

隕石はいつ落ちるか

——PHA による輻射点推算と軌道が判明している 20 個の隕石のデータ比較

2014/10/5 流星物理セミナー
日本流星研究会 小関正広

1. はじめに

前回の発表「太陽をかすめる彗星と流星」(流星物理セミナー、2014/7/6) で用いたのと同じ手法で PHA (Potentially Hazardous Asteroid) 1458 個 (データをダウンロードした 2014/3/7 時点、2014/9/4 では 1497 個になっている) について流星の出現予想を試みた。小惑星から流星群が発生するとは考えにくい、2008 TC3 のように小惑星と隕石との関係は密接である。そこで、小惑星(PHA)の予想輻射点から、隕石がいつ落ちる可能性が高いのかを実際の隕石データと比較し、検討することにした。

2. 隕石落下のデータ

LPI (Lunar and Planetary Institute) の 'Meteoritical Bulletin Data Base', <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> の検索によって、落下日時が判明しているもののリストを作成した。8月30日時点で名前が付けられ、登録されている 49591 個の隕石中、落下時刻が月まで判明しているもの 360 個、時間帯までわかっているものが 116 個である。このデータベースの関心は隕石本体にあって、落下の状況については詳しく記されていない。Grimsby 隕石についての論文 (付録の文献(15)参照) には、軌道の判明している (何らかの機器によって測定されている) 隕石が 15 個掲げられているので、Grimsby 隕石より後のものについては上記のデータベースを援用して文献を調査した。これによると、2014/9/4 現在で軌道が測定されている隕石は 20 個ということになる。付録にはそれに加えて、小惑星として観測された後に大西洋に落下した 2014AA のデータも付け加えている。

第 1 表: 月別落下数と PHA からの流星出現予測

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Witnessed	24	<u>32</u>	29	<u>31</u>	25	29	41	28	<u>32</u>	<u>39</u>	23	24
Observed	4	4	1	5	1	0	1	0	1	3	1	0
PHA	<u>200</u>	167	194	<u>205</u>	181	<u>208</u>	186	186	198	<u>214</u>	<u>212</u>	198

月別で見ると、4月と10月が隕石落下の目撃回数も多く、PHA からの流星 (隕石) 出現可能性も高いことが分かる。特に4月は軌道が求められている隕石の個数も多い。中でも Pribram は4月7日、Neuschwanstein は4月6日であり、軌道も極めて似ている。さらに軌道は求められていないものの、オランダの Glanerbrug(1990年)とアルゼンチンの Berduc Centroid(2008年)はともに4月7日に落下したことは注目される。

第 2 表: 時間帯別落下数: 時間は地方時。

Time	0~	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Witnessed	1	0	1	3	3	4	4	5	4	4	4	5
Observed	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
Time	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Witnessed	3	4	3	8	<u>10</u>	6	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>9</u>	7	5	4
Observed	1	0	0	0	0	2	1	3	3	2	1	1

時間帯別では夕方に目撃回数が多い。これは従来から、人間の外での活動時間に左右されるためと説明されてきた。しかし、軌道が求められている隕石でも夕方に多くなっている。夜半前後から明け方にかけての目撃例 (必ずしも隕石の飛行自体を目撃したという意味ではない) 少ないこともある程度は実際の現象を表している可能性がある。また、昼前後は人が外で活動し、目撃も多くなるはずであるが少ない。このことは隕石 (大火球) の輻射点分布に大きく影響されているものと考えられる。

残念ながら、PHA からの予想輻射点から落下の時間帯を推測することはできないので、第 2 表には PHA の行はない。

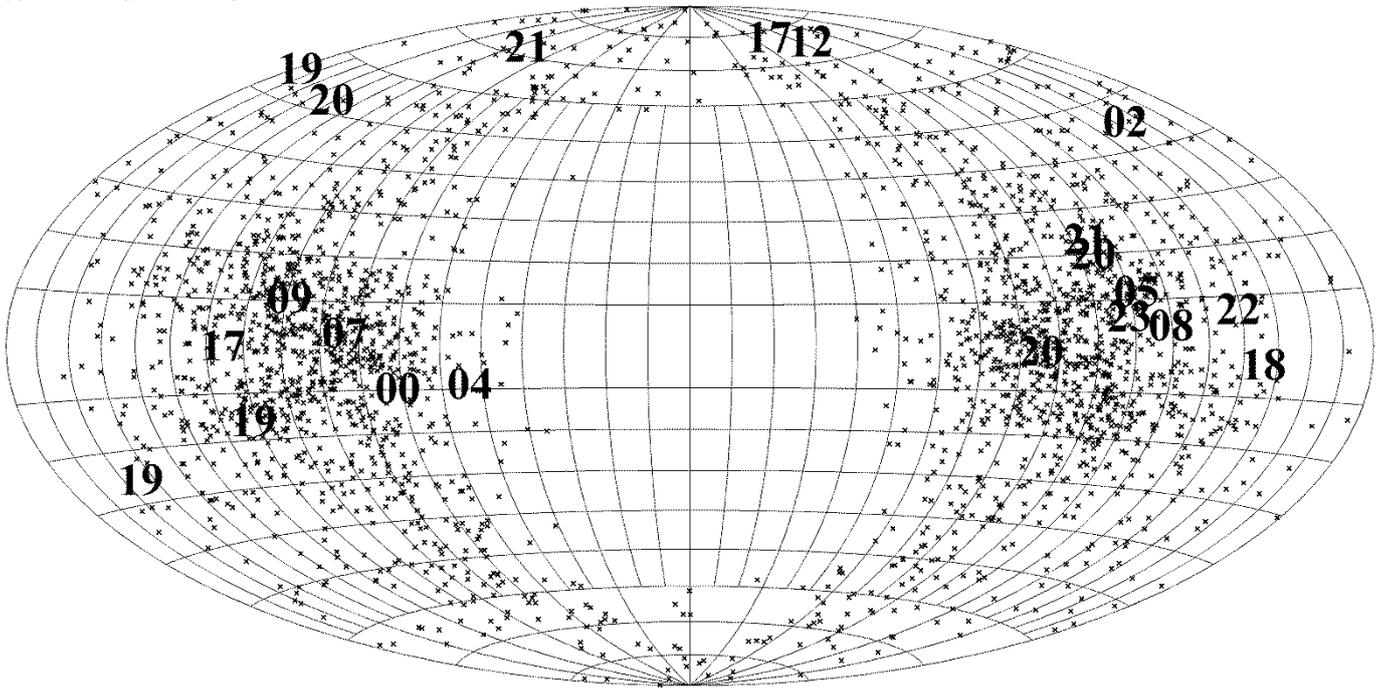
3. PHA からの予想輻射点

PHA の定義は絶対等級が 22.0 以下 (明るい) で地球軌道との最短距離が 0.05au 未満の NEA である。そのため、実に多くの PHA からの輻射点 (流星出現) が予想される。DSH<0.1 という条件に限定しても、昇降点と降交点の両方で流星出現が予想されるものがあるため、1458 個の小惑星から 2093 個の輻射点が推定された。

輻射点の分布を (λ - λ_s , β) の座標で第 1 図に示す。+ が PHA による予想輻射点で、数字は落下が観測された隕石の落下時間帯 (地方時) である。両者が極めてよく一致していることが分かる。前回の発表で示した、放物

