

## 要約

HRO によって捉えられる流星は発信点と受信点を焦点とする回転楕円体面上に出現したものであることが確かめられた。日本ではふたご群の輻射点は午前 2 時頃にほぼ天頂を通過する。従って、夜半前には福井-四日市を結ぶ基線から西側に出現したふたご群の流星が、また、夜明け前には基線の東側に出現したふたご群の流星が HRO で観測されている。また、ふたご群の輻射点は北東から天頂を通過して北西に回るため、HRO で捉えられている流星は主として福井-四日市の間中点（伊吹山付近）から南側に出現したものである。

HRO で観測されるふたご群の流星は、輻射点の天頂通過の前後 2 時間は少ないが、これは遠方の流星からの電波反射を捉えるためであり、輻射点の天頂通過時刻から離れるにしたがって基線に近い流星を捉えている。今回の調査では HRO により検出される流星のほとんどは福井-四日市の中間点を中心としてほぼ 300km 以内のものであることが分かった。

調査した日時では、ふたご群の流星に由来すると思われる「ロングエコー」は見いだされなかった。ほとんどのふたご群の流星は HRO の継続時間が数秒以下であり、これはふたご群を形成する流星体の組成に関係するものかもしれない。

## 1. はじめに

小関は先に HRO の観測は眼視観測に近い特性を持つことを指摘し、HRO の受信条件についても述べた。本稿では、年間を通して HRO とビデオ観測で最も活発な出現が観測される「ふたご群」を例として、HRO とビデオで共通して捉えられる流星がどのようなものであるかを確認する。

ふたご群の輻射点は本州のほぼ天頂を通過し、しかも、福井-四日市がほぼ南北に位置するため、流星の経路と受信条件を探るのに非常に適しており、結果も明快であることが期待される。

本稿では、2018 年 12 月 13~15 日に藤戸により観測された HRO のエコーと SonotaCo ネットにより軌道決定された流星を比較し、HRO で捉えられるエコーがどのような流星によるものであるか検討する。

## 2. 調査方法

### (1)HRO の記録画像における流星の出現時刻の読み取り

HROFFT で記録される画像は 629×400 ピクセルの画像で、ほぼ 1 ピクセルが 1 秒に相当する。エコーは一般に数ピクセルの広がりを持って記録されているため、広がりの中の最初の部分を出現時刻と判定した。時刻の読み取り精度はパソコン自体の精度にもよるが、基本的には±2 秒以内と考えられる。画面からの読み取りには ImageJ を使用した。

### (2)対応するビデオ流星の検索

HRO で観測された時間帯における SonotaCo ネットによるビデオ観測を参照し、HRO のエコーと対応する流星を検索する。結果的には、HRO で記録された時間はビデオ観測と 0~+2 秒以内で一致した。

### (3)回転楕円体面の計算

ビデオ観測された流星経路の中点を通る基線（次項参照）を軸とする回転楕円体面を求め、回転楕円体の長軸を  $a$ 、短軸を  $b$  で表す。また、流星経路の中点において回転楕円体面に直交する直線と流星経路の内積 (inner product= $IP$ ) を求める。

### (4)SonotaCo ネットにより記録された流星経路の投影図作成

発信点と受信点を結ぶ線（基線）の中央を  $\lambda=136.446$ 、 $\phi=35.535$  とし、基線は南北方向に反時計回りに 13.1 度傾いているが、経度方向を  $x$ 、緯度方向を  $y$  で表すことにし、近似的に地表面を平面として扱った（正射図法）。 $x$ - $y$  面に投影した流星経路、また、流星の高度を  $H$  として  $x$ - $H$  面に投影した流星経路図を作成する。

## 3. ふたご群の輻射点高度による HRO とビデオ観測における流星数の違い

ふたご群の輻射点は観測点付近でほぼ天頂を 2 時頃に通過する。この時間に HRO では「天頂効果」によってエコー数が減少し、一方でビデオ観測では撮影される流星数が極大となる。この輻射点为天頂を通過する時間帯、15 日 02:00~10m における HRO の記録とビデオ観測を最初に比較してみよう。

### 3. 1. ふたご群の輻射点为天頂を通過する時間帯の HRO とビデオ観測

図 1 に KF1812150200 の観測画面を示す。HROFFT での計数は 2 個となっているが、飛行機によると思われるものを除いて、次に示す時刻に流星が記録されたものとした (hh は時、mm は分、ss は秒)。

hhmmss=020002, 020255, 020335, 020458, 020824, 020947

これに対して、SonotaCo ネットによって同じ時間帯に記録された流星は 27 個ある

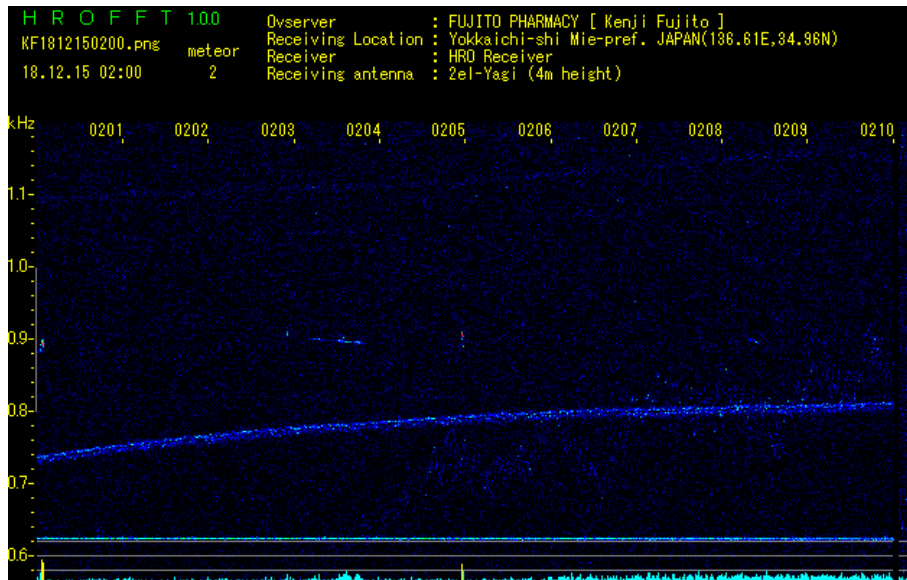


図 1：輻射点が天頂を通過する時間帯の HRO 画像。

hhmss=020017, 020138, 020203, 020204, 020205, 020208, 020218, 020331, 020335, 020403, 020451, 020452, 020540, 020604, 020609, 020610, 020610, 020658, 020740, 020754, 020813, 020859, 020901, 020922, 020924, 020928, 020933

このうち、ビデオ観測で 020658, 020933 (以下、ビデオ観測の時刻には HRO の時刻と区別するために下線を付す) の 2 個を除いては「ふたご群」という判定になっている。輻射点が天頂を通過することによって、ビデオ観測ではこれほど多くのふたご群の流星が捉えられている。しかし、HRO とビデオ観測で同定できるものは 1 つもない。ここで 2 つの疑問が生じる。

A. ビデオ観測されたふたご群の流星が HRO で捉えられないのはなぜか。

B. HRO で捉えられたエコーがビデオ観測されないのはなぜか。

「A」の疑問については、よく知られているように HRO で観測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接して飛来するものであることによる。ふたご群の夜半前後の観測の比較によって、このことが非常に明確に示される。「B」については次章で検討する。

### 3. 2. 夜半前のふたご群の観測

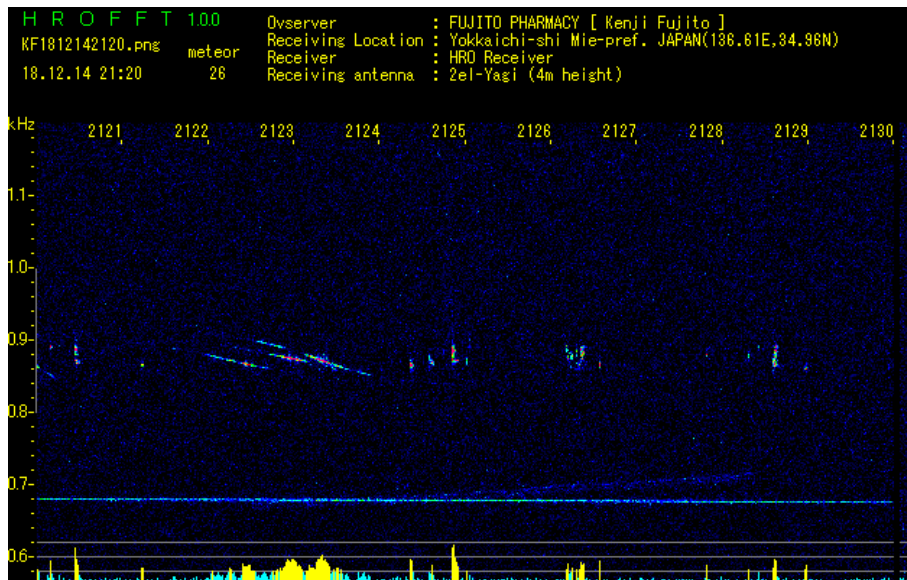


図 2：輻射点が天頂を通過する前（夜半前）の HRO 画像。

14 日 21:20~30m の観測を例にとる (図 2)。HROFFT の計数には明らかに飛行機によると思われるものが含まれているので、独自に次の 16 個を流星と判定した。

hhmss=212010, 212027, 212113, 212421, 212434, 212450, 212501, 212610, 212618, 212620, 212634, 212748, 212818, 212825, 212835, 212857

