.8	0.099	5.7	452	ORI*2
10/22	012428	27	35	012428	0	-4.3	0.018	1.0	376	ORI
	020110	15	10	020109	1	-3.9	0.045	2.6	532	ORI
	025934	10	25	025928	6	-7.2	0.150	8.7	723	ORI
	040428	19	15	040427	1	-3.7	0.015	0.9	572	ORI
	040500	11	8	040457	3	-3.1	0.094	5.4	569	SPO
	043449	18	7	043448	1	-3.0	0.009	0.5	539	ORI
	044350	9	8	044344	6	-5.0	0.250	14.5	505	ORI
	044402	19	13	044356	6	-3.4	0.303	17.7	387	ORI
*1				025210		-3.0	0.158	9.1	487	SPO
*2				045925		-2.9	0.103	5.9	453	ORI

注：エコーの出現時刻は HROFFT の画像から読み取ったものであるが、HROFFT では時として、1 分間の画像が 59 ピクセルしかない場合があるため、ここに示した HRO の時刻は ±1s の誤差がある。

表1に掲げたエコーとビデオ観測はほぼ確実に対応するものと思われるので、ビデオ観測によるデータと比較してエコーの特徴について考察する。

2. 1. 流星経路と回転楕円体面との交角

流星の経路が回転楕円体面に交差する角度 ($abs(IP)$) が大きいほど、ビデオ観測されてから HRO で受信され迄の時間がかかっている (図1)。これは電波を反射するものが拡散してエコーを生じる条件を満たすまでに時間がかかるためと考えられる。

また、図2に示すように、HRO とビデオ観測との時間差 (Δt) はエコー画像に顕著な違いを生じる。 Δt は流星経路と回転楕円体面とのなす角すなわち内積 $abs(IP)$ に大きく関係しているの、この画像の違いは内積が大きいもの 015613 (以下、HRO の時刻で表記) と小さいもの 012428 との違いでもある。流星が

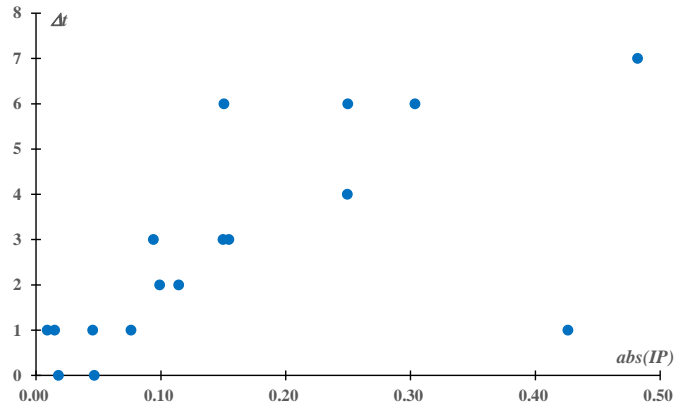


図1: HRO とビデオ観測の時間差と内積の絶対値。

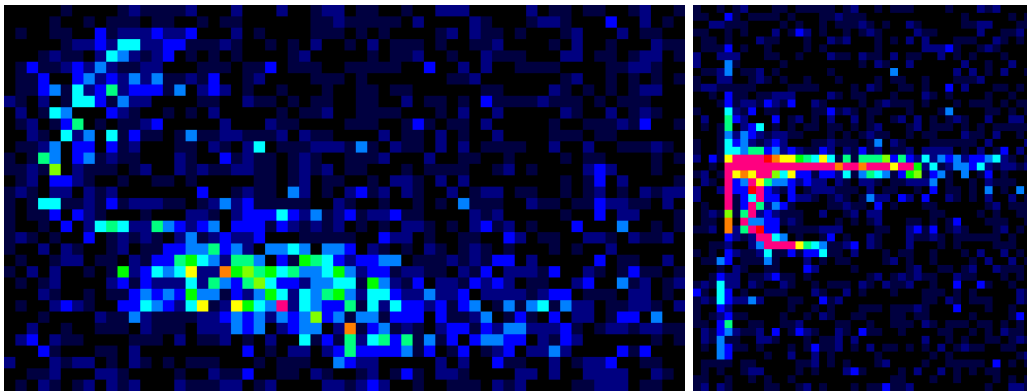


図2: HRO とビデオ観測の時間差によるエコー画像の違い。左は 015613 ($\Delta t=7s$, $amag=-4.7$)、右は 012428 ($\Delta t=0s$, $amag=-4.3$)。

回転楕円体面に沿うように飛行した場合には、出現と同時にいわゆる「スパイク」が現れる。このスパイクは流星の飛行と同時に出現するものであり、流星のヘッドエコーを含むものと考えてよいであろう。

「ふたご群と HRO」で指摘したように、経路距離が大きくなると、内積 IP が小さくなければエコーは観測されず、近ければ IP が大きくてもエコーが観測されることがここでも確認された (図3)。

これは次項で述べるように、流星の絶対等級及びエコーの強度が経路距離と深くかかわっていることによると考えられる。

2. 2. 絶対等級とエコーの強度・継続時間

この項ではエコー強度と継続時間が顕著なものを扱っている、すなわち、ある程度一定の範囲のエコーを対象としているため、経路距離と流星の絶対等級の関係が明瞭に認められる (図4)。さらに、HRO の観測点から近距離に大流星が出現しなかったために、その関係は一層明瞭になっている。経路距離が遠い場合にはかなりの大流星でなければ HRO で捉えられないことが分かる。

経路距離が遠くなるとエコーの強度は下がることは当然である (図5)。ここで用いている流星は顕著なエコーのものであるから、エコー強度は強くてもこの程度であることを示している。火球クラスの流星であっても、経路距離が 700km を超えるとエコー強度は 10 を下回ることが推測される。