線に近い軌道をたどる彗星からの予想輻射点とは逆に、輻射点は地球向点方向に存在せず、太陽方向と反太陽方向に集中している様子が明らかである。

第1図：輻射点の分布



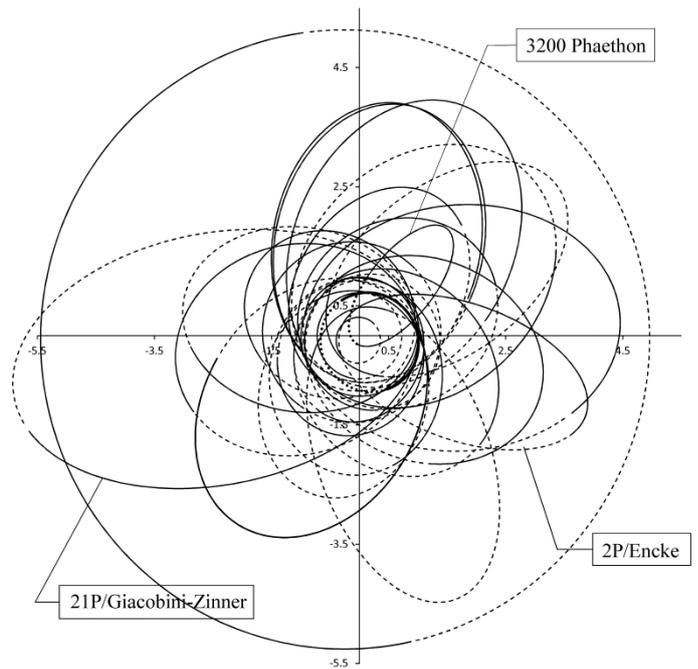
4. 検討

ここで取り上げた 20 個の隕石と 2014AA の軌道と流星群の母天体として良く知られている天体の軌道を第2図に示す。たくさんの軌道があつて分かりにくいのが、流星群の母天体と考えられているものに比べて隕石の軌道は離心率の小さいものが多い。また、代表的な木星族彗星である 21/P Giacobini-Zinner より遠日点は内側の小惑星帯にあるものが多い。つまり、隕石となった天体の多くは Apollo または Aten 型小惑星であり、それらの小惑星が隕石の供給源とみてよいであろう。

しかし、隕石の落下が夕方が多いことと、PHA の輻射点分布との間には食い違いがある。太陽方向の輻射点が南中するのは正午付近であり、反太陽方向は夜半である。ここで実際に観測された隕石落下の分布を詳しく見ると、太陽方向の輻射点であっても 00(2014 AA)を除いて、04, 07, 09 または 17, 19, 19 であり、反太陽方向の場合でも 05, 08 または 18, 20, 20, 21, 23 である。反太陽方向に一部夜半に近いものも含まれるが、いずれの方向であっても落下が起きているのは朝方か夕方である。

隕石は PHA のような小惑星と考えられるが、予想輻射点 (太陽方向と反太陽方向) が天頂にあるときではなく、地平線に近い方が落下に至りやすいと考えられる。これは、流星体が斜めに大気に突入することによって、急激な大気密度の上昇によって破碎されることを免れているためであろう。

以上の考察から、隕石落下を目撃する可能性が高いのは春・秋の朝と夕方ということになる。隕石の軌道はオーストラリアの火球ネットによる 2 個を除けば、北半球の観測によるものである。従って、PHA による予測の方が偏りは少ないと考えられる。つまり、10 月と 11 月は隕石落下を目撃するチャンスと言える。また、最近の軌道データの多くは車載ビデオを含め、目撃者が撮影した写真・ビデオによるものが多い。従って、朝に比べて夕方に観測されているものが見かけ上多くなっているものと考えられる。アメリカで好奇心旺盛な観測者の中には、昼間の火球を記録するビデオ観測を試行しているものがある。チェリャビンスク隕石の衝撃的な映像が記録され、軌道が求められたように朝の通勤時間帯に車載ビデオを動かすのも有効かもしれない。



第2図：隕石の軌道と流星群の母天体

付録：軌道が判明している 20 個の隕石

(1)Příbram

Ondřejov では 1951 年から流星の 2 点観測が開始され、当初は 5 台のカメラであったが、その後 10 台に増強された。10 台ではほぼ全天の半分を撮影できる。1959 年 4 月 7 日 19h30m21sUT に -18~-19 等の火球が Ondřejov と 40.388 km 離れた Prčice で撮影された。Ondřejov で使用されたレンズは F/4.5, f=18cm の Tessar であり、フィルムは Agfa ISS 21/10 DIN である。9×12cm1400/m 回転のシャッターが取り付けられていた。また、自動追尾のタイミングカメラにも撮影されていたので、時刻の精度は±1s である。当初は落下地点に近い Luhy という村の名前が隕石の名称に用いられていた。推定落下地点から 485m の距離で発見された。

(2)Lost City

Prairie Network の 4 か所の地点オクラホマの Hominy と Woodward、カンサスの Pleasanton と Garden City で撮影された。予測された地点から 700m の地点で発見された。Prairie Network は F/6.3, f=150mm のレンズと 9 インチ角のフィルムが使用されていた。回転シャッターは切断間隔を規則的に変化させるようにプログラムされており、それによって出現時刻が推定された。全部で 16 の観測地点で構成され、1963~1975 年の間、運用された。

(3)Innisfree

カナダの Meteorite Observation and Recovery Project (MORP) で Super-Komura 50mm に Kodak 70-mm Plus-X Pan が使用された。自動運用のため、パイロットの雲上からの目撃報告により、フィルムが回収、測定された。Vegreville と Lousana の 2 点からの観測で、20~40cm の積雪の中で捜索が行われた。

(4)Peekskill

火球ネットでない、一般のビデオが飛跡・軌道決定の基本データとなった最初の例である。-13 等（満月程度）の火球が 40 秒飛行するという華々しいものであった。ビデオが流星会議等でも了解されたので、映像を記憶されている人も多と思われる。落下が宵の時間帯で、16 件以上のビデオが撮影され、目撃者も多かった。また、自動車の車体に落下したものも含め、落下地点の捜索以前に発見された個体が多かった。

(5)Tagish Lake

明け方の薄明中の出現のため、火球の飛行記録は衛星からの画像と目撃である。飛行後の永続痕についてはビデオと写真の記録があり、それらに基づいて軌道が求められた。落下地点は湖を中心とする地帯で、落下直後には氷上から回収されたりしたが、かなりの部分は氷の融解とともに水中に没したものと考えられている。炭素質コンドライトであり、彗星起源も想定される。

(6)Morávka

白昼の落下で、多数の目撃とともに電磁波音と衝撃波の両方が記録されている。軌道はスタンバイモードであったビデオカメラ 3 台の記録から求められた。

(7)Neuschwanstein

ヨーロッパ火球ネット(EN)の、ドイツ 5 台、チェコとオーストリア各 1 台のカメラで撮影された。すべて全天カメラで 1 晩に 1 コマ撮影する運用がなされていた。ドイツとオーストリアのものは反射鏡であるが、チェコのは魚眼レンズで精度が高いものであった。求められた軌道は Příbram 隕石と一致しており、両者が共通の起源をもつことは確実と思われる。

(8)Park Forest

軌道は衛星画像と地上からのビデオ画像から求められた。少なくとも 2 軒の屋根に落下している。流星本体が撮影されたビデオはいずれも警察の車載ビデオによる 2 件で、うち 1 件は静止した車両からのものであった。

(9)Villalbeto de la Peña

落下は日没前であり、多数の目撃者がある。軌道は 2 枚の写真と 1 件のビデオ画像から求められた。

(10)Bunburra Rockhole

オーストラリアの砂漠火球ネット(DFN)の 2 台のカメラで撮影された。DFN では F/3.5, f=30mm の魚眼レンズで 1 晩 1 コマ撮影する運用がなされ、Ilford FP4 の 9×12cm シートフィルムが使用されている。

(11)Almahata Sitta

Catalina Sky Survey (CSS) の 1.5m 望遠鏡によって Kowalski が小惑星を発見して 19 時間後に地球に衝突した劇的な隕石である。落下は飛行中のパイロットからも目撃され、気象衛星 Meteosat 8 の他、アメリカの軍事衛