SonotaCo ネットで観測された同じ時間帯のふたご群と判定された流星は以下の 9 個である。

hhmss=212238, 212321, 212322, 212330, 212408, **212434**, **212450**, 212522, **212835**

太文字にした 3 個が HRO の観測と同定される。他の時間帯の観測比較によっても、HRO とビデオ観測で同定される流星の時刻は HRO 側に 0~2 秒の遅れがある範囲内である。この時間帯で 6 個のふたご群流星が HRO で捉えられていないことになるが、これには明確な理由がある。

図3にビデオ流星の経路を平面図と立面図で示す。平面図を見ると  $y$  軸より右側、つまり、中部、関東圏を飛行した流星が多い。これは SonotaCo ネットの観測者分布による。立面図を見ると夜半前のふたご群流星は東から飛来し、西下がりとなり、 $y$  軸方向（発信点と受信点を結ぶ線上）より西側でエコーを観測できることが理解できる。夜半前に  $y$  軸より東側、中部、関東圏を飛行するふたご群流星は福井・四日市という組み合わせでは観測不能であることが明らかである。

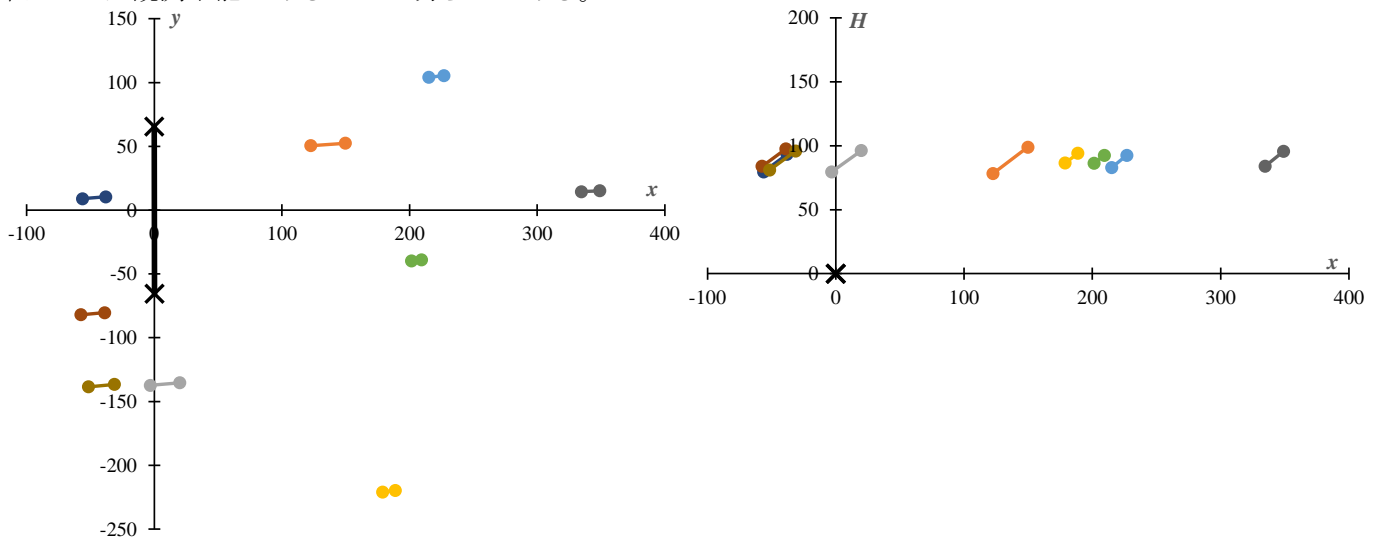


図 3 : 夜半前(21:20~30m)のふたご群流星の飛跡。左が地表面への投影図、右が  $x-H$  面への投影図。

### 3. 3. 夜半後のふたご群の観測

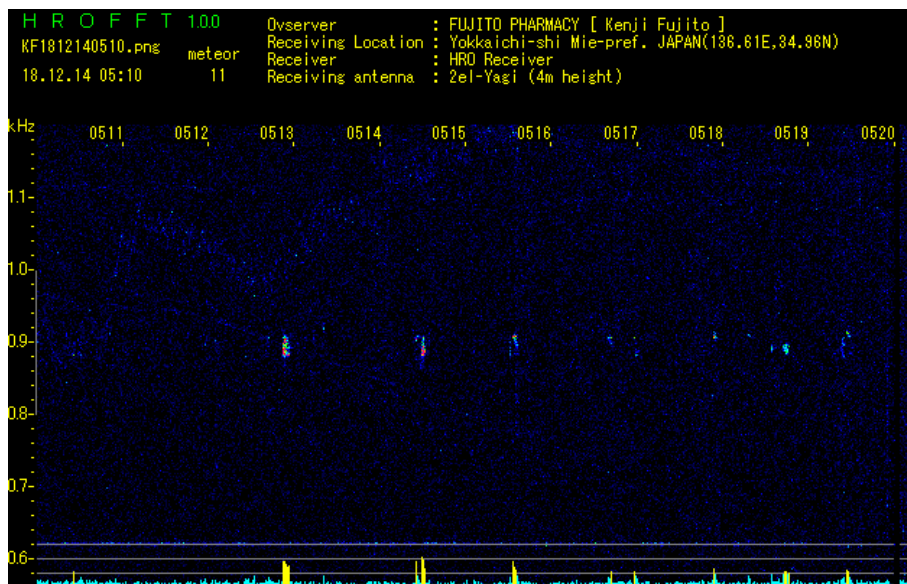


図 4 : 輻射点が天頂を通過した後（夜半後）の HRO 画像。

14日 05:10~20m の観測を例として示す（図4）。以下の13個のエコーを流星とした。  
 hhmmss=051026, 051252, 051321, 051425, 051429, 051533, 051640, 051658, 051753, 051818, 051834, 051842, 051927  
 この時間帯に得られた SonotaCo ネットの流星は次の10個である。  
 hhmmss=051015, 051015, 051246, **051251**, 051314, **051425**, 051515, 051652, 051810, **051926**  
 このうち、太文字にした3個の流星が HRO のエコーと同定される。  
 夜半前とは逆に、ふたご群の流星は東下がりとなり、HRO で観測される流星は基線の東側ということになる（図5参照）。しかし、東側であれば、すべて HRO で受信できるかというところではない。同定される3個の流星は  $x-H$  図で  $H$  軸の右側 2~4 番目のものである。一番  $H$  軸に近いものは  $x-y$  図で一番上側に離れたものであり、 $H$  軸からある程度離れたものと同様に HRO では捉えられていない。よく知られているように、HRO で観測されるエコーの多くは発信点と受信点を焦点とする回転楕円体面に接して飛来する流星による。HRO で捉えられる流星とそうでない流星の違いを  $x-H$  図を拡大して、回転楕円体面（図中で右下がりの曲線）と流星の飛跡を示したものが図6である。左から順番に SonotaCo ネットの流星で2番目の 051015 ( $x-y$  図で一番右のもの)、051810 ( $x-y$  図で一番上のもの)、051926 ( $x-y$  図で  $H$  軸から2番目のもの) である。HRO で捉えられているのが 051926 で、回転楕円体面にぴったり合っていることが分かる。

表 1 : 05:10~20m に撮影されたふたご群の流星。

| Time          | amag | x   | y    | H  | a   | b   | IP     |
|---------------|------|-----|------|----|-----|-----|--------|
| 051015        | -1.5 | 395 | -174 | 87 | 444 | 439 | -0.570 |
| 051015        | -2.8 | 439 | -64  | 84 | 457 | 452 | -0.484 |
| 051246        | -0.1 | 319 | -94  | 90 | 351 | 344 | -0.466 |
| <b>051251</b> | -1.2 | 120 | 12   | 89 | 164 | 150 | 0.088  |
| 051314        | 0.1  | 306 | -82  | 88 | 334 | 328 | -0.376 |
| <b>051425</b> | -0.8 | 157 | 81   | 91 | 208 | 197 | 0.027  |
| 051515        | -2.6 | -96 | 57   | 87 | 154 | 140 | 0.975  |
| 051652        | -0.8 | 388 | -62  | 90 | 408 | 403 | -0.501 |
| 051810        | -0.7 | 87  | 224  | 87 | 258 | 249 | 0.280  |
| <b>051926</b> | -0.1 | 106 | -54  | 89 | 161 | 147 | -0.011 |