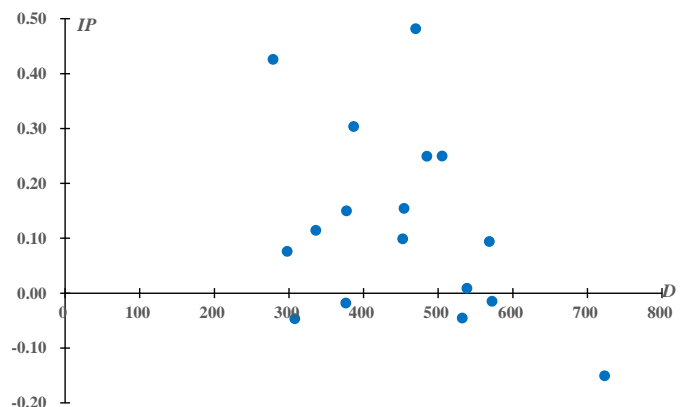


図3: 経路距離と IP との関係。

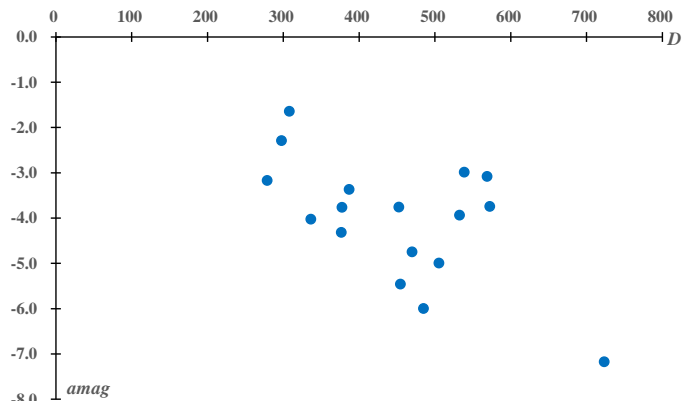


図4: 経路距離と流星の絶対等級。

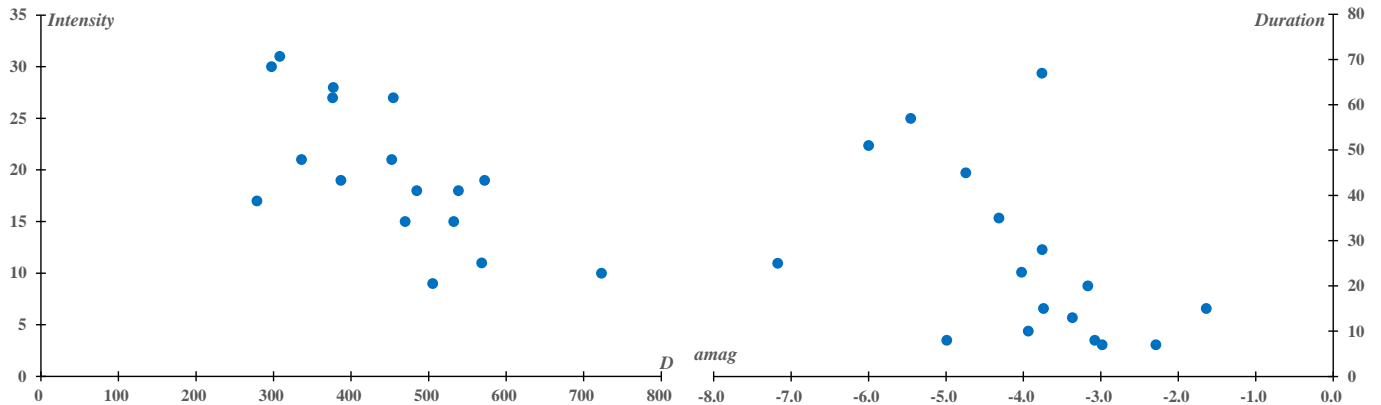


図5：経路距離とエコーの強度。

図6：絶対等級とエコーの継続時間。

当然、エコーの強度は絶対等級とも相関を持つが（図は省略する）、内積 IP との相関と同じ程度であり、エコーの強度は絶対等級よりも経路距離に強い相関を示している。

エコーの継続時間がエコー強度の大きいもの、絶対等級の明るいものほど長いことは当然と言える。ここでは絶対等級との関係を示すが（図6）、ここで扱っているのは顕著なエコーだけであるので、継続時間の短い $Dur.<5$ 、絶対等級で $amag>-2$ の領域は不明である。しかし、絶対等級が正となる一般的に眼視観測される光度の流星では継続時間が1秒に満たないことが示唆される。

3. 10月21日22時から22日5時までの観測

3. 1エコーとビデオ観測の同定基準

オリオン群の出現が多い表記の時間帯についてビデオ観測と HRO との対照を行った。オリオン群はロングエコーが見られるにもかかわらず、圧倒的多数は継続時間の短いエコーであった。また、2009年はオリオン群が非常に活発であったので、同時流星の判定には暫定的な基準が必要となった。

前回のふたご群について得た同時流星となる条件がロングエコーについての分析で確かめられたので、表記の時間帯に得られたエコーとビデオ流星について以下の条件を適用して同時流星を選択する。

- A. ビデオ観測とエコーの時間差 Δt が $-1\sim+10$ 秒の範囲内。
 - B. 流星経路と回転楕円体面の法線との内積 IP が小さいもの。
 - C. 経路距離が大きいとエコー強度が落ちるので、絶対等級が明るくないものは外す。
 - D. 重回帰分析により得られた絶対等級、内積、経路距離によるエコー強度及び継続時間推定値を参考とする（「4. オリオン群とふたご群の比較」を参照）。
 - E. 図7と8に見られるようなエコー画像の特徴（「スパイク」の有無等）を参考に最終決定をする。
- Aの条件を満たすエコーは79件あった。これらの候補を以下の判定基準で同時流星を判定することとした。
- A1. $\Delta t > 3$ 秒のものは火球クラスの流星に限る： $\Delta t < -0.8 \times amag + 2$ を目安とする。
 - B1. $IP < 0.1$ を基本とするが、経路距離が短い場合には、それ以上でも同時流星になり得る： $IP < -0.0005 \times D + 0.7$ を目安とする。
 - B2. 絶対等級が明るいものは $IP > 0.1$ でも同時流星になり得る： $IP < -0.08 \times amag + 0.3$ を目安とする。
 - C1. 経路距離が長いと絶対等級が明るくなければ同時流星にはならない： $amag < -0.005 \times D + 2$ を目安とする。

実際には、重回帰分析による推定から選択したものと A~C の基準で選択したものは必ずしも一致しない。基本的に絶対的な基準を設けることは不可能に近く、どうしても判定には主観の入る余地がある。この判定の曖昧さの問題について、具体的にいくつかの例を挙げ、問題点を指摘して今後の課題としたい。

表2：本文中の判定基準では除外されるが、「同時流星」と判定したもの。

HRO	I	$Dur.$	Video	Δt	$amag$	IP	D
225320	17	3	225318	2	-1.7	0.479	268
013105	8	3	013104	1	-1.5	0.406	267
022555	12	1	022553	2	-0.1	0.093	701
030053	24	2	030052	1	-1.4	0.325	532
045507	9	1	045507	0	-0.4	0.050	547

表3：本文中の判定基準では「同時流星」となるが、ここでは除外したもの。

HRO	I	$Dur.$	Video	Δt	$amag$	IP	D
004444	7	1	004445	-1	-2.2	-0.169	475
011208	8	1	011200	8	-3.1	-0.243	597
043717	8	1	043711	6	-5.2	-0.173	1113
043855	22	10	043846	9	-3.2	0.389	316
044031	9	1	044023	8	-2.9	0.204	463

表2と図7に基準ぎりぎりで「同時流星」と判定されたもの、表3と図8に基準ぎりぎりで「同時流星」とみなさなかったものを示す。ロングエコーの項で指摘したように、「スパイク」がみられる（エコー像が上下に伸びている）ものを優先した結果、表2と図7の4個を「同時流星」としている。表3と図8に示すものはすべて表2と図7のものより、絶対等級が明るいが、043855を除いて、エコー画像は貧弱である。このように「同時流星」として採択するか否かには主観が入り得る。問題点を整理しよう。