星からも撮影されている。隕石の名前はスーダンの Wadi Halfa と Khartoum を結ぶ最寄りの「6 番駅」という意味である。

(12) Buzzard Coulee

晩方の出現で、目撃者は多数あり、衝撃波も多数報告されている。警察車両搭載のビデオ他の火球画像もかなりあるが、軌道決定には監視カメラで撮影された火球による影の移動が用いられた。

(13) Maribo

デンマークに落下した CM2 隕石であるが、火球画像はスウェーデンの監視カメラとオランダの全天カメラによるものである。また、ドイツの流星レーダーでも記録されている。EN では、曇天のため、火球画像は撮影されなかったが、光電管によって増光の様子が記録されていた。軌道は参考文献(18)による。

(14) Jesenice

チェコの 2 台の火球カメラから軌道を求めることができた。しかし、月明と薄雲のために条件は悪く、軌道は隕石の発見地点と合うように調整されている。スロベニアで 2 台の全天カメラと 1 台のビデオ観測があるが、チェコのものと系統的なずれを示している。

(15) Grimsby

Southern Ontario Meteor Network (SOMN) の 6 台の全天 CCD カメラ(解像度 1k×1k の KAF1001E を用いた SBIG ST-1001E に F/3.5、f=8mm のレンズを装着して-2 等の流星が撮影できる)で撮影された。SOMN では全部で 7 台のカメラを運用しているが、その観測点の 1 は CMOR の観測所にある。写真に比べてカメラの精度は低いが、この火球についての平均残差は 150m 程度であった。1 台の駐車車両に当たっている。

(16) Košice

ヨーロッパ中央部は曇天または雨天で、チェコの EN とスロバキアのビデオネットでは火球本体を撮影することができなかった。しかし、EN の観測点では雲を通しての強烈な光はラジオメーターに記録されていた。軌道はハンガリーの 3 台の監視カメラ画像から求められている。永続痕が火球出現 7 時間後に撮影された。

(17) Mason Gully

オーストラリアの砂漠火球ネット(DFN)の 2 台のカメラで撮影された。隕石は推定落下地点から 150m の場所で発見された。

(18) Sutter's Mill

アメリカの国立気象局が運用する気象ドップラーレーダーシステム"NEXRAD" (NEXt-Generation RADar)のうち 3 台によって落下が記録され、軌道が求められた。記録的な高速 28.6km/s で大気突入し、軌道から木星族彗星を起源とすると考えられる。炭素質コンドライトである。落下に際して、電磁波音が観測され、<溶接>の臭いが記録されている。

(19) Novato

Allsky Meteor Surveillance (CAMS)で捉えられた火球・隕石である。CAMS は Fremont Peak Observatory、Lick Observatory、Sunnyvale の 3 点に 20 の Watec Wat 902H2(+4 等級まで撮影可能、画角 20°×30°)を配置して地平から 30° 以上の全天をカバーしている。このうち 5 台のビデオカメラで撮影されている。なお、CAMS は Jenniskens の母国であるオランダを含め、西ヨーロッパでもアマチュアにより展開され、さらに活動の範囲を広げている。

(20) Chelyabinsk

落下当初から多くの車載カメラ、監視カメラの映像がインターネットに流されていたため、多くの研究者により、多様な軌道が求められている。ここで引用したものは 10 か所の火球ビデオと 5 か所の火球による影のビデオから求められたものである。英語版のウィキペディアでは複数の軌道計算結果が比較されている。

(21) 2014 AA

これは隕石が回収されたものではないが、観測された小惑星が地球に衝突した二番目の例である。Richard Kowalski が Catalina Sky Survey の一環として Mount Lemmon の 60 インチ反射望遠鏡で 1 月 1 日 6:18UT(地方時では前日 12 月 31 日の午後 11:18)に 9 分ごとの 4 枚の映像でオリオン座北部に 19 等級の天体として発見した。2014 年初の小惑星であるため、2014AA と名付けられたが、すぐに地球に衝突することが予報された。Peter Brown (University of Western Ontario)は核実験の検出用に配備されている 3 台の低周波検出器(20 hertz 以下)から西経 40 度、北緯 12 度に 2 日 3 時 UT 過ぎに落下したと推定している。

軌道が正確に求められている20個の隕石と大西洋に落下した小惑星

Name	Place	Year	Month	Day	Time(LT)	α	δ	Vg	a	e	q	i	ω	Ω	Type	Ref.
Pribram	Czechoslovakia.	1959	4	7	20h30m20s	192.343 ± 0.011	17.461 ± 0.002	17.427 ± 0.006	2.401 ± 0.002	0.6711 ± 0.0003	0.78951 ± 0.00006	10.478 ± 0.004	241.738 ± 0.015	17.80285 ± 0.00001	H5	(1),(7)
Lost City	USA.	1970	1	4	20h14m	315.5	39.3	8.8	1.66	0.417	0.967	12.00204	160.9702	283.7277	H5	(2)
Innisfree	Canada	1977	2	5	19h17m38	7.4	66.5	14.54	1.872	0.4732	0.986	12.27514	177.9511	317.517	L5	(3)
Peekskill	USA	1992	10	9	19h50m	209.6	-29.3	10.1	1.49 ± 0.03	0.41 ± 0.01	0.886 ± 0.004	4.9 ± 0.2	308 ± 1	17.030 ± 0.001	H6	(4)
Tagish Lake	Canada	2000	1	18	08h43m42s	88.0	27.9	11.3	2.1 ± 0.2	0.57 ± 0.05	0.891 ± 0.009	1.4 ± 0.9	222 ± 2	297.900 ± 0.003	C2-ung	(5)
Morávka	Czech Republic	2000	5	6	12h51m52s	250.1 ± 0.7	54.96 ± 0.24	19.6 ± 0.4	1.85 ± 0.07	0.47 ± 0.02	0.9823 ± 0.0009	32.2 ± 0.5	203.5 ± 0.6	46.2580	H5	(6)
Neuschwanstein	Germany	2002	4	6	21h20m17.7s	192.33 ± 0.09	19.58 ± 0.13	17.51 ± 0.05	2.4 ± 0.02	0.670 ± 0.003	0.7931 ± 0.0009	11.43 ± 0.06	241.1 ± 0.2	16.82666 ± 0.00001	EL6	(7)
Park Forest	USA	2003	3	26	23h50m	171.8 ± 1.3	11.2 ± 0.5	16.1 ± 0.4	2.53 ± 0.19	0.680 ± 0.023	0.811 ± 0.008	3.2 ± 0.3	237.5 ± 1.6	6.1156 ± 0.0007	L5	(8)
Villalbeto de la Peña	Spain	2004	2	4	17h46m45s2s	311.4 ± 1.3	-18.0 ± 0.7	16.9 ± 0.4	2.3 ± 0.2	0.63 ± 0.04	0.860 ± 0.007	0.0 ± 0.2	132.3 ± 1.5	283.6712	L6	(9)
Bunburra Rockhole	Australia	2007	7	21	04h43m57s	80.73 ± 0.06	14.21 $\pm .04$	6.743 ± 0.014	0.8529 ± 0.0004	0.2427 ± 0.0005	0.6459 ± 0.0007	8.95 ± 0.03	210.04 ± 0.06	297.595	Euclite	(10)
Almahata Sitta	Sudan	2008	10	7	05h46m	348.5	7.7	7.1	1.308201	0.312065	0.899957	2.5422	234.449	194.1011	Ureilite-an	(11)
Buzzard Coulee	Canada	2008	11	20	17h26m45s	285.3	77.3	14.3	1.225	0.215	0.961	25.486	212.019	238.937	H4	(12)
Maribo	Denmark	2009	1	17	20h08m28s	124.6 ± 1.0	18.8 ± 1.6	25.4 ± 0.8	2.34 ± 0.29	0.795 ± 0.026	0.481 ± 0.010	0.72 ± 0.98	99.0 ± 1.4	117.64 ± 0.05	CM2	(13),(18)
Jesenice	Slovenia	2009	4	9	2h59m40.5s	159.9 ± 1.2	58.7 ± 0.5	8.3 ± 0.4	1.75 ± 0.07	0.431 ± 0.022	0.9965 ± 0.0006	9.6 ± 0.5	190.5 ± 0.5	19.196	L6	(14)
Grimsby	Canada	2009	9	25	21h03m	242.61 ± 0.26	54.97 ± 0.12	17.89 ± 0.22	2.04 ± 0.05	0.518 ± 0.011	0.9817 ± 0.0004	28.07 ± 0.28	159.865 ± 0.43	182.9561	H5	(15)
Košice	Slovakia	2010	2	28	22h24m46s	114.3 ± 1.7	+29.0 ± 3.0	10.3 ± 0.5	2.71 ± 0.24	0.647 ± 0.032	0.957 ± 0.004	2.0 ± 0.8	204.2 ± 1.2	340.072 ± 0.004	H5	(16)
Mason Gully	Australia	2010	4	13	18h36m10s	148.4	9.2	9.2	2.470 ± 0.004	0.6023 ± 0.0007	0.98240 ± 0.00007	0.832 ± 0.013	18.95 ± 0.03	203.2112	H5	(17)
Sutter's Mill	USA	2012	4	22	7h51m12s	24.0 ± 1.3	12.7 ± 1.7	26.0 ± 0.7	2.59 ± 0.35	0.824 ± 0.020	0.456 ± 0.022	2.38 ± 1.16	77.8 ± 3.2	32.77 ± 0.06	C	(18)
Novato	USA	2012	10	17	19h44m29.88s	268.1 ± 0.6	-48.9 ± 0.7	8.21 ± 0.22	2.09 ± 0.11	0.526 ± 0.024	0.9880 ± 0.0003	5.5 ± 0.6	347.37 ± 0.18	24.9414 ± 0.0005	L6	(19)
Chelyabinsk	Russia	2013	2	15	09h20m32.2s	333.2 ± 1.6	+0.3 ± 1.8	15.3 ± 0.4	1.76 ± 0.16	0.581 ± 0.018	0.739 ± 0.020	4.93 ± 0.48	108.3 ± 3.8	326.4422 ± 0.0028	LL5	(20)
2014 AA	Atlantic Ocean	2014	1	2	0h	82.4	14.3	5.1	1.164276	0.213168	0.91609	1.425552	52.28165	101.5794		(21)