ここで、回転楕円体面に直交する線（図中の破線）と流星の飛跡との内積（inner product=IP）を求めて、回転楕円体面と飛跡との合致度を示すことにする。表 1 に図 5 に表示した流星についての結果を示す。amag は SonotaCo ネットで求められた流星の絶対光度、 $x\sim H$  は流星の飛跡の中心、 $a$  と  $b$  は飛跡の中心を通る回転楕円体面の半長径と半短径、 $IP$  は内積である。HRO と同定される流星を太字にしたが、ともに内積の絶対値が 0.1 以下である。ま

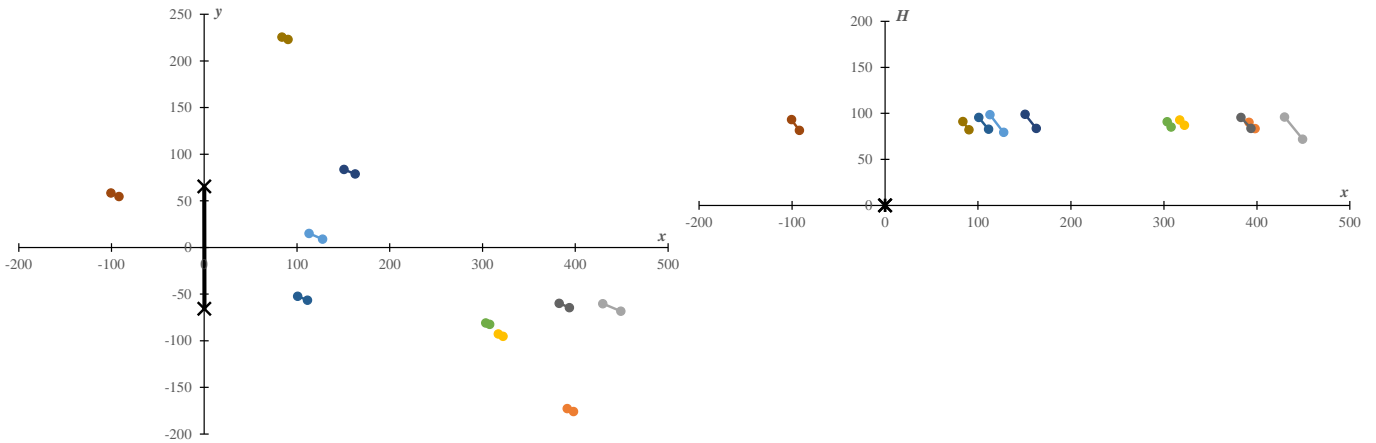


図 5 : 夜半後(5:10~20m)のふたご群流星の飛跡。

た、その他の流星は内積の絶対値が 0.2 以上と大きいことが分かる。このように、内積の大小により、流星の飛跡と回転楕円体面のなす角がわかり、SonotaCo ネットで観測された流星が HRO による観測可能性の大小を示すことができる。

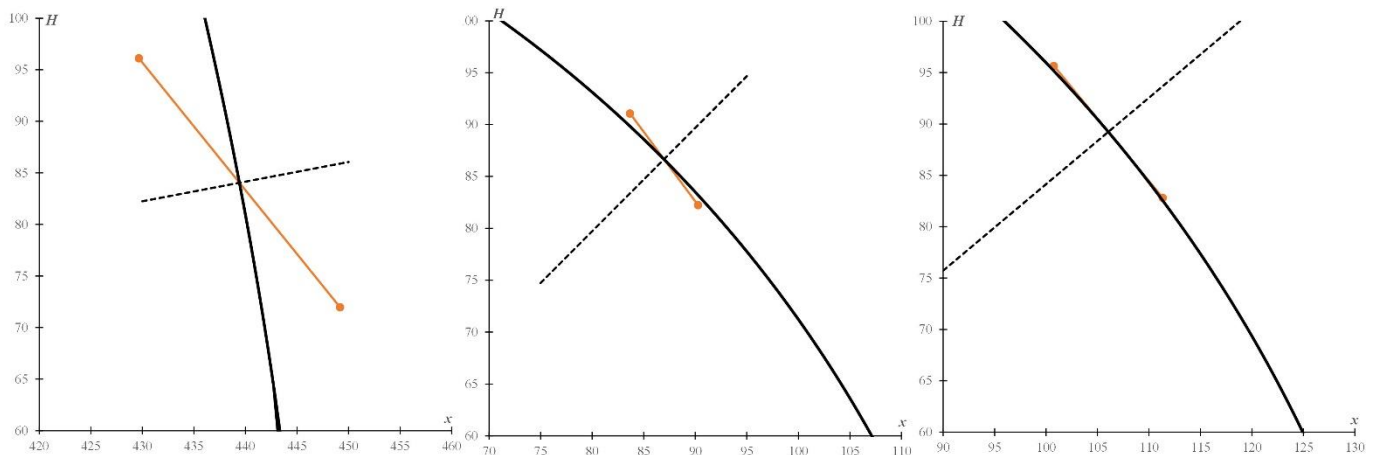


図 6 :  $x\sim H$  面に投影した流星の飛跡と飛跡の中心を通る回転楕円体面。

夜半後には基線の東側で東下がりの方ご群の流星が多数ビデオ観測されても、HRO で捉えられるのは内積の値が一定の範囲のものに限定されることが分かる。

#### 4. HRO とビデオ観測におけるふたご群の流星の見え方の違い

##### 4. 1. HRO で捉えることのできるふたご群の流星

確認のために、HRO とビデオでともに多くの流星が捉えられている記録画像を用いて追加の検討を行った。使用した画像はすべてで 13 枚(130 分間)で、以下に示すうちで下線を付したものは既に詳しく述べたものである。

KF1812130420.png, KF1812132110.png, KF1812140500.png, KF1812140510.png, KF1812140520.png, KF1812142110.png, KF1812142120.png, KF1812142130.png, KF1812142330.png, KF1812150150.png, KF1812150200.png, KF1812150510.png, KF1812150520.png

この 130 分間でビデオ観測と HRO で同定されたふたご群の流星は全部で 22 個になった。うち 1 個は内積から判断して改めて画像を検討して見出したもので、これについては後で触れることにする。1 時間当たり換算すると約 10 個となる。ふたご群の極大期とはいえ、かなりの同時流星が得られたことになる。



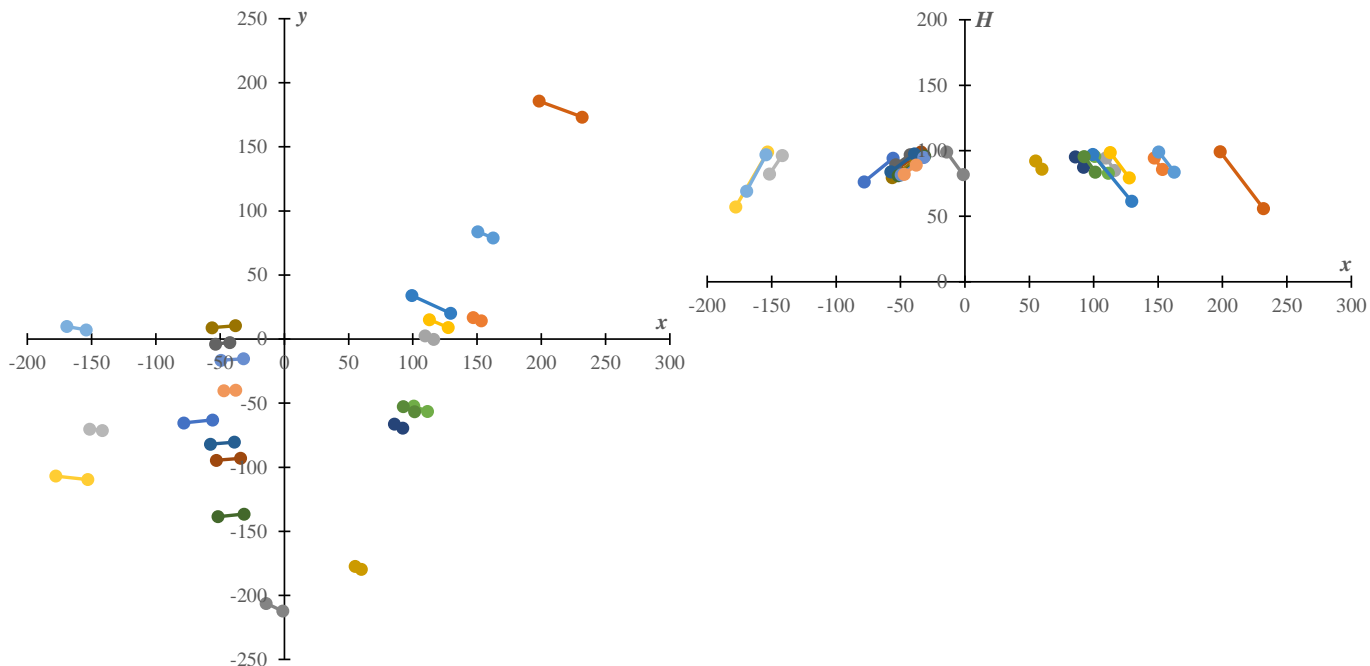


図 7 : 130 分間に HRO とビデオ観測で同時が成立した流星の飛跡。

ふたご群の流星は夜半前は西下がりとなるため、基線の西側に出現したものが HRO で捉えられ、輻射点が高くなるにつれて基線から西に離れたものになる。図 7 で西側の基線近くが 21 時台、さらに西側(-150~200km)に離れたものが 23 時台の観測である。夜半後は逆に東下がりとなるため、基線の東側に出現したものが HRO で捉えられている。HRO とビデオの兼ね合いで多くの流星数が得られる時間帯が 21 時台と 5 時台になるため、同定ができる流星の飛跡から直接、回転楕円体面が想起できる。