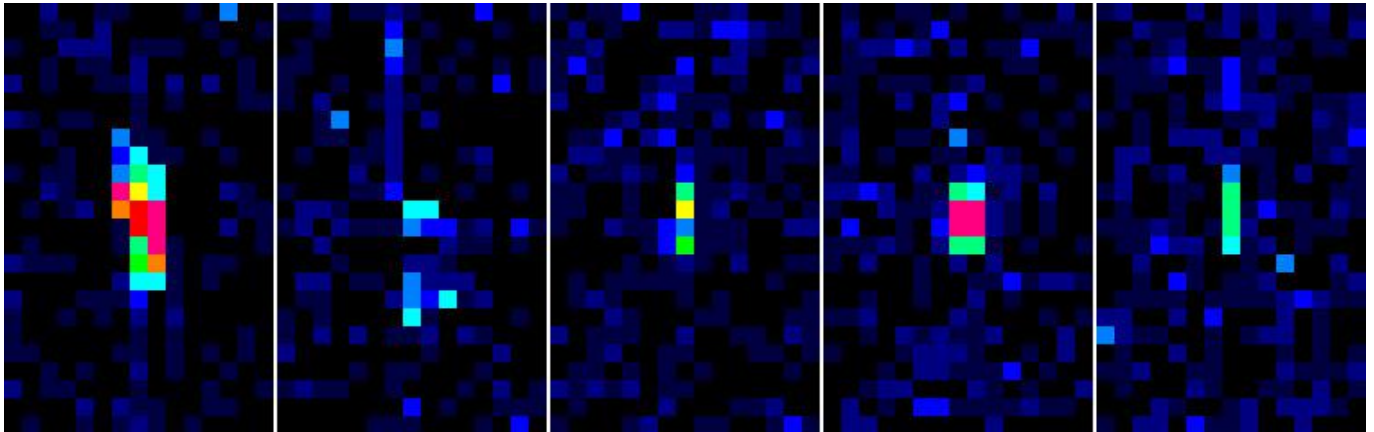


図7：本文中の判定基準では除外されるが、「同時流星」と判定したもの。左は225320。表2上からの順番。

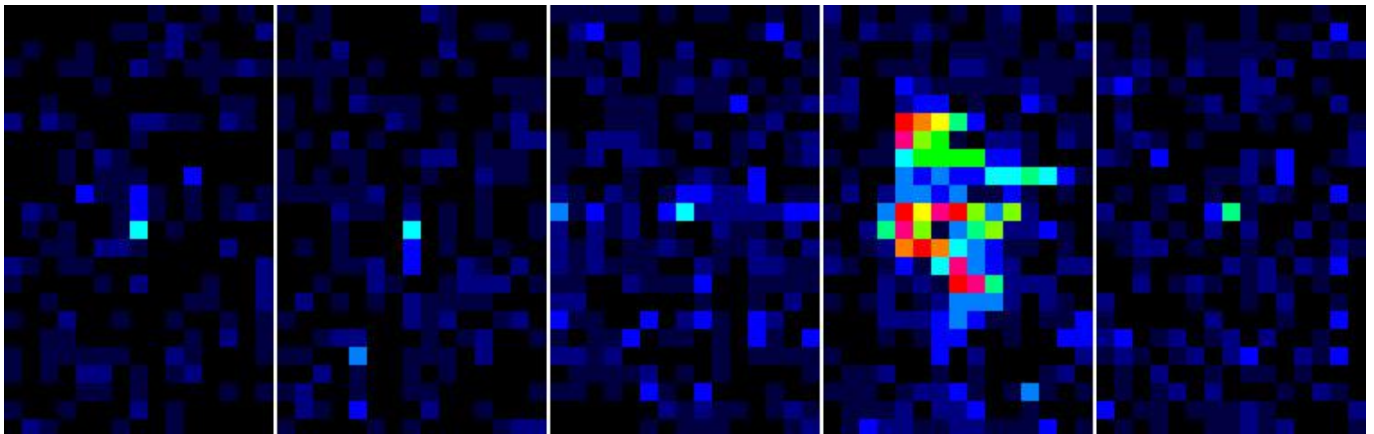


図8：本文中の判定基準では「同時流星」となるが、ここでは除外した。左は004444。表3上からの順番。

最初に指摘しておくべきは、HROFFTでエコー強度が10以上を流星エコーとカウントしているのに対して、本稿では強度10以下、場合によっては強度6のものもエコーと判定している。主観の入る余地が大いにあるとしても、バックグラウンド（雑音、飛行機等）の強さ・影響を考慮してどこまでエコーとするかを変え、また、ロングエコーの項で述べたように「スパイク」が流星エコーの特徴であるとして採用している。ここで除外した図8に示すようなものについては、流星エコーなのかという基本的な問題がある。

第二の問題は内積 IP がどの程度の大きさまで同時流星と認められるかである。経路距離が近く、絶対等級が大きいものはかなり大きな IP まで同時流星とみなせることはロングエコーの項でわかっているが、どこまでなのかは明らかではない。

第三の問題はビデオ観測と HRO の時間差 Δt をどこまで認めるかである。大流星で内積が大きいものは時間差がかなり大きくなることはわかっているが、これについてもどこまでなのかは明らかでない。

最後の問題はビデオ観測の光度にも多少の誤差があり、HRO で捉え得る流星の経路距離の限界も定かでないため、流星エコーなのか雑音なのか判定に曖昧さが残ることである。

図8に示したように、除外したものの画像は043855を除いて、雑音に近いものである。「同時流星」と判定したものは、それらよりいくらか流星エコーらしい。ここで043855を除外した理由は、時間差 Δt の問題であり、内積と絶対等級の関係の問題である。043855はビデオで同時観測が成立しなかったものであろう。

いずれにせよ、ビデオ観測と HRO での同時判定には今後の課題が残っている。

3. 2. HRO から見たオリオン群

検討の結果34個のHROとビデオの「同時流星」を見出した。例として4時台に同時と判定された流星(●)とSonotaCoネットのみで捉えられた流星(×)の経路のそれぞれ中間点の分布を示す(図9)。図中で250~500の数字を添えた楕円弧は $IP < 0.1$ となる地点を結んだものである(数字は回転楕円体の長半径 a の値を示しており、およそこの値の2倍が経路距離 D にあたる)。同時判定された流星の多くがこの楕円弧で示された $IP < 0.1$ の範囲内にあることが分かる。範囲外にある同時判定された流星は $IP > 0.1$ ということになるが、内側、すな

わち、観測点から近いところにもかなりの数、ビデオのみで観測された流星が分布している。250km の楕円弧の内側では $IP < 0.1$ になる領域が存在しない（正確には $a < 235\text{km}$ では $IP < 0.1$ となる地点が存在しない）のである。また、 $IP < 0.1$ の範囲に存在してもエコーが観測されていない流星が多数ある。これは距離が遠くなるとエコーの強度が弱くて検出できなくなるためであろう。

エコーの継続時間と強度の分布、エコー数と輻射点高度の関係については「4. オリオン群とふたご群の比較」で述べることにして、「2. ロングエコー」の項で指摘した諸関係が一般的なエコーでどのようなものかを見ていこう。基本的にはロングエコーは火球クラスの流星が多いのに対して、ここで扱う流星はそれらよりも暗いものが多いという違いがある。しかし、ほぼ、ロングエコーの項で指摘した諸関係をここでも確認することができた。要点は以下の通り。

- ・観測の時間差と IP の絶対値：ロングエコーの場合よりも相関は弱くなるが、基本的に IP が大きいと時間差が大きくなる傾向は存在する。
- ・経路距離と流星の絶対等級：ロングエコーの場合よりもエコー強度の小さいものを含めているので、関係は弱くなるが、経路距離が大きくなると暗い流星のエコーは捉えられていない。