- (1) NEW CZECHOSLOVAK METEORITE “LUHY”, Zdeněk Ceplecha, J. Rajchl and L. Sehnal, *BAC* 10(1959), 147-148; Orbital data from (7)
- (2) LOST CITY METEORITE - ITS RECOVERY AND A COMPARISON WITH OTHER FIREBALLS, R. E. McCrosky, A. Posen, G. Schwartz, and C. -Y. Shao, *SAO Special Report #336* (1971)
- (3) THE INNISFREE METEORITE AND THE CANADIAN CAMERA NETWORK, IAN HALLIDAY, ALAN T. BLACKWELL AND ARTHUR A. GRIFFIN, *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, Vol. 72, No. 1, 15-39, 1978
- (4) The Fall of the Peekskill Meteorite: Video Observations, Atmospheric Path, Fragmentation Record and Orbit, M. Beech, P. Brown, R. L. Hawkes, Z. Ceplecha, K. Mossman, and G. Wetherill, *Earth, Moon, and Planets* 68: 189-197, 1995.
Videos: <http://meteor.uwo.ca/~pbrown/Videos/peekskill.htm> and <http://fireball.meteorite.free.fr/meteor/en/1/1992-10-09/peekskill/synthese>
- (5) The Fall, Recovery, Orbit, and Composition of the Tagish Lake Meteorite: A New Type of Carbonaceous Chondrite, Peter G. Brown et al. 13 OCTOBER 2000 VOL 290 SCIENCE, 320-325.
- (6) The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records, J. BOROVIČKA, P. SPURNÝ, P. KALENDA, and E. TAGLIAFERRI, *Meteoritics & Planetary Science* 38, Nr 7, 975–987 (2003)
- (7) THE ATMOSPHERIC TRAJECTORY AND HELIOCENTRIC ORBIT OF THE NEUSCHWANSTEIN METEORITE FALL ON APRIL 6, 2002, Pavel Spurny, Dieter Heinlein, and Jurgen Oberst. In: *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002. International Conference, 29 July - 2 August 2002, Berlin, Germany*. Ed. Barbara Warmbein. ESA SP-500. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-810-7, 2002, p. 137 – 140
- (8) The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite, P. BROWN, D. PACK, W. N. EDWARDS, D. O. REVELLE, B. B. YOO, R. E. SPALDING, and E. TAGLIAFERRI, *Meteoritics & Planetary Science* 39, Nr 11, 1781–1796 (2004)
- (9) The Villalbeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of atmospheric trajectory and orbit, Josep M. TRIGO-RODRÍGUEZ, Jiri BOROVIČKA, Pavel SPURNÝ, José L. ORTIZ, José A. DOCOBO, Alberto J. CASTRO-TIRADO, and Jordi LLORCA, *Meteoritics & Planetary Science* 41, Nr 4, 505–517 (2006)
- (10) The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit, and impact position from photographic and photoelectric records, Pavel SPURNÝ¹, Philip A. BLAND, Luka² s³ SHR BENY⁴, Jir⁵ i⁶ BOROVIČ⁷ KA¹, Zdeněk CEPL ECHA, Andrew SINGELTON, Alex W. R. BEVAN, David VAUGHAN, Martin C. TOWNER, Terence P. MCCLAFFERTY, Ralf TOUMI, and Geoff DEACON, *Meteoritics & Planetary Science* 47, Nr 2, 163–185 (2012)
- (11) Almahata Sitta (=asteroid 2008 TC3) and the search for the ureilite parent body, Peter JENNISKENS, Je⁸ re⁹ mie VAUBAILLON, Richard P. BINZEL, Francesca E. DeMEO, David NESVORNY¹⁰, William F. BOTTK E, Alan FITZSIMMONS, Takahiro HIROI, Franck MARCHIS, Janice L. BISHOP, Pierre VERNAZZA, Michael E. ZOLENSKY, Jason S. HERRIN, Kees C. WELTEN, Matthias M. M. MEIER, and Muawia H. SHADDAD, *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 10–11, 1590–1617 (2010)
- (12) Pre-fall Orbit of the Buzzard Coulee Meteoroid, E. P. Milley, A. R. Hildebrand, P. G. Brown, M. Noble, G. Sarty, A. Ling, and A. Ling, *AAPG Search and Discovery Article #90172 CSPG/CSEG/CWLS GeoConvention 2010*, Calgary, Alberta, Canada, May 10-14, 2010
- (13) Maribo—A new CM fall from Denmark, Henning HAACK, Thomas GRAU, Addi BISCHOFF, Marian HORSTMANN, John WASSON, Anton SØRENSEN, Matthias LAUBENSTEIN, Ulrich OTT, Herbert PALME, Marko GELLISSSEN, Richard C. GREENWOOD, Victoria K. PEARSON, Ian A. FRANCHI, Zelimir GABELICA, and Philippe SCHMITT-KOPPLIN, *Meteoritics & Planetary Science* 47, Nr 1, 30–50 (2012)
- (14) Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009, Pavel SPURNÝ¹¹, Jir¹² i¹³ BOROVIČ¹⁴ KA, Javor KAC, Pavel KALENDA, Jure ATANACKOV, Gregor KLADNIK, Dieter HEINLEIN, and Thomas GRAU, *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 8, 1392–1407 (2010)
- (15) The fall of the Grimsby meteorite—I: Fireball dynamics and orbit from radar, video, and infrasound records, P. BROWN, P. J. A. McCAUSLAND, M. FRIES, E. SILBER, W. N. EDWARDS, D. K. WONG, R. J. WERYK, J. FRIES, and Z. KRZEMINSKI, *Meteoritics & Planetary Science* 46, Nr 3, 339–363 (2011)
- (16) The Kosice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit, Jiri BOROVIČKA, Juraj TOOTH, Antal IGAZ, Pavel SPURNY, Pavel KALENDA, Jakub HALODA, Jan SVOREN, Leonard KORNOS, Elizabeth SILBER, Peter BROWN, and Marek HUSARIK, *Meteoritics & Planetary Science* 1–23 (2013)
- (17) THE MASON GULLY METEORITE FALL IN SW AUSTRALIA: FIREBALL TRAJECTORY AND ORBIT FROM PHOTOGRAPHIC RECORDS, P. Spurný, P. A. Bland, L. Shrubeny, M. C. Towner, J. Borovička, A. W. R. Bevan, D. Vaughan, 74th Annual Meteoritical Society Meeting (2011), 5101.pdf
- (18) Radar-Enabled Recovery of the Sutter’s Mill Meteorite, a Carbonaceous Chondrite Regolith Breccia, Peter Jenniskens, et al., 21 DECEMBER 2012 VOL 338 SCIENCE, 1583-1587
- (19) Fall, Recovery and Characterization of the Novato L6 Chondrite Breccia, Peter JENNISKENS, et al., *Meteoritics & Planetary Science*, 7 AUG 2014, (draft paper can be found at https://profile.usgs.gov/myscience/upload_folder/ci2014Jun1214154574880176_MAPS-Novato8.pdf)
See also: <http://cams.seti.org/index-N.html>
- (20) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, Olga P. Popova, et al, *SCIENCE* VOL 342 29 NOVEMBER 2013, 1069-1073
See also: http://en.wikipedia.org/wiki/Chelyabinsk_meteor
Videos: <http://newswatch.nationalgeographic.com/2013/02/15/best-videos-from-meteor-strike-in-russia/>
- (21) <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/small-asteroid-2014-aa-hitsearch/>