さらに、輻射点为天頂を通過する時刻を 2 時として、それからの時間差( $\Delta T$ )とビデオ観測で同定された流星について発信点—流星の中心—受信点の経路距離( $D$ )との関係を見ると(図 8)、輻射点の天頂通過から時間が離れるほど基線に近い流星が観測されていることが明らかとなる。輻射点の天頂通過の前後 2 時間ほどは HRO では基線から遠い距離の流星を観測することになり、実質的にはふたご群の流星を捉えられないことになる。

この 130 分間にビデオ観測されたふたご群の流星について内積を計算して、絶対光度( $amag$ )との関係を示したものが図 9 である。図中で●は同時になったもの、×は HRO で検出されなかったものである。この図から、検出されるのは内積の絶対値がほぼ 0.2 以下、つまり回転楕円体面と流星の飛跡のなす角度が 10 度以下

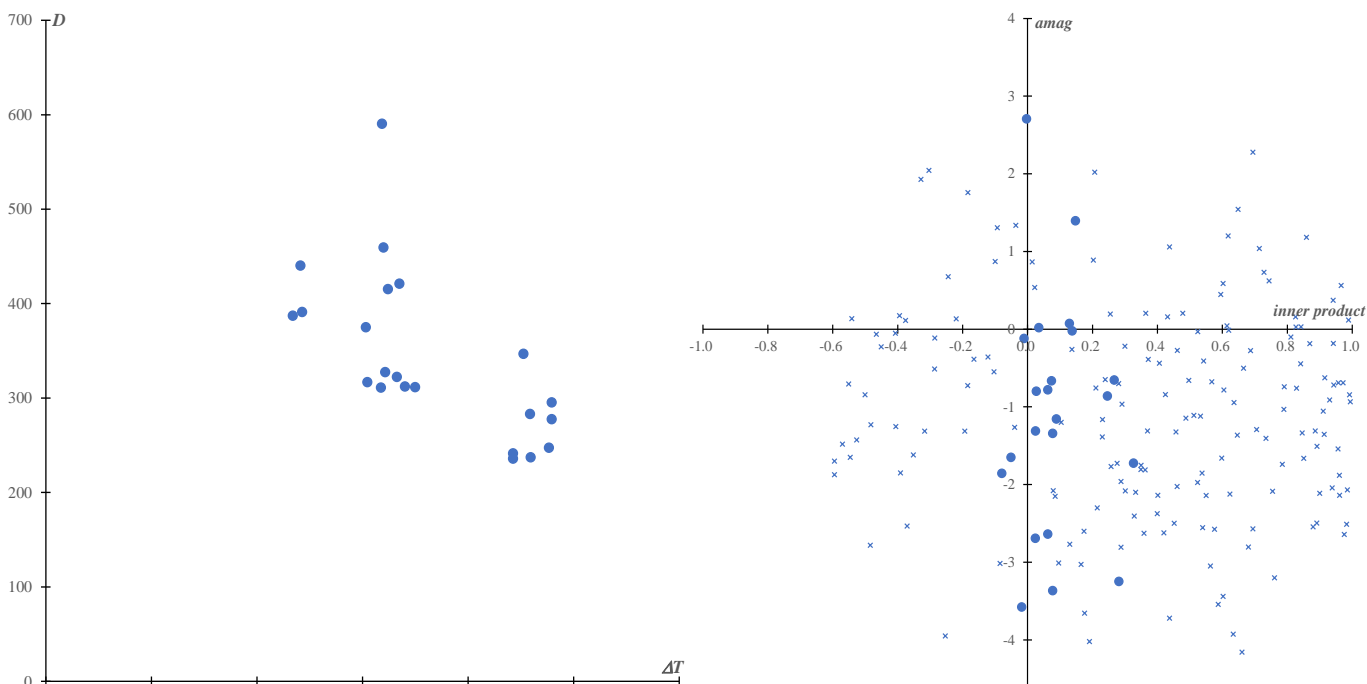


図 8 : 輻射点の天頂通過との時間差( $\Delta T$ )と HRO とビデオ観測で同時が成立する流星との経路距離( $D$ )。

図 9 : 内積と絶対光度( $amag$ )との関係。

のものであることが分かる。また、絶対光度では 0 等級より暗いもので同時となるのは例外的であることが分かる。これには 0 等級より暗いものでは同時ビデオ観測が成立しにくいことも関係していると思われる。

恐らくは内積が負のものは正のものより観測されにくく、負のものはわずか 4 個で、-0.1 以下のものは HRO で捉えられていない。この原因についての検討は今後の課題である。

ここまで、同時観測が成立したふたご群の流星について扱ってきたが、同時の成立しない場合を含めて、一般的な場合について検討する。KF1812140500.png を例にとり、HRO とビデオ観測の見え方にはどのような違いがあるのか、具体的に見ていくことにする。

#### 4. 2. HRO とビデオ観測における見え方の違い

##### 4. 2. 1. 同時判定された流星の HRO 画像

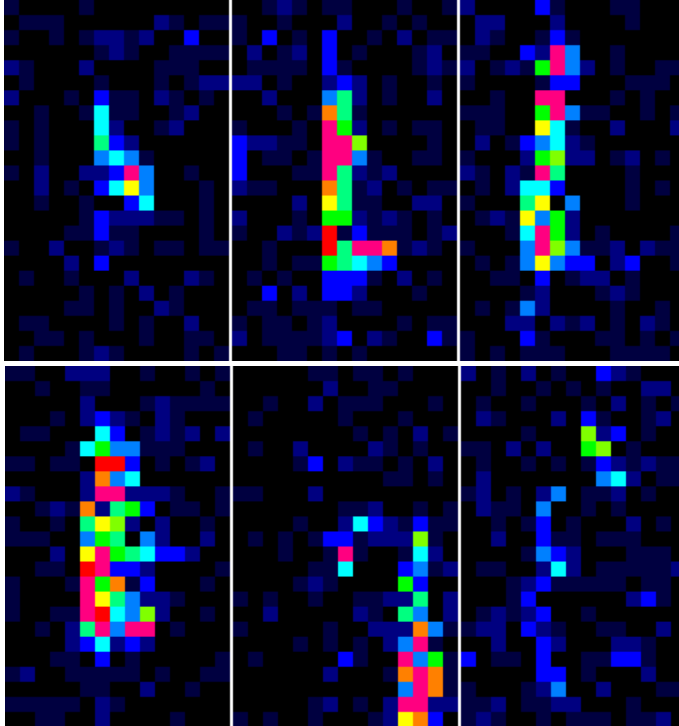


図 10 : 3. 2 と 3. 3 で同時判定された流星の HRO 画像。

まず、前章で取り上げた HRO とビデオ観測で同時観測された流星の HRO 画像により、同時判定される一般的な HRO 画像を確認しておく (図 10)。上段が KF1812140510.png、下段が KF1812142120.png の中で同時判定された流星である。1 ピクセルが 1 秒にあたるため、いずれもエコーが記録されるのは数秒である。明るい流星であっても、エコーの継続時間が短いことは、ふたご群の流星の特徴と言える。

上段の左から絶対光度と内積は (*amag*, *IP*)=(-1.2, 0.088)、(-0.8, 0.027)、(-0.1, -0.011) である。また、下段の真ん中のエコー像は中央のものが対象で、右下側の像は別の流星と判定している。下段の左から絶対光度と内積は、(*amag*, *IP*)=(-3.2, 0.281)、(0.0, 0.137)、(-1.3, 0.077) である。当然のことながら、内積が小さく、絶対光度が明るいほど鮮明なエコー像が記録されていることが分かる。