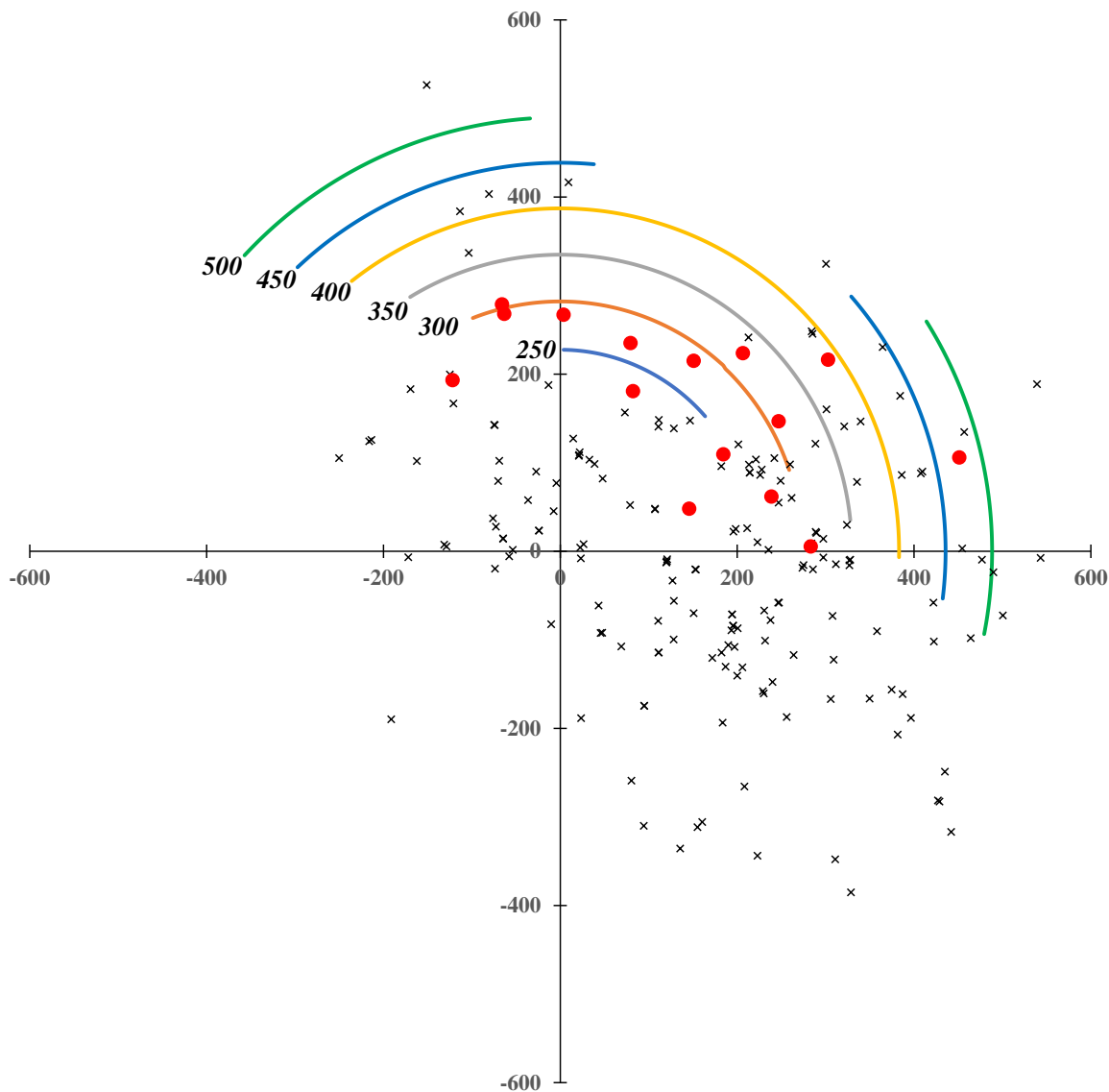


図 9：4 時台における同時判定された流星の分布。福井と四日市を結ぶ線が y 軸でほぼ南北方向にあたり、原点はその中間点。目盛りの単位は km である。

- ・経路距離と IP の関係：強い関係が存在することが明らかで、 IP が大きい場合には経路距離が短くないとエコーは観測されないことが明らかである。
- ・経路距離とエコーの強度：流星の絶対等級よりも直接的で、明確に経路距離が大きくなるとエコー強度は小さくなり、絶対距離が 700km を超えると HROFFT でエコー強度が 10 を超えて流星とカウントされることは稀と考えられる。
- ・絶対等級とエコーの継続時間：ロングエコーの場合よりも絶対等級が -3 よりも暗いものの割合が圧倒的に多く、この範囲では継続時間が 5 秒以下のものがほとんどである。そのため、絶対等級とエコーの継続時間は 2 次関数で表され、明るいものでは直線近似の場合よりも長くなるようにも見える。