2013/02/15 09:26:33

YouTube

地球の衝突断面積と隕石落下速度

理化学研究所 光量子工学研究領域
先端光学素子開発チーム
海老塚 昇

2015年2月1日

小天体の日心速度

近日点距離: R_p および遠日点距離:
 R_{ap} から近日点における日心速度: v_p
 を求める。遠日点における日心速
 度: v_{ap} , 太陽質量: M_S , 小天体質量: m
 とすると、エネルギー保存則およ
 び角運動量保存則はそれぞれ、

$$\frac{1}{2}mv_{ap}^2 - \frac{GM_S m}{R_{ap}} = \frac{1}{2}mv_p^2 - \frac{GM_S m}{R_p} \dots(1-1)$$

$$mv_p R_p = mv_{ap} R_{ap} \dots(1-2)$$

である。式(1)に(2)を代入すると、

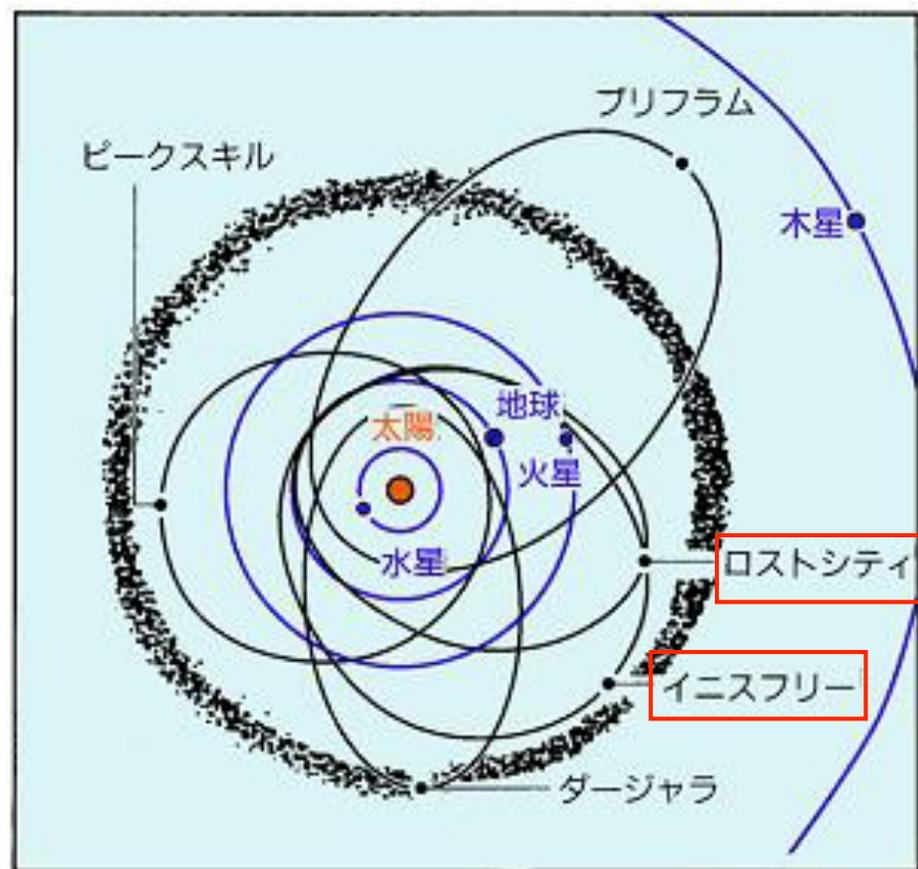
$$\frac{1}{2} \left(\frac{R_p}{R_{ap}} \right)^2 v_p^2 - \frac{GM_S}{R_{ap}} = \frac{1}{2} v_p^2 - \frac{GM_S}{R_p}$$

$$v_p = \sqrt{2GM_S \left\{ \frac{R_{ap}}{R_p(R_p + R_{ap})} \right\}} \dots(1-3)$$

となる。

天体のエネルギー: E

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R}$$



小天体の地心速度

式1-3より、近日点距離: R_p が地球の軌道半径: R_E (1au) と等しく、地球との軌道傾斜角: $i=0^\circ$ の天体について地心速度: v_h を求める。

$$v_h = \left| \sqrt{2GM_S \left(\frac{R_{ap}}{R_E (R_E + R_{ap})} \right)} - 29.8 \right|$$

$$GM_S = 1.33 \times 10^{20} [m^3/s^2]$$

$$R_E = 1.5 \times 10^{11} [m]$$

遠日点距離 R_{ap} [au]	近日点速度 v_p [km/s]	地心速度 v_h [km/s]	備考
1	29.8	0	地球軌道
1.52	32.7	2.9	R_{ap} =火星軌道
1.8	33.8	4.0	R_{ap} ~メインベルト内縁
3.2	36.8	7.0	R_{ap} ~メインベルト外縁
5.20	38.6	8.8	R_{ap} =木星軌道
∞	42.1	12.3	
∞	42.1	71.9	$i = 180$

地球の衝突断面積

地表に接する軌道のエネルギー保存則および角運動量保存則から衝突断面積を求める。地表における速度を v_e 、地球質量を M_E 、地球半径を R_e とすると R_p が R_E と等しい天体エネルギー保存則は、