このようにビデオ観測と同時にしている HRO の流星はビデオの絶対光度が 0 等級より明るいものが多く、これより暗い流星がビデオ観測で捉えられる (同時観測されて軌道が得られる) 可能性が低いことは容易に想像される。また、HRO で観測される流星が必ずしもビデオで同時観測されるとは限らず、また HRO がノイズを拾っている可能性もある。

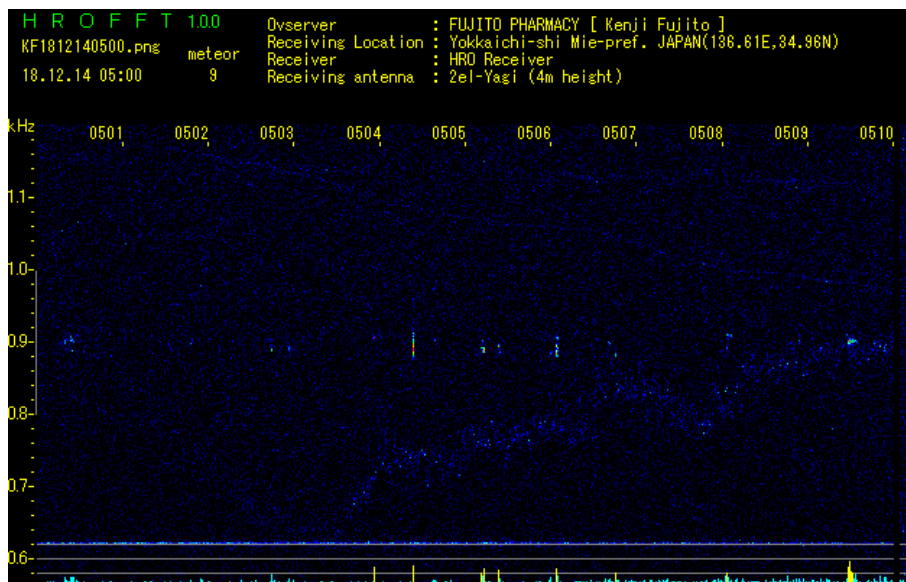


図 11 : 図 4 の 10 分前(05:00~10)の HRO 画像。

##### 4. 2. 2. 一般的な HRO におけるエコー

例を図 4 の 10 分前(05:00~10m)にとり、KF1812140500.png から以下の 10 個を流星と判定した。以下で述べるように、このエコーはほとんどがふたご群によるものと推定される。このうち、ビデオ観測と同定されたものは太字で表した 1 個のみである。この他にビデオ観測されたもののうち、内積が小さいものに該当するエコーとして 050148 が見いだされた。

hhmss=050024, **050244**, 050356, 050423, 050511, 050523, 050603, 050645, 050802, 050928

この時間帯にビデオ観測された流星は表2の通りである。

表2：05:00~10mにビデオ観測された流星。

| Time          | amag | x   | y    | H   | a   | b   | IP     | D   | Vg   | class |
|---------------|------|-----|------|-----|-----|-----|--------|-----|------|-------|
| 050015        | -0.8 | 64  | -71  | 87  | 141 | 125 | 0.210  | 283 | 33.5 | Gem   |
| 050051        | 1.8  | 168 | -110 | 94  | 229 | 220 | -0.184 | 459 | 32.0 | Gem   |
| 050107        | 0.6  | 95  | 2    | 104 | 155 | 141 | 0.901  | 311 | 51.7 | spo   |
| 050114        | 0.2  | 74  | 27   | 87  | 134 | 117 | 0.431  | 268 | 32.7 | Gem   |
| <b>050149</b> | 2.7  | 150 | 15   | 90  | 188 | 176 | -0.003 | 375 | 32.4 | Gem   |
| 050152        | -2.1 | -71 | -137 | 87  | 182 | 170 | 0.401  | 365 | 33.8 | Gem   |
| 050207        | -2.6 | -69 | 252  | 76  | 273 | 265 | 0.539  | 546 | 32.7 | Gem   |
| <b>050242</b> | 1.4  | 113 | 1    | 90  | 158 | 144 | 0.148  | 317 | 32.1 | Gem   |
| 050302        | 0.7  | 306 | -38  | 97  | 330 | 323 | -0.244 | 659 | 36.2 | Gem   |
| 050506        | -0.7 | 60  | -64  | 88  | 137 | 120 | 0.239  | 274 | 33.2 | Gem   |
| 050534        | -0.2 | 451 | -35  | 87  | 466 | 461 | -0.451 | 931 | 32.2 | Gem   |
| 050617        | -1.3 | 333 | -150 | 104 | 384 | 379 | 0.058  | 768 | 59.9 | spo   |
| 050718        | -1.3 | -69 | -32  | 83  | 129 | 111 | 0.846  | 259 | 33.8 | Gem   |
| 050946        | 0.9  | 126 | -36  | 95  | 174 | 161 | 0.014  | 348 | 34.9 | Gem   |

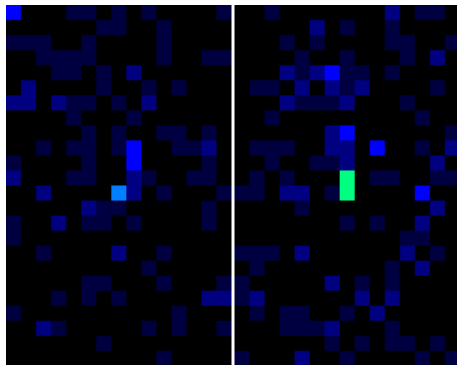


図1 2(1)：同定された流星。

先に見たように内積が-0.1以下及び0.2以上のものがHROで観測されにくいことが分かっているので、HROとビデオ観測された流星を次のように整理する。

- (1)両方で共通して観測されるもの
  - (2)HROのみで観測されるもの
  - (3)ビデオでのみ観測されるもの
- (1)同定されたもののHRO画像

まず、比較のために、同定された2個の画像を見てみよう。表2に示すように050148は絶対光度が2.7で、ビデオ観測、HROでの検出限界に近いものと考えられ、また、050244は内積が0.148とHROとの同定がなされるものの中では大きめである。

図1 2(1)の左側が050148、右側が050244である。偶然一致したノイズとも見える。実際に図1 1の中央左下から中央右端にかけてノイズが連続している。ノイズ中の輝点よりも050148は目立たないほどである。050244もエコーの継続時間としては短く、1ピクセルの幅しかない。ただ、こちらは縦方向に2ピクセルの広がりがあり、流星のエコーらしさも多少は感じさせる。

- (2)ビデオ観測がないHRO画像
- これを次のように細分する。

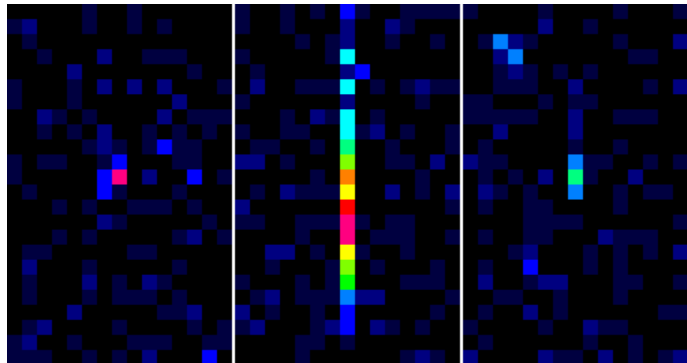


図1 2(2a)：継続時間1秒のもの。

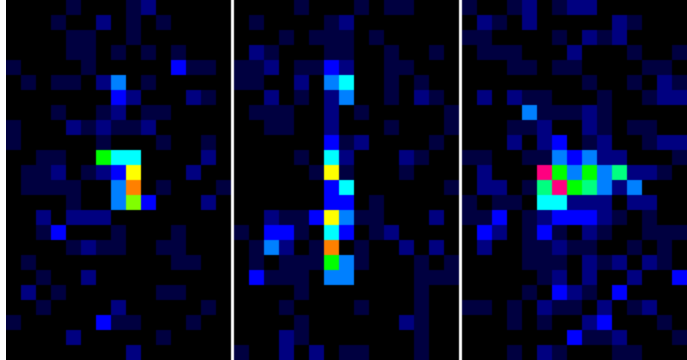


図1 2(2b)：流星エコーであると思われるもの。

- (2a)同定されたものよりは受信強度が強いが、同様に幅が1ピクセルしかないもの

図1 2(2a)の左から順に050356, 050423, 050645である。050356はエコーの強度的にみて流星エコーである可能性が高い。また、050423は上下に伸びて、ノイズではなく明らかに流星エコーであろう。一番右側の050645はビデオ観測と一致する可能性のあるエコーによく似ている。この時間帯に出現する散在流星はふたご群の流星よりも数が少なく(表2)、これらはふたご群の流星と考えてよいであろう。散在流星はふたご群の流星よりも速度が大きいものが多く、このような継続時間の短いエコーは考えにくい。先に見てきたふたご群の流星エコーと比べて継続時間が短いことから、ビデオ観測の限界を下回る光度の流星が回転楕円体面に接する(内積が小さい)ように飛行したと推定される。