グラフは省略するが、代わりにエコー画像の比較で絶対等級 $amag$ 、経路距離 D 、内積 IP によりエコー画像がどのような違いを見せるかを示すことにする。

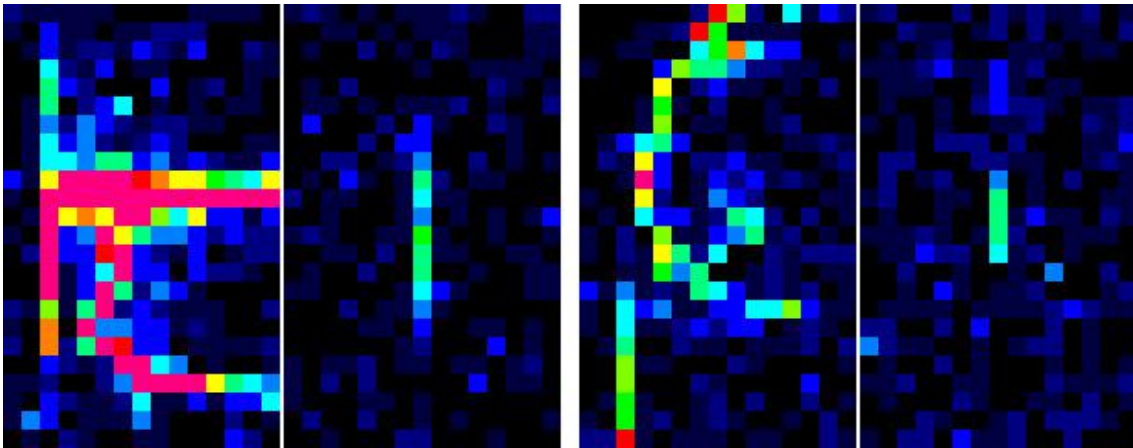


図 10：経路距離と内積 IP がほぼ等しい場合の絶対等級によるエコー画像の違い。左から順番に 012428 と 015340、020110 と 045507。

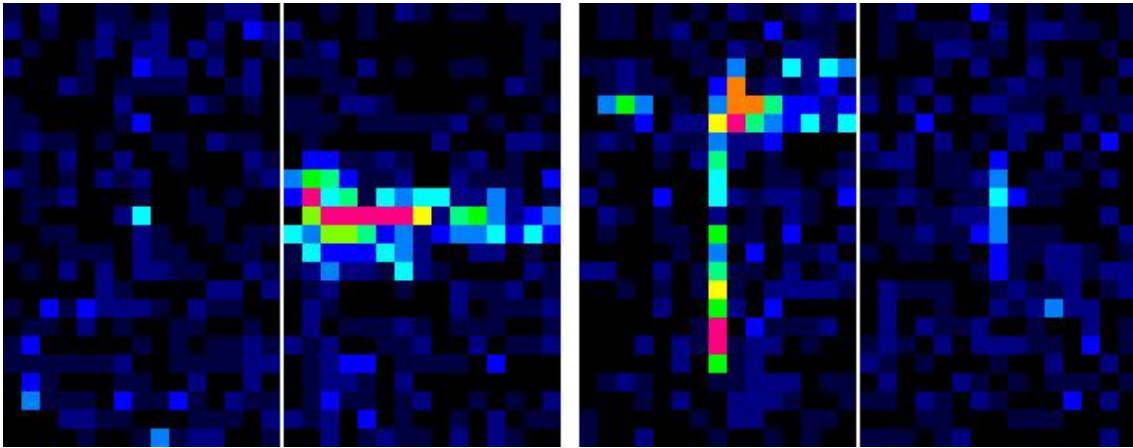


図 11：絶対等級と内積 IP がほぼ等しい場合の経路距離によるエコー画像の違い。左から順番に 024845 と 040428、034636 と 041600。

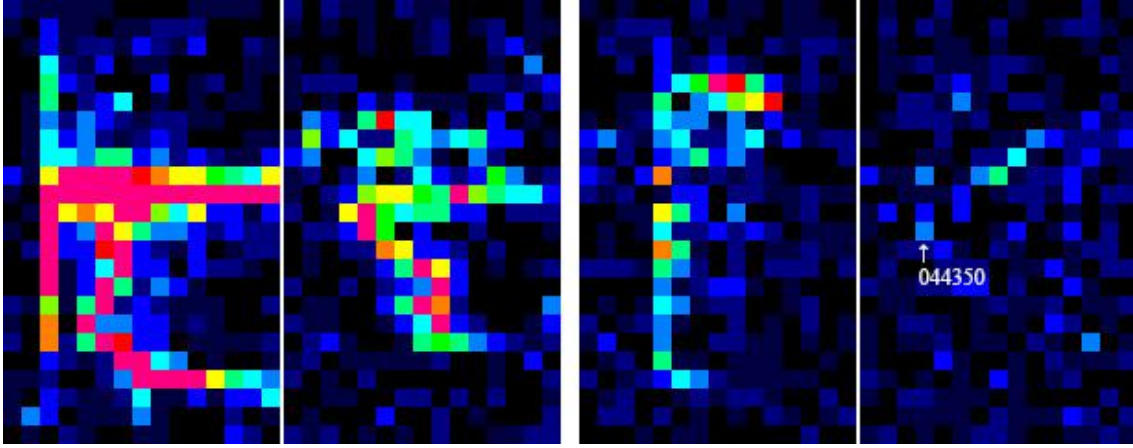


図 12：絶対等級と経路距離がほぼ等しい場合の内積 IP によるエコー画像の違い。左から順番に 012428 と 044402、043449 と 044350。

図 10～12 は絶対等級 $amag$ 、経路距離 D 、内積 IP による違いをそれぞれ 2 組の画像で示しているが、流星の詳しい資料は表 4 を参照されたい。

絶対等級が明るいほどエコーの強度が強くなるが、それよりもエコーの継続時間が長くなるのが特徴的である (図 10)。エコー強度に最も強く影響するのは経路距離である (図 11)。図 11 の流星は絶対等級が $-4.0 \sim -3.3$ であるが、024845 ($D=873\text{km}$) と 041600 ($D=956\text{km}$) のエコー強度 I はともに 6 に過ぎない。HROFFT の判定では流星エコーとは判定されないレベルにしかない (表 4)。内積 I が小さい流星のエコーには特徴的な「スパイク」が見られる (図 12)。また、内積 I が小さい場合には観測の時間差 Δt も小さく、012428 と 043449 はそれぞれ、0 秒、1 秒である。図 10 と図 11 のエコーも内積 I が小さいので、040428 を除いて、同様のことが見られる。

表 4 : 同時判定されたエコ画像の比較。Hm は流星経路の中間点の高度、L は流星の経路長。図は画像を示した図番号。その他の記号は表 1 と同じ。

HRO	<i>I</i>	<i>Dur.</i>	Video	Δt	<i>amag</i>	<i>Hm</i>	<i>L</i>	<i>D</i>	<i>IP</i>	class	<i>Vg</i>	図
012428	26	35	012428	0	-4.3	103	34.7	376	-0.018	ORI	67.5	10
015340	9	1	015339	1	-1.0	107	11.8	369	0.000	ORI	66.0	10
020110	14	10	020109	1	-3.9	103	27.7	532	-0.045	ORI	67.3	10
045507	8	1	045507	0	-0.4	105	9.8	547	0.050	ORI	65.7	10
024845	6	1	024843	2	-3.8	100	24.2	873	0.002	ORI	64.2	11
040428	18	15	040427	1	-3.7	101	18.8	572	-0.015	ORI	65.5	11
034636	15	4	034634	2	-3.3	100	23.8	574	-0.022	ORI	66.2	11
041600	6	1	041557	3	-4.0	104	20.1	956	-0.016	ORI	66.2	11
012428	26	35	012428	0	-4.3	103	34.7	376	-0.018	ORI	67.5	12
044402	18	13	044356	6	-3.4	104	26.8	387	0.304	ORI	67.4	12
043449	17	7	043448	1	-3.0	101	22.4	539	0.009	ORI	65.6	12
044350	8	8	044344	6	-5.0	101	25.8	505	0.250	ORI	66.9	12

3. 3. ビデオ観測から見たオリオン群

同じ時間帯でビデオ観測によって捉えられたオリオン群の特徴を見ておこう。図 1 3 ~ 1 5 は 22 時からの経過時間を横軸にして、SonotaCo ネットによってオリオン群と判定された流星の平均高度、経路長、絶対等級の変化を示したものである。これらはいずれも、経過時間順に並べた流星の 5 個ごとの移動平均である。

図 1 3 から、時間経過とともに平均高度が下がる様子が示されている。これは時間経過とともに輻射点高度が上がり、大気層に対する突入角が大きくなることによる。また、図 1 4 は経路長を示しているが、平均高度と同様に突入角が大きくなることによって急激に大気密度が高まるためである。これに対して、流星の絶対等級は図 1 5 に示すように時間経過による大きな変動はない。