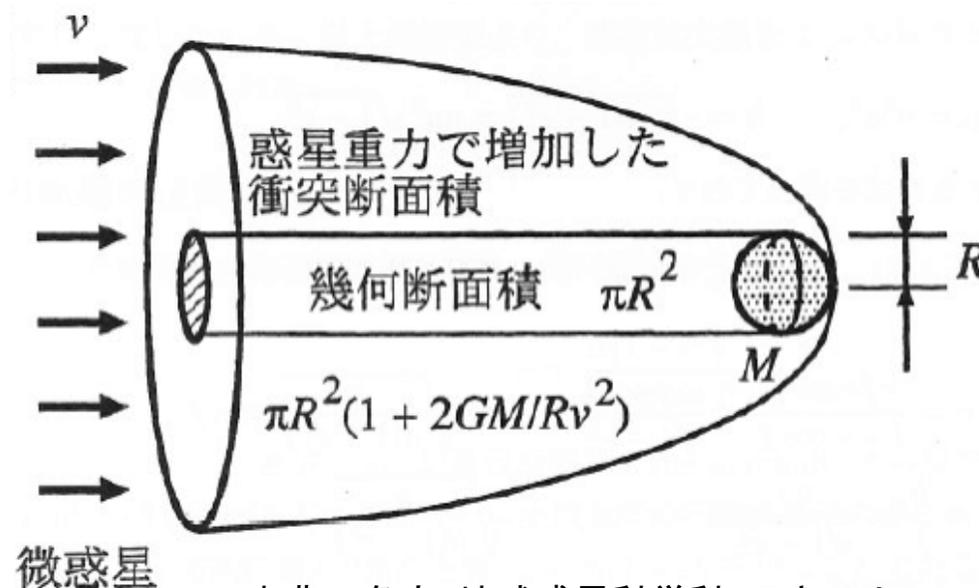
$$\frac{1}{2}mv_h^2 = \frac{1}{2}mv_e^2 - \frac{GM_E m}{R_e} \quad \dots(2-1)$$

となる。一方、地表に接する軌道の天体の角運動量保存則および衝突断面積はそれぞれ、

$$mv_h R_b = mv_e R_e \quad \dots(2-2)$$

$$\sigma = \pi R_b^2 \quad \dots(2-3)$$

である。ここで σ は衝突断面積、



出典：名大 地球惑星科学科 テキスト

R_b はその半径である。式(2-3)に(2-1)および(2-2)を代入すると、

$$\sigma = \pi R_e^2 \left(1 + \frac{2GM_E}{R_e v_h^2} \right) \quad \dots(2-4)$$

となる。

小天体の速度と地球の衝突断面積

地心速度 v_h [km/s]	衝突断面積 σ [km ²]	σ 半径 R_b [km]	面積比 $\sigma/\pi R_E^2$	備 考
1	1.61×10^{10}	71,600	126	
2	4.12×10^9	36,200	32.3	
2.9	2.03×10^9	25,400	15.9	R_{ap} =火星軌道
4	1.13×10^9	19,000	8.83	R_{ap} ~メインベルト内縁
7	4.53×10^8	12,000	3.56	R_{ap} ~メインベルト外縁
8.8	3.34×10^8	10,300	2.62	R_{ap} =木星軌道
12.3	2.33×10^8	8,610	1.83	$R_{ap} = \infty, i = 0^\circ$
33	1.42×10^8	6,730	1.12	ふたご座流星群
42	1.37×10^8	6,590	1.07	$R_{ap} = \infty, i = 90^\circ$
72	1.31×10^8	6,460	1.02	$R_{ap} = \infty, i = 180^\circ$
∞	1.28×10^8	6,370	1.00	幾何断面積

地表における隕石の速度 (v_e)

式2-1より、

$$v_e = \sqrt{v_h^2 + \frac{2GM_E}{R_e}}$$

$$GM_E = 3.99 \times 10^{14} [m^3/s^2]$$

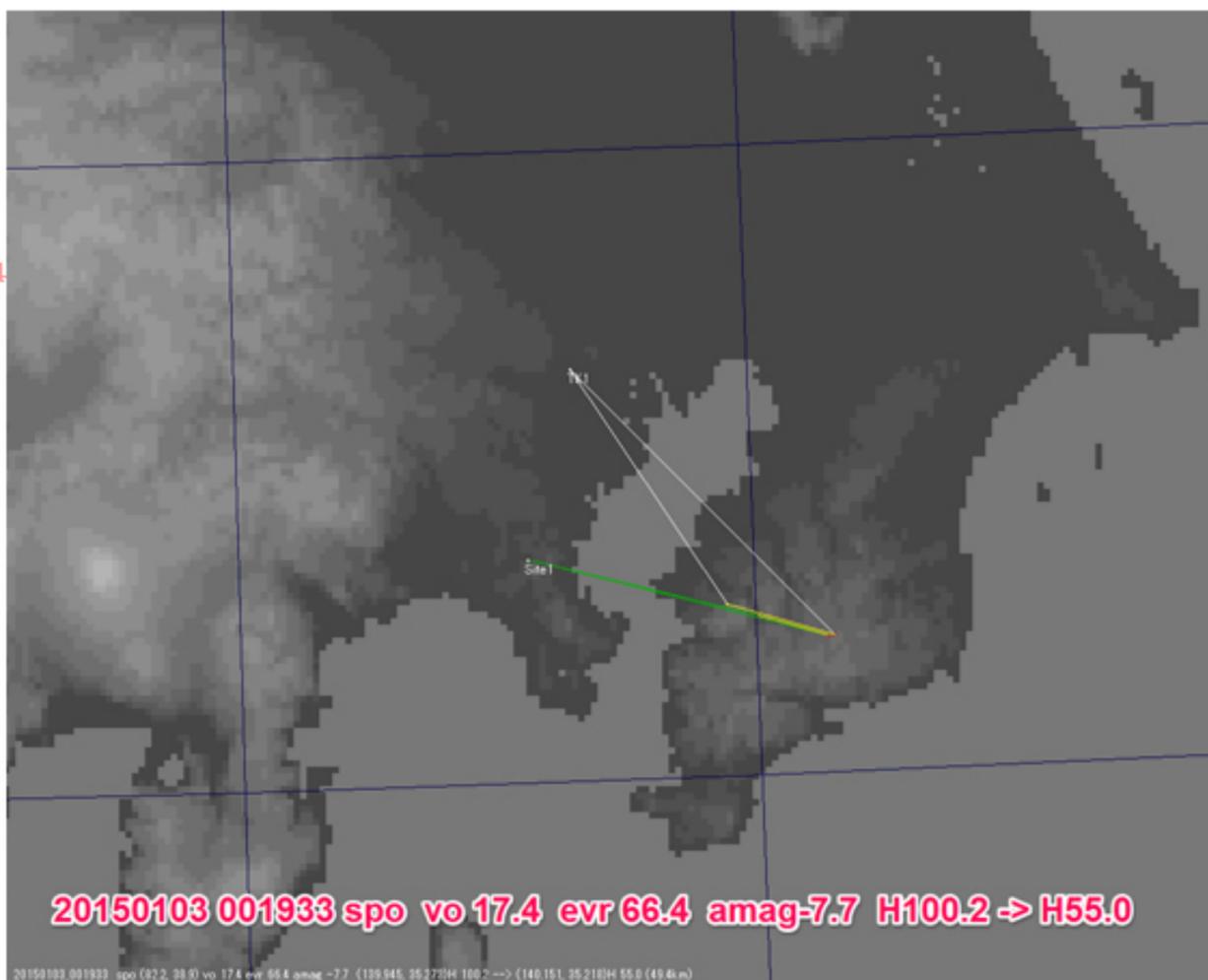
$$R_e = 6.37 \times 10^6 [m]$$

地心速度 $v_h [km/s]$	地表速度 $v_e [km/s]$	備考
0	11.19	第二宇宙速度
1	11.24	
2.9	11.6	R_{ap} = 火星軌道
4	11.9	R_{ap} ~ メインベルト内縁
7	13.2	R_{ap} ~ メインベルト外縁
8.8	14.2	R_{ap} = 木星軌道
12.3	16.6	$R_{ap} = \infty, i = 0^\circ$
33	34.9	ふたご座流星群
42	43.5	$R_{ap} = \infty, i = 90^\circ$
72	72.9	$R_{ap} = \infty, i = 180^\circ$