- (2b)明確に流星エコーと考えられるのにビデオ観測で捉えられていないもの

図1 2(2b)の左から050511, 050603, 050928である。これらは継続時間とエコーの強度から考えて、ビデオ観測が可能な光度の流星であったと考えられる。恐らくは、これらもふたご群の流星であろう。ビデ

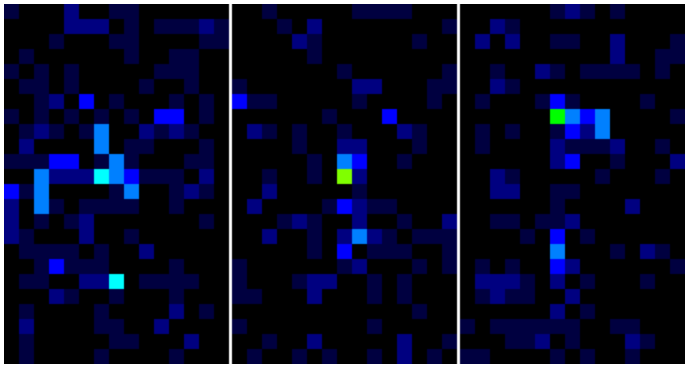


図 1 2 (2c) : (2b)に似ているが、弱いもの。

オ観測の網から離れた場所に出現した可能性もある。この時間帯に HRO で観測されるふたご群の流星は回転楕円体面の東南側に出現したものであり、SonotaCo ネットの観測者分布からは必ずしも同時が成立するとは限らない地域にあたる。また、エコー強度は必ずしもビデオ観測の光度に比例せず、継続時間も光度と直接の関係があるわけではないので、少なくとも観測者の一方で観測限界を下回る明るさであったのかもしれない。

(2c)(2b)のものより弱い、左右上下に広がりのある、一般的な流星エコーをぼかしたようなもの

図 1 2 (2c)の左から順番に 050024, 050523, 050802 である。恐らくはこれらもふたご群の流星であろう。(2a)と異なり、回転楕円体面にやや角度を持って飛来し、(2b)よりさらに南側に出現したとも、光度がビデオ観測の下限を下回ったとも考えられる。

無論、これらがノイズである可能性も否定はできない。いずれであるか結論するには、ふたご群の流星が HRO とビデオ観測で多数捉えられる時間帯(21 時~23 時、4 時~5 時)の観測について同時となっていない記録も含めて検討する必要がある。望ましいのは、この時間帯にふたご群の流星が HRO で捉えられる基線の南側でビデオ観測を強化することである。

### (3)ビデオ観測があるのに HRO で捉えられない流星

既にみてきたように内積が大きく、基線から遠く離れたものが HRO で捉えられないことは当然であるが、KF1812140500.png の時間帯(図 1 1)で内積の絶対値が 0.1 以下であるのに HRO で捉えられていないビデオ観測がある。050617 と 050946 である。このうち 050946 はふたご群の流星であり、HRO で観測されて当然の経路距離(D)に出現している。この原因については謎であるが、経路距離(D)がそれほど小さくなく、絶対等級があまり明るくないので、HRO での検出限界に近いのかもしれない。

050617 は散在流星でふたご群の流星よりは高速である。また、経路距離(D)がかなり大きい。基線から離れると流星の飛跡の中点を通る回転楕円体面はほぼ球面に近づき、内積が 0.1 以下になるかなり流星が増える。恐らくは内積が小さいだけでなく、遠方に出現した流星については他の条件が必要になると思われる。

## 5. 検討

既にみてきたように、HRO で捉えられる流星は回転楕円体面に接する、ある程度の明るさのものである。しかし、内積の絶対値が 0.2 以下で絶対等級も 0 等級より明るいのに HRO で検出されない、逆に内積の絶対値が 0.2 以上でも HRO と同定されるものが存在している。内積と明るさ以外にどのような条件が同時観測の成立に必要なのか検討する。

また、ふたご群の流星エコーの継続時間は数秒以下であることが一般的であるとみられるが、ふたご群の特性と言えるのか、ロングエコーやふたご群以外の流星との比較を行うこととする。

### 5. 0. HRO でのみ捉えられる流星

この問題については KF1812140500.png を例としてかなり詳しく触れているので、ここでは問題を整理するだけにとどめる。いずれにせよ、仮説の域をでないで、これからの研究課題である。

(1)回転楕円体面に沿う経路で出現した、同時ビデオ観測が成立する限界より暗い流星。

(2)同時ビデオ観測網に漏れた流星。

(3)継続時間が 1 秒のものは、ノイズである可能性も捨てきれない。

### 5. 1. 内積が小さく明るいのに HRO で捉えられていない流星

この問題をより広く考えるために、「4. 1. HRO で捉えられるふたご群の流星」で取り上げたのと同じ記録画像を用いる。ここでは先に取り上げたのとは逆に、ビデオ観測でのみ捉えられている流星のうち、絶対等級がマイナスで内積が  $-0.1 < IP < 0.2$  の範囲のものについて検討する(表 3)。

まず特徴的な点は、輻射点为天頂付近にある 2 時前後の流星が 12 個中 7 個と多いことである。これらは、輻射点为天頂付近あるため、大気にほぼ鉛直に突入し、飛行経路が短くなっている(図 1 3 右:  $x-H$  図)。飛行経路の短いことが受信する強度に直接関係はしないまでも、影響を与えることは推測される。

また、流星との距離の問題がある。内積が小さくなるものを選んでいるので基線から離れたものになり、発信点-流星の中点-受信点の経路距離を  $D$  として表すと、 $D > 500$  のふたご群流星は 1 個しかない(図 1 6 参照)。表 3 の中で  $D < 400$  のものは 2 個しかなく、次項で触れるように  $IP$  と  $D$  の間には相関が存在する可能性があり、その場合には表 3 の中で、HRO で捉えられても不思議はないというものは、表の最終行の 051037 だけになる。しかし、これについては HRO で 051036 という観測がある。ビデオ観測に先行するので同時観測と判定したリストからは外しているが、これの HRO 画像(図 1 4)の判定によっては、同時が成り立つことになる。これの同時を認めれば、HRO の観測がない理由は経路距離  $D$  の問題ということになる。