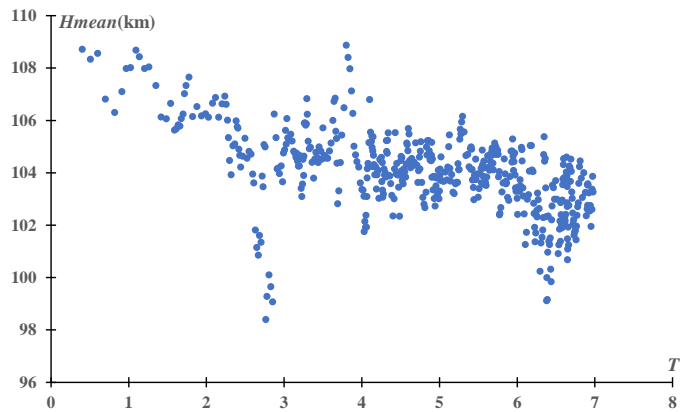


図 13 : 22 時からの経過時間と流星経路中間点の高度。

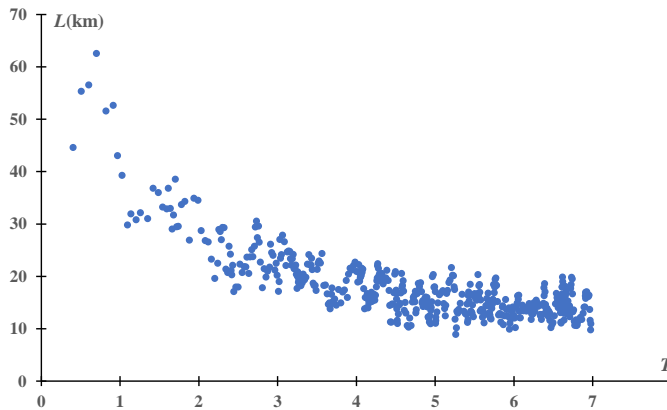


図 14 : 22 時からの経過時間と流星の経路長。

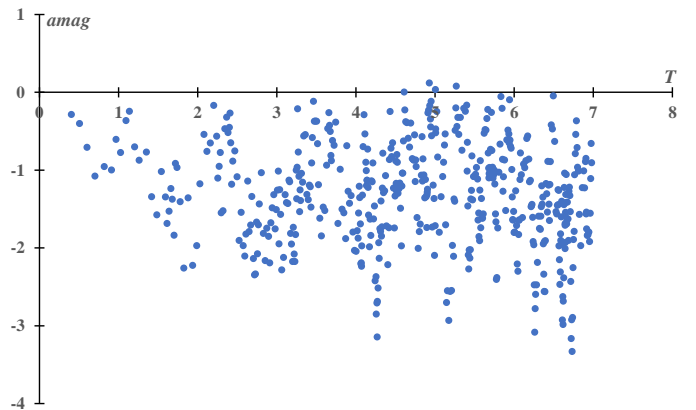


図 15 : 22 時からの経過時間と流星の絶対等級。

4. オリオン群とふたご群の比較

SonotaCo ネットによって捉えられる流星の絶対等級分布を図 1 6 に示す。オリオン群は 2009 年 10 月 21 日 22 時から 22 日 5 時まで、ふたご群は 2018 年 12 月 14 日 19 時から 15 日 5 時までの観測である。HRO では散在流星と群流星の判別ができないため、ビデオ観測も散在流星と群流星を合わせている。これは 0.1 等級刻みで 0.5 等級幅の移動平均であり、観測された流星の総数に占める割合を表している。オリオン群が 2009 年、ふたご群が 2018 年の観測であるが、ほとんど分布に違いはない。これが 2 地点以上で同時にビデオ観測される流星の等級分布を示すものと言える。-1 等級付近に極大があり、それより暗い流星数の減少は使用されている CCD カメラの性能の一般的な限界を示すものと考えられる。

図 1 7 は図 1 6 と同じ観測時間帯におけるエコの受信強度の分布を全流星数に対する割合として示したものである。オリオン群とふたご群の観測は 10 年の時を隔てているので、機器の違いの問題とも考えられるが、オリオン群は強度の低いものの割合が多い。

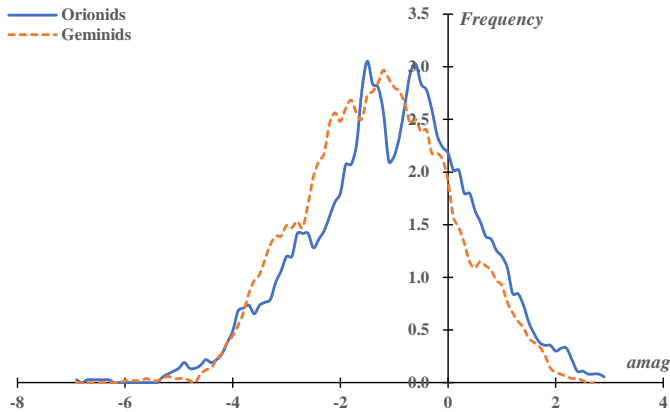


図 16：ビデオ観測された流星の絶対等級分布。

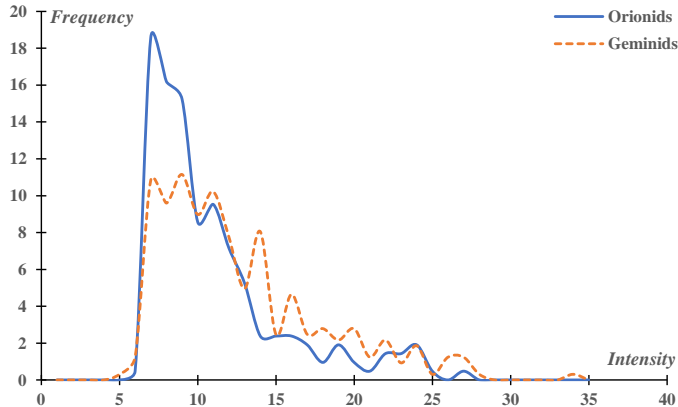


図 17：エコーの強度分布。

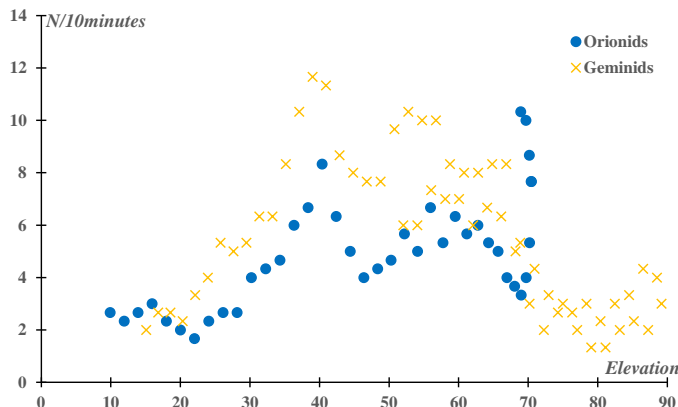


図 19：輻射点高度によるエコー数の変化。

加しているのは、ビデオ流星でも増加していることから、オリオン群自体の活動が活発化したためと考えられる。これを除くと、輻射点高度が 40 度あたりまでは増加し、その後減少する傾向はともに共通している。しかし、HRO のエコー数はオリオン群がふたご群に比べて全体的に少ない (図 19)。これはオリオン群の出現が少なかったためではない。ビデオ観測によればオリオン群とふたご群の流星数はほぼ数的にも匹敵し、輻射点高度に対して同様な変化を見せることが分かる (図 20)。

図 21 は輻射点高度を横軸に、ビデオ観測された流星数に対する HRO のエコー数の比を縦軸にとったものである。基本的にエコー数はビデオ流星と比較すると、輻射点高度が上がるに従って減少することが分かる。

オリオン群は輻射点高度が最高で 70 度、ふたご群はほぼ 90 度になって、それぞれその後再び下がるためグラフが折り返している。オリオン群は全体的に

図 17 と同じ観測時間内におけるエコーの継続時間の全体に対する割合を図 18 に示す。継続時間は機器にあまり影響されないと考えられ、オリオン群で継続時間短い 1 秒の割合が圧倒的であることは注目される。