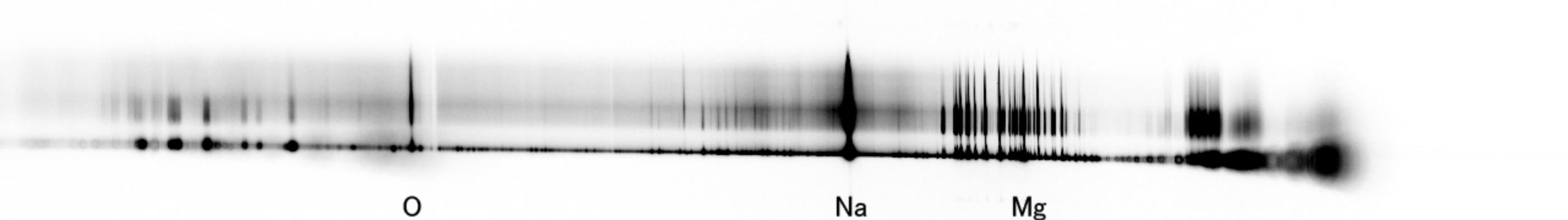
2015/2/1 MSS

火球の超望遠高速撮影

鈴木 智



VIS-NIR



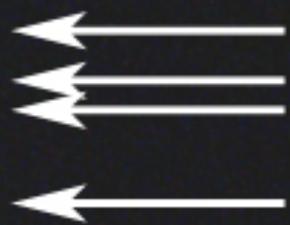
0.0 G:(0.0, 0.0) K:(0.0, 0.0) AzC:(106.3, 50.9)(106.2, 50.8) 496) 106.3,-50.9) G:(0.0, 0.0) K:(0.0, 0.0) KV:(0.0, 0.0) AzC:(106.2, 49.7)(106.2, 49.6) V:(0.2,-49.7) K:(0.0, 0.0) KVx:(0.0, 0.0) C:(106.2, 48.8)(106.2, 48.7) V:(0.2,-48.8)