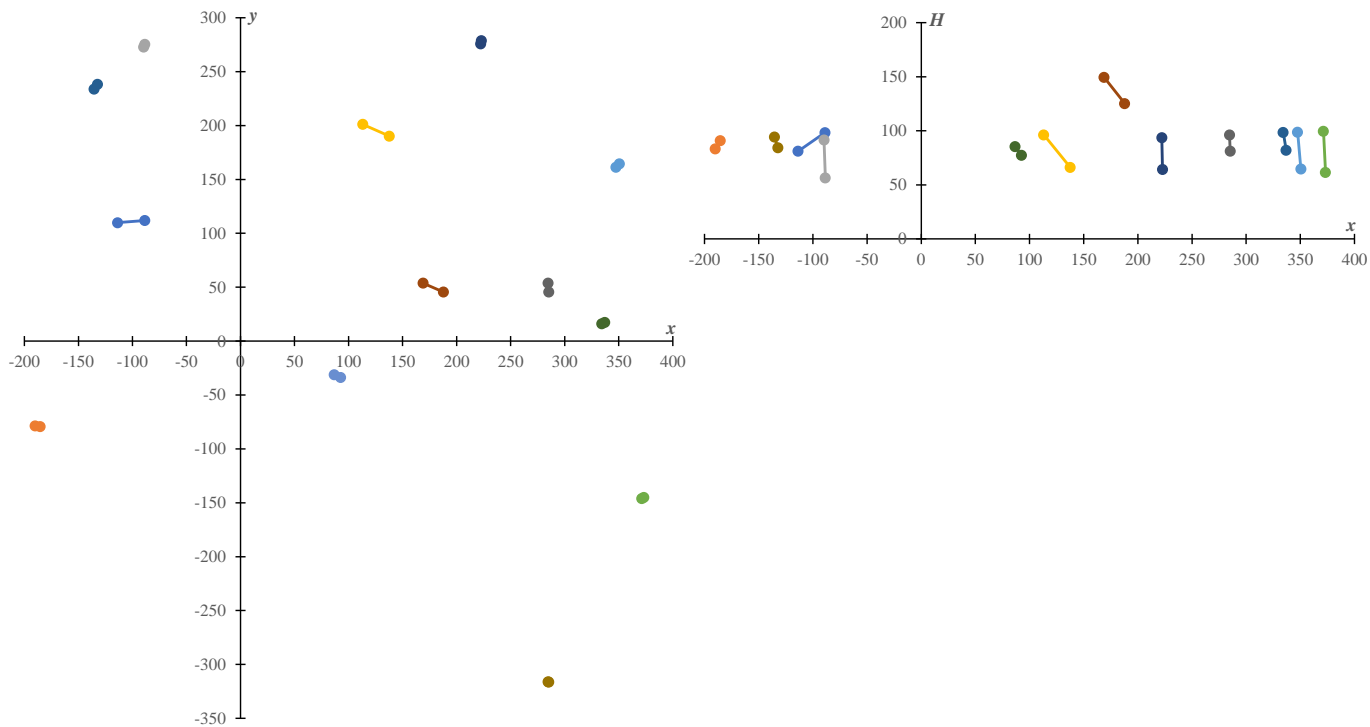


図 13 : 明るく、内積が小さい流星の飛行経路。

表 3 : 明るく内積も小さいのに HRO の観測がない流星。

| Time   | amag | x    | y    | H   | a   | b   | IP     | D   |
|--------|------|------|------|-----|-----|-----|--------|-----|
| 211942 | -3.0 | -101 | 111  | 90  | 183 | 170 | -0.085 | 365 |
| 233337 | -1.3 | -188 | -79  | 87  | 230 | 220 | -0.040 | 460 |
| 020740 | -4.0 | -89  | 274  | 74  | 299 | 291 | 0.191  | 597 |
| 052804 | -3.7 | 125  | 196  | 81  | 250 | 241 | 0.175  | 499 |
| 020604 | -3.0 | 349  | 163  | 82  | 398 | 393 | 0.096  | 796 |
| 015322 | -3.0 | 372  | -145 | 81  | 412 | 407 | 0.165  | 825 |
| 015158 | -2.8 | 222  | 277  | 79  | 367 | 361 | 0.130  | 733 |
| 051930 | -2.2 | 178  | 50   | 137 | 239 | 230 | 0.085  | 478 |
| 015652 | -2.6 | 285  | -316 | 89  | 437 | 432 | 0.174  | 874 |
| 020933 | -2.1 | -134 | 236  | 89  | 288 | 281 | 0.079  | 576 |
| 020922 | -1.2 | 336  | 17   | 90  | 354 | 348 | 0.103  | 708 |
| 051037 | -0.3 | 90   | -32  | 81  | 141 | 124 | 0.136  | 281 |

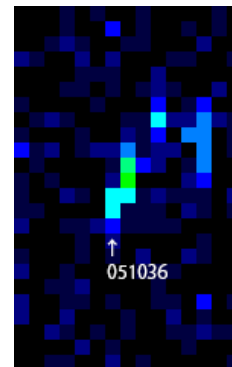


図 14 : HRO が先行したエコー。

5. 2.  $IP > 0.2$  でも HRO でエコーが観測されている流星

内積が小さくても同時が成立しない場合とは逆に、内積が大きくても同時が成立する場合がある（表 4）。調査した 130 分間で  $IP > 0.2$  でビデオ観測との同定が可能であった流星は 4 個あった。これらの HRO 像を図 15 に示す。左から順番に 211406、212434、213430 でいずれも 14 日の観測である。213430 は 213429 に同時に 2 個のふたご群流星が観測されており（仮に a と b として区別する）、両者が重なったものと思われる。

絶対等級がマイナスで内積が  $-0.1 < IP < 0.2$  の範囲のものの場合とは逆にこれら 4 個はいずれも距離が近く  $D < 300$  のものばかりである。213429a と b について発光点から消滅点までの経路を 5 分割して、それぞれの位置における a、b 及び IP と D を計算したものを示す（表 5）。いままでは IP を流星経路の midpoint に固定していたが、経路の途中で IP を計算すると当然のことながら異なる値になる。流星の経路が基線に近い場合に

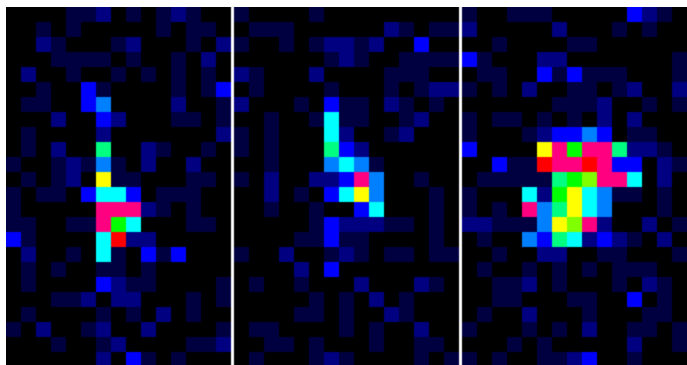


図 15 :  $IP > 0.2$  でビデオ観測と同時が成立する流星。

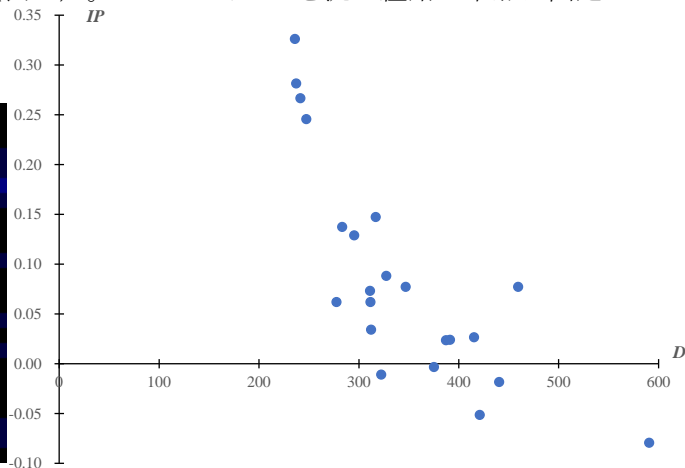


図 16 : 同時観測された流星の IP と経路距離 D。

は流星により生じたプラズマが広がり、移動することによって HRO とビデオ観測の同定条件を満たすようになる」と推測される。

IP と経路距離(D)には相関があり (図 1 6)、経路距離(D)が小さくなると、IP は必ずしも 0.1 以下でなくても、むしろ、IP が大きいものでも HRO で観測され得ることが示唆される。図 1 7 に 213429a の経路と回転楕円体面及びそれに直交する線を示す。このように回転楕円体面に突入する流星の場合であっても、経路距離(D)が小さい、すなわち、輻射点の天頂通過から離れた時間帯には HRO で観測され得ると考えられる。

表 4 : 内積が大きくても同時が成立する流星。

| Time    | amag | x   | y   | H  | a   | b   | IP    | D   |
|---------|------|-----|-----|----|-----|-----|-------|-----|
| 211405  | -0.9 | -48 | -3  | 93 | 124 | 105 | 0.246 | 247 |
| 212434  | -3.2 | -47 | 10  | 86 | 119 | 99  | 0.281 | 237 |
| 213429a | -1.7 | -41 | -16 | 88 | 118 | 98  | 0.326 | 236 |
| 213429b | -0.7 | -42 | -40 | 86 | 121 | 101 | 0.267 | 241 |

表 5 : 回転楕円体との接面を変えた場合における IP の変化。

| Time    | amag | x   | y   | H  | a   | b   | IP    | D   |
|---------|------|-----|-----|----|-----|-----|-------|-----|
| 213429a | -1.7 | -49 | -17 | 82 | 116 | 96  | 0.246 | 233 |
|         |      | -46 | -16 | 84 | 117 | 97  | 0.279 | 234 |
|         |      | -42 | -16 | 87 | 118 | 98  | 0.311 | 235 |
|         |      | -39 | -16 | 90 | 118 | 99  | 0.341 | 237 |
|         |      | -35 | -16 | 92 | 119 | 100 | 0.370 | 239 |
|         |      | -32 | -15 | 95 | 120 | 101 | 0.397 | 241 |
| 213429b | -0.7 | -47 | -40 | 82 | 120 | 100 | 0.224 | 240 |
|         |      | -45 | -40 | 83 | 120 | 101 | 0.242 | 240 |
|         |      | -43 | -40 | 85 | 120 | 101 | 0.258 | 241 |
|         |      | -42 | -40 | 86 | 121 | 101 | 0.275 | 242 |
|         |      | -40 | -40 | 88 | 121 | 102 | 0.291 | 242 |
|         |      | -38 | -40 | 89 | 122 | 102 | 0.307 | 243 |