図 19 と図 20 は、輻射点高度を横軸にとって、それぞれ HRO のエコー数とビデオ観測の流星数の変化を示したものである。10 分間におけるエコー数及び流星数の 30 分ごとの移動平均を示している。輻射点高度は、輻射点の位置をオリオン群は $(\alpha, \delta) = (95, 15)$ 、ふたご群は $(\alpha, \delta) = (110, 35)$ とし、発信点と受信点の中央におけるものである。

輻射点高度が 70 度を過ぎたあたりでエコー数が増

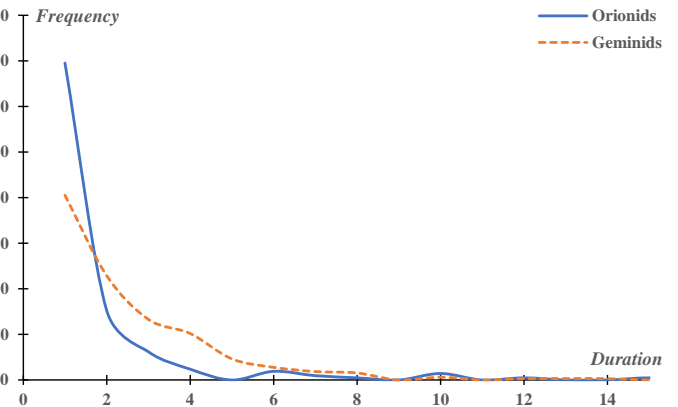


図 18：エコーの継続時間の分布。

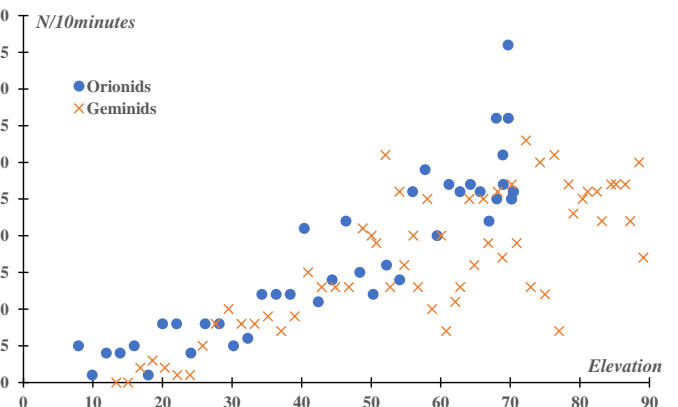


図 20：輻射点高度によるビデオ流星数の変化。

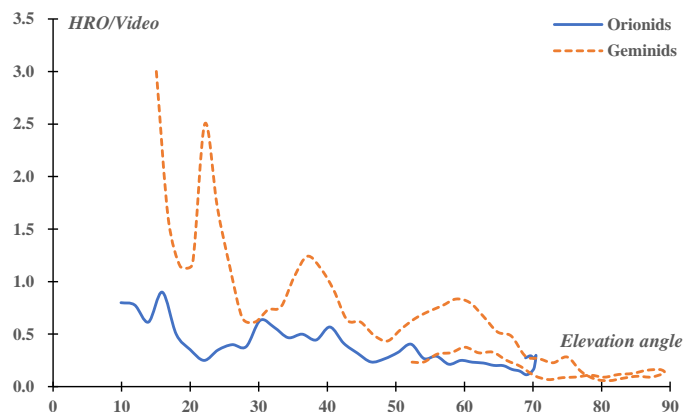


図 21：ビデオ観測に対する HRO エコー数の比の輻射点高度による変化。

ふたご群よりも低い値となっているが、これはビデオ観測に対する比であり、見せかけのものではない。特にオリオン群はふたご群よりも輻射点高度が低い時にはHROでのエコー数が著しく少ないことが分かる。

絶対等級が同じであれば、流星の経路長が長い方がエコーを捉えやすいと考えられる。しかし、オリオン群のビデオ流星の経路長は輻射点高度が低いほど長く、また、絶対等級は輻射点高度と無関係であるにもかかわらず、輻射点高度の低い時間帯のエコー数は少ない。「3. 3. ビデオ観測から見たオリオン群」で指摘したように、オリオン群のビデオ流星の高度は輻射点高度が低いほど高い。輻射点高度が低いとオリオン群のエコー数がふたご群に比べて少なくなることは、ビデオ流星の高度変化に関係していると考えられる。高度が高くなるとエコー数が少なくなる原因として考えられるのは、電離層の影響である。

5. 検討

表5 a と表5 b に本稿でビデオ観測と同時と判定されたエコーの組み合わせについて、エコー強度と経路距離 D 、絶対等級 $amag$ 、流星経路と回転楕円体面の法線との内積 IP との間の重回帰分析を行った結果から $IP=0.1$ を仮定して、エコー強度を推定したものを示す。同様にエコーの継続時間についても推定したものが表6 a と表6 b である。ともに-は推定値が負となる場合である。

表5 a : 経路距離 D と絶対等級 $amag$ によるオリオン群のエコー強度の推定値 ($IP=0.1$ を仮定)。

$D(km)$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
200	20.7	19.9	19.1	18.3	17.4	16.6	15.8	15.0	14.1	13.3	12.5
300	18.7	17.8	17.0	16.2	15.4	14.5	13.7	12.9	12.1	11.2	10.4
400	16.6	15.7	14.9	14.1	13.3	12.4	11.6	10.8	10.0	9.1	8.3
500	14.5	13.7	12.8	12.0	11.2	10.3	9.5	8.7	7.9	7.0	6.2
600	12.4	11.6	10.7	9.9	9.1	8.3	7.4	6.6	5.8	5.0	4.1
700	10.3	9.5	8.6	7.8	7.0	6.2	5.3	4.5	3.7	2.9	2.0
800	8.2	7.4	6.6	5.7	4.9	4.1	3.3	2.4	1.6	0.8	-

表5 b : 経路距離 D と絶対等級 $amag$ によるふたご群のエコー強度の推定値 ($IP=0.1$ を仮定)。

$D(km)$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
200	18.2	18.7	19.3	19.8	20.3	20.9	21.4	21.4	22.5	23.0	23.6
300	15.6	16.2	16.7	17.2	17.8	18.3	18.8	18.8	19.9	20.5	21.0
400	13.1	13.6	14.1	14.7	15.2	15.7	16.3	16.3	17.4	17.9	18.4
500	10.5	11.0	11.6	12.1	12.7	13.2	13.7	13.7	14.8	15.3	15.9
600	7.9	8.5	9.0	9.6	10.1	10.6	11.2	11.1	12.2	12.8	13.3
700	5.4	5.9	6.5	7.0	7.5	8.1	8.6	8.6	9.7	10.2	10.8
800	2.8	3.4	3.9	4.4	5.0	5.5	6.1	6.0	7.1	7.7	8.2

表6 a : 経路距離 D と絶対等級 $amag$ によるオリオン群のエコー継続時間の推定値 ($IP=0.1$ を仮定)。

$D(km)$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
200	18.3	14.4	10.6	6.8	2.9	-	-	-
300	16.1	12.3	8.5	4.6	0.8	-	-	-
400	14.0	10.1	6.3	2.5	-	-	-	-
500	11.8	8.0	4.2	0.3	-	-	-	-
600	9.7	5.9	2.0	-	-	-	-	-
700	7.6	3.7	-	-	-	-	-	-
800	5.4	1.6	-	-	-	-	-	-

表6 b : 経路距離 D と絶対等級 $amag$ によるふたご群のエコー継続時間の推定値 ($IP=0.1$ を仮定)。

$D(km)$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
200	10.9	9.5	8.1	6.7	5.3	3.9	2.5	1.1
300	9.9	8.4	7.0	5.6	4.2	2.8	1.4	0.0
400	8.8	7.4	5.9	4.5	3.1	1.7	0.3	-
500	7.7	6.3	4.9	3.4	2.0	0.6	-	-
600	6.6	5.2	3.8	2.4	0.9	-	-	-
700	5.5	4.1	2.7	1.3	-	-	-	-
800	4.4	3.0	1.6	0.2	-	-	-	-

ふたご群では絶対等級が暗くなるほどエコー強度が強くなる推定になっているなど、この重回帰分析の結果が不十分であることは明らかである。しかし、今まで述べてきたように経路距離 D 、内積 IP 、絶対等級 $amag$ 、エコー強度 I 、エコーの継続時間 $Dur.$ の間には明らかな相関がある。従って、表5 a ~ 6 b によって全体的な傾向を示すことができていると考えてよいであろう。

エコーの強度も継続時間もともに経路距離 D により減少する。4等級の火球であっても経路距離 D が800km になると、エコー強度が10を下回り、HROFFTでは流星エコーとして計数されないと考えられる。経路距離 D は発信点・流星・受信点を結んだ距離であるので、およそ観測点から流星までの距離の2倍程度である。従

って、観測点から 400km 程度離れた-4 等級の火球はもはや HROFFT では流星として認められない。広い範囲の観測点から共通して観測されるエコーはそれ以上の明るさの流星であろう。

オリオン群とふたご群で多少の違いはあるが、経路距離が 300km 以内であれば、ともに絶対等級 6 等級の流星でも HRO で観測されるエコー強度になることが推定される。一方、エコーの継続時間に関しては、ふたご群であっても、ごく観測点に近い経路距離が 200km の場合で 3 等級の流星の継続時間が 1 秒となるに過ぎないことが推定される。しかし、HROFFT の時間解像度が 1 秒であり、継続時間が 1 秒以下でも、ある程度のエコー強度があればエコーとして認識され得るであろう。これらのことを合わせると、HRO で観測される流星は経路距離が 300km 以内で、経路が回転楕円体面に沿うものでも 3~4 等級が限界と考えられる。HRO が眼視観測とほぼ同じ領域の流星を観測しているという推定を裏付けるものと言える。

また、オリオン群のエコーの強度と継続時間は絶対等級 $amag$ が-2 等級より明るい場合にはふたご群よりも上になるが、それより暗くなると、ふたご群に比べて急速に小さくなることを示される。これは前項で述べたように、オリオン群は多少なりとも電離層による影響を受けているためと考えられる。高速の流星では高度が 100km より高くなって E 層に入り込むため、HRO では検出されにくくなるのであろう。

6. まとめ

6. 1. エコーの判定基準

記録された画像を流星エコーと判断する基準は曖昧であるが、次の暫定的な基準が使用できるであろう。

- (1)画像が「スパイク」状のものであれば、流星エコーである。
- (2)画像に「スパイク」がなく、「痕跡」状のもので、継続時間が 5 秒以上あれば、流星エコーである。
- (3)上の 2 つのいずれかを満たせば、エコー強度が 10 未満でも流星エコーである。
- (4)画像が滑らかな曲線を描くものはエコー強度が 10 以上でも飛行機や周囲からの雑音電波である。

流星エコーとビデオ流星の同定基準も曖昧であるが、暫定的な基準として次のものが提起される。

- (1)HRO の時刻とビデオ流星の時刻の差が短いこと ($\Delta t < -1 \sim +10$ 秒)。
- (2)経路距離が短くても ($D < 300\text{km}$)、絶対等級が明るい ($amag < 0$) こと。
- (3)経路距離が 500km を超えたら、内積 $IP < 0.1$ で火球クラスであること。
- (4)経路距離が中間程度 ($300 < D < 500$) の場合には、 $\Delta t < +3$ 秒であること。

6. 2. オリオン群の特性

オリオン群のエコーは内積 IP が小さい時に明瞭な「スパイク」を示す。同程度の内積、光度のふたご群の流星ではあまり見られない現象である (図 2 2 と表 7)。高速の流星で特徴的に見られる現象と思われる。

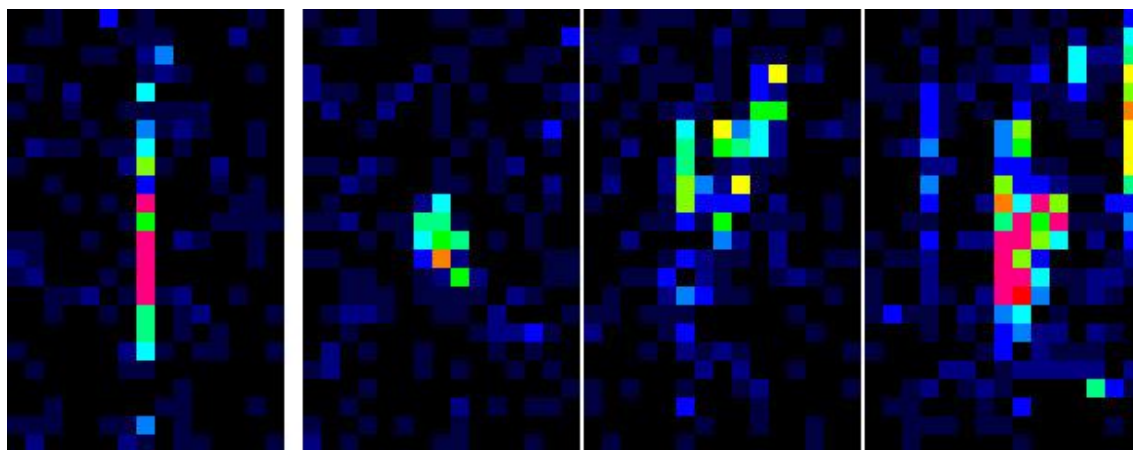


図 22 : オリオン群のエコーとふたご群のエコーの比較。左端がオリオン群のエコー。

表 7 : オリオン群のエコーとふたご群のエコーの比較。図 2 2 の左から右への順番で示した。

HRO	I	$Dur.$	Video	Δt	$amag$	Hm	L	D	IP	class	Vg
234739	22	1	234738	1	-2.1	106	35.4	319	-0.069	ORI	66.8
230825	13	3	230821	4	-2.1	80	35.7	299	0.267	GEM	33.0
042220	12	6	042218	2	-2.4	82	31.7	329	0.117	GEM	33.2
045757	20	5	045755	2	-1.6	87	26.1	315	0.124	GEM	34.8

また、オリオン群のエコーは継続時間が短いものが多い。オリオン群の流星の高度は 100km 以上であり、ふたご群よりも 20km 以上高い (表 7)。特に輻射点高度が低いときには、流星の高度が高くなり、エコー数がふたご群に対してビデオ流星との比で少なくなる。オリオン群のエコーは電離層の影響を受けているためと考えられる。

本稿で得られたものは、発信点が福井・鯖江、受信点が四日市 (アンテナ天頂) という環境で得られたものであり、必ずしも一般化できるものではない。他の条件でどのような結果が得られるのか検証する必要がある。