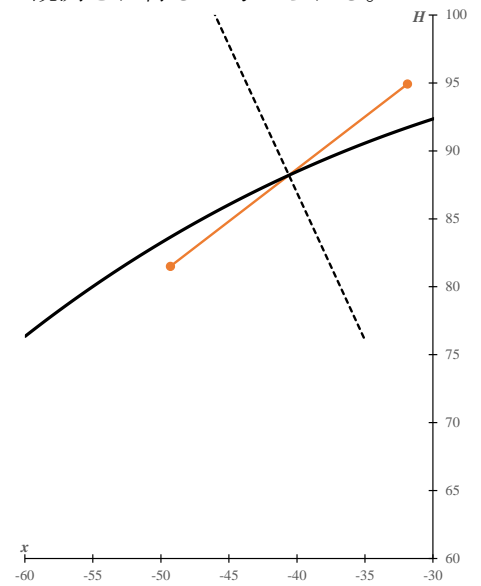


図 1 7 : 213429a の飛跡と飛跡の中心を通る回転楕円体面。

### 5. 3. ロングエコーの問題

本稿の調査期間内では図に示すように 00417 から 040534 にわたり継続する 1 分 18 秒のロングエコーが記録されている。HRO では個々のエコーについて群判定はできないので、このエコーがふたご群のものと考えられてもやむを得ない。しかし、この時間帯にビデオ観測では以下の 4 個の流星が得られている。040238 に記録された HRO のスポットはビデオの記録にはない。

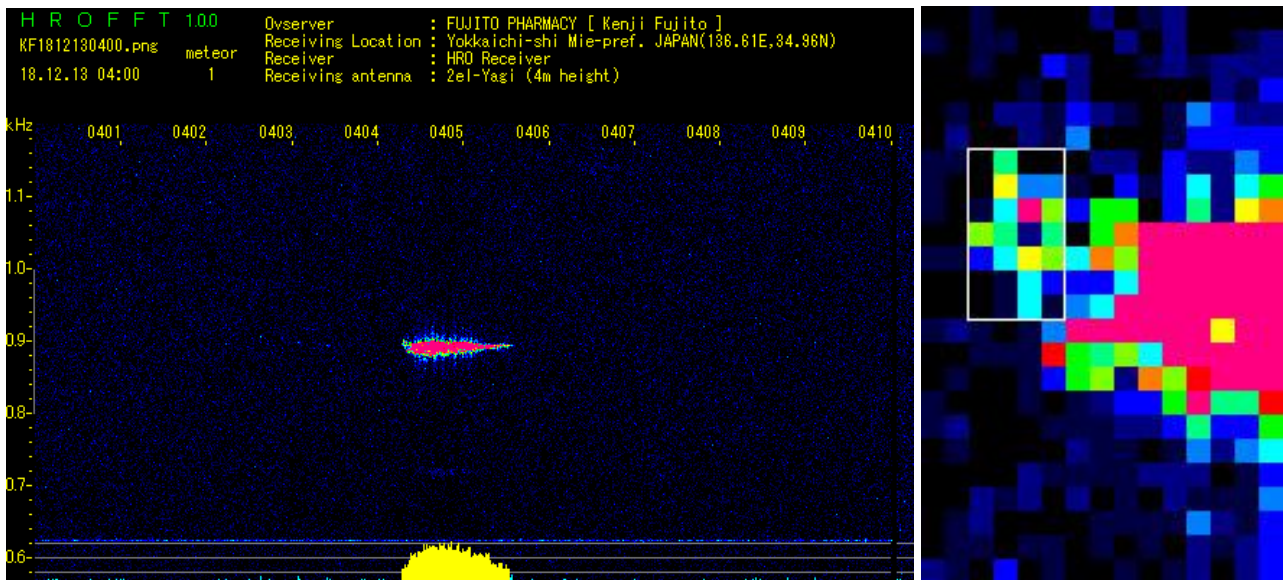


図 1 8 : 2018 年 12 月 13~15 日の間に記録されたロングエコー。右側は先頭部分の拡大図。

拡大図に示す白線部分が 040417 のふたご群によるエコーと考えられる。先に述べたように、ふたご群のエコーが観測されるのはビデオの出現時刻から 1~2 秒以内で、継続時間は数秒以内だからである。残りの部分、すなわちロングエコーの大半の正体は 040411 に出現した 2 個の流星 (あるいはその一方) によると考えるのが妥当であろう。内積は極めて大きく 040411 の 2 個の流星はいずれも飛跡の中心を通る回転楕円体面に 60 度程度の角度で突入している。ふたご群の流星が HRO で観測される場合のように、この散在流星がビデオ観測と HRO の観測に時間差がほぼない状態で記録されるとは考えられない。図の白線を除いた部分は白線部より 3 ピクセル遅れており、040420 からエコーが記録されたと読み取ることができる。絶対光度が相当に明るく、地心速度も大きいことからかなり多量のプラズマが生じたと考えられ、それが拡散して電波を反射するようになるまで 9 秒ほどを要したと考えることが妥当であろう。

表 6 : KF1812130400.png の時間帯(04:00~10m)に観測されたビデオ流星。

| Time   | amag | x   | y   | H   | a   | b   | IP    | D   | Vg   | class |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|------|-------|
| 040411 | -8.2 | -28 | -55 | 109 | 139 | 122 | 0.878 | 278 | 70.5 | spo   |
| 040411 | -7.6 | -23 | -62 | 123 | 152 | 137 | 0.890 | 304 | 56.6 | spo   |
| 040412 | 0.8  | 109 | -26 | 92  | 159 | 144 | 0.298 | 317 | 33.1 | GEM   |
| 040417 | -0.5 | 211 | 72  | 89  | 248 | 239 | 0.019 | 496 | 36.3 | GEM   |

#### 5. 4. 散在流星及びその他の流星群

今まで検討した事柄がふたご群の場合にだけ成立するのではないことを検証するために、ふたご群以外の流星を取り上げる。今回調査した 130 分間に、ビデオ観測では 5 個の  $IP < 0.1$  となるふたご群以外の流星が記録されている。

表 7 : 調査期間中にビデオ観測された  $IP < 0.1$  となるふたご群以外の流星。

| Time   | amag | x    | y    | H   | a   | b   | IP     | D   | Vg   | class |
|--------|------|------|------|-----|-----|-----|--------|-----|------|-------|
| 042339 | -0.6 | 211  | -21  | 96  | 241 | 232 | -0.008 | 483 | 58.5 | HYD   |
| 050617 | -1.3 | 333  | -150 | 104 | 384 | 379 | 0.058  | 768 | 59.9 | spo   |
| 015909 | -2.5 | -46  | 201  | 83  | 224 | 214 | 0.015  | 449 | 39.6 | spo   |
| 020933 | -2.1 | -134 | 236  | 89  | 288 | 281 | 0.079  | 576 | 41.3 | MON   |
| 052659 | -2.3 | 303  | 223  | 77  | 388 | 382 | 0.026  | 776 | 41.3 | spo   |

これらのうちで HRO と同定できたのは 015909 の散在流星のみであった。この原因は経路距離(D)と明るさ(amag)との兼ね合いで説明できると思われる。HRO において経路距離(D)は、ふたご群だけでなく、一般的に作用する重要な因子だと考えられる。

なお、前項で取り上げたロングエコーが高速の流星によるものであったが、表 7 で比較的速度の大きい上の 2 個の流星はエコーが捉えられていない。高速の流星であることが HRO に対して有利に働くかについては今後の検討課題となる。

#### 5. 5. アンテナの指向性



ここまで HRO のアンテナとして使用される 2 素子の八木アンテナの指向性を問題にしてこなかったが、経路距離  $D > 500$  の流星は  $IP < 0.1$  であっても捉えられていないことには大きな影響があると考えられる。基本的にはこのアンテナの感度は 8 の字型で、一般的にはアンテナが向けられた方が後ろ側よりも感度が高く、側面方向では最低になる。藤戸が用いているアンテナは図 19 のように天頂に向けられており、水平方向の感度は天頂方向に比べてかなり低くなっている。

四日市では発信点からの距離が比較的短く、直接波の影響を避けるためにアンテナを天頂に向けることになる。 $D < 500$  が一般的な同時観測の必要要件かという問題については、発信点からの距離があり、アンテナを水平方向に向けている地点での同様な調査が必要であろう。

図 19 : 使用したアンテナ。

#### 6. まとめ

福井-四日市を基線とする HRO 観測において、基線を軸とする回転楕円体面に沿って飛行する流星が捉えられていることが確認された。大きな流星体が飛行した場合には、出現から HRO での検出まで数秒以上の遅れがあるが、通常の流星であれば、ビデオ観測との時間差は 0~2 秒である。また、ふたご群という輻射点がほぼ天頂を通過する流星群の特性から、輻射点の天頂通過時において回転楕円体面が基線より遠ざかり、経路距離(D)が 500km 以上の流星は HRO で実質的に捉えられていないことも示された。これにはアンテナの指向性の問題も関係していると考えられるが、HRO で捉えられるエコーの出現位置を考える上での手掛かりになるとと思われる。

#### おまけ：基線に近い流星のエコーと遠い流星のエコー

右側の方が左側のものより明るいのに、基線から遠いと HRO でこのように観測される。