Frame No:232

255

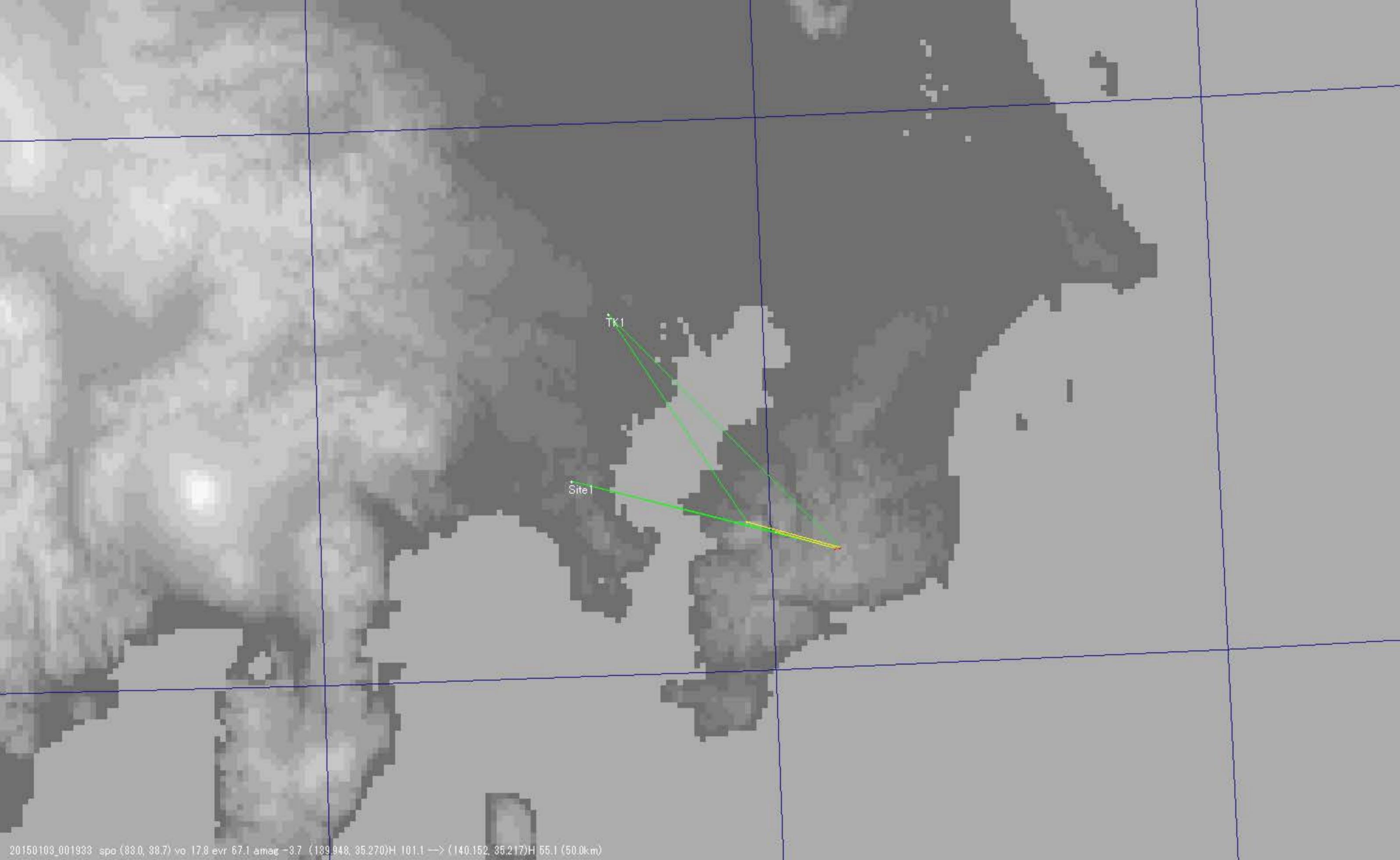
273

約10m尾より離れて
並んでいる



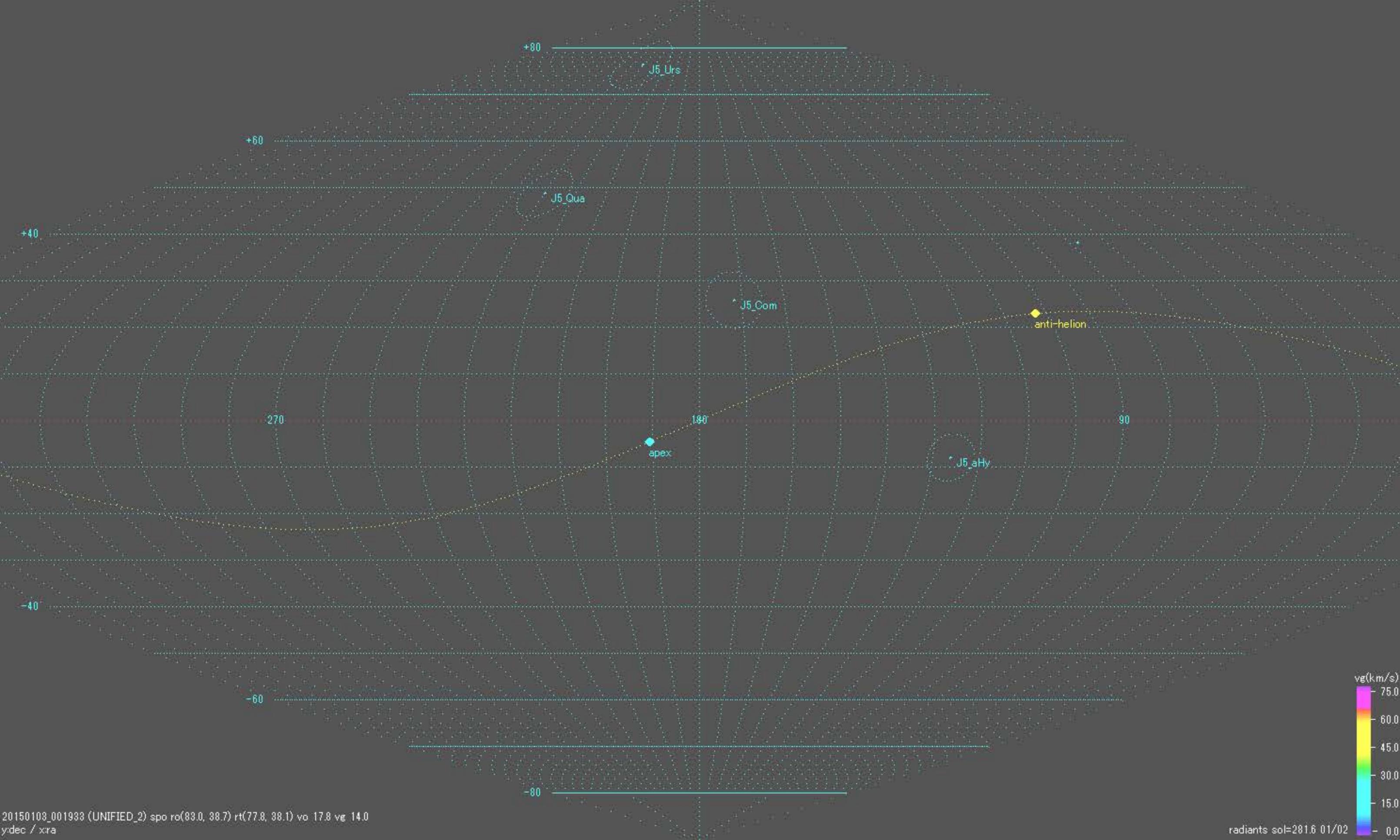
0.1deg

100m



TK1

Site1



ペルセウス座流星群の眼視観測報告

信太 一那、岩田 彩花 (中等4) 島 匠、石井 奏人、阿部 海舟、多田 菜々子 (中等5)

【東京大学教育学部附属中等教育学校天文部】

1. はじめに

私たちは8月12日～8月13日にかけて、ペルセウス座流星群の眼視観測と撮影を行った。初めて流星観測を行うという人がほとんどで、眼視観測のデータは信憑性に欠けるが、天候には恵まれ、観測を行った2日共快晴であった。今回はペルセウス座流星群の眼視観測の報告である。

2. 観測方法

観測場所：長野県松本市安曇スポートピア乗鞍

○計数観測

8月12日、8月13日の2日間とも、計数観測を行った。8月12日は東西南北天頂にわかれ、4人の観測者と記録者1人で、8月13日は8月12日のメンバーと、活動が活発になると考えられる明け方に4名ほど観測者を増やして観測を行った。流星の出現時刻、発光時間、光度、色、痕の有無、群流星か散在流星かを記録した。ベガを0等星、デネブとアルタイルを1等星とみて観測した。

8月11日～8月12日の暦

日没	18:37
薄明終了	20:11
月の出	8:54
月没	20:40
日の出	4:56
薄明開始	3:23
月齢	4.2

8月12日～8月13日の暦

日没	18:36
薄明終了	20:09
月の出	09:55
月没	21:16
日の出	4:57
薄明開始	3:24
月齢	5.2

3. 観測結果

眼視観測による流星群の出現の様子についてまとめたものを、以下に表す。

表1：0時から4時までのHR

時間 (hh:mm:ss)	8月12日	8月13日
00:00:00～00:59:59	25	80
01:00:00～01:59:59	41	98
02:00:00～02:59:29	59	105
03:00:00～03:59:59		121

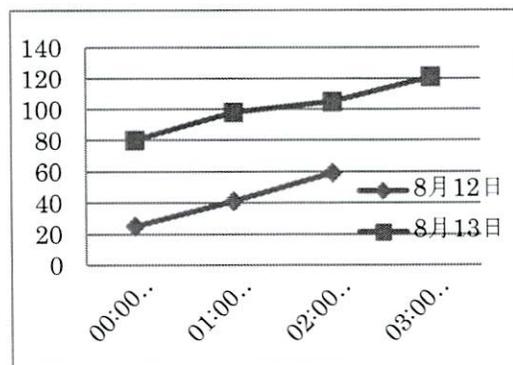


図1：表1のグラフ

最微6.2 雲量0

表 2：8月13日の光度分布

時間 (hh:mm:ss)	3 等級	2 等級	1 等級	0 等級	- 1 等級	- 2 等級	- 3 等級
00:00:00~00:59:59	1	17	26	20	15	0	0
01:00:00~01:59:59	0	16	39	25	13	3	0
02:00:00~02:59:29	0	16	29	39	18	3	0
03:00:00~03:59:59	0	23	48	31	16	3	0

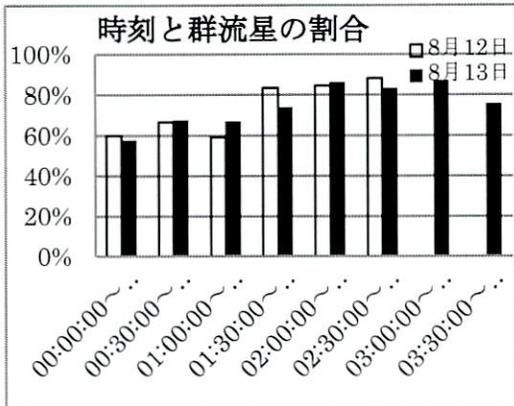


図 2：30分ごとの群流星数/全流星数

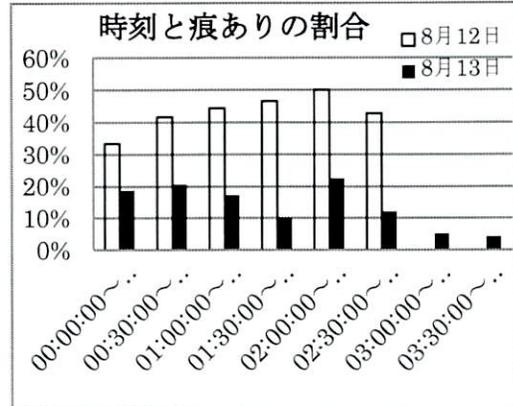


図 3：30分ごとの群流星痕あり/群流星数

4. 考察

- ・表 1 より、極大日の観測データの最大 HR121 に対し、予想が HR70 であった。
→観測条件が良いことに加え、ペルセウス座流星群の活動が活発であったのでは。
- ・図 1 より、両日とも明け方にかけて出現流星数が増加していることが分かる。
→明け方にかけてペルセウス座が天頂付近に昇ってくるためと考えられる。
- ・表 2 より、火球は観測されなかったが、明るい流星も出現した。
- ・図 2 より、HR と同じく群流星の割合が明け方に増加している。
また、群流星の割合が両日で大差ないことがわかる。
- ・図 3 より、活動が活発になると予想されていた 8月13日の3時から、痕ありの群流星の割合が極端に低い。
→薄明が始まり、痕が見えにくくなっていったと考えられる。

5. 今後に向けて

眼視観測については、各観測者の技術を向上することが課題である。

今後は、観測されたデータと撮影された流星写真を合わせて、放射領域を検出する予定である。

6. 参考文献

- ・天文年鑑編集委員会 「天文年鑑 2013 年版」 (誠文堂新光社)
- ・国立天文台「ペルセウス座流星群」 <http://www.nao.ac.jp/astro/sky/2013/perseids.html>

ペルセウス座流星群の眼視観測報告

信太 一那、岩田 彩花(中等4)島 匠、石井 奏人、阿部 海舟、多田菜々子(中等5)
【東京大学教育学部附属中等教育学校 天文部】

1

研究目的

- 眼視観測の可能性を探る
- HRの予測値と差を調べる
- 放射領域の割り出しを行い、予測値との差を調べる
- 今後の観測のために、観測方法を確立させる。

2

観測方法

<計数観測>

東西南北天頂に分かれて流星の出現時刻、
発光時間、光度、色、痕の有無、群流星か散
在流星かを記録した。

ベガを0等星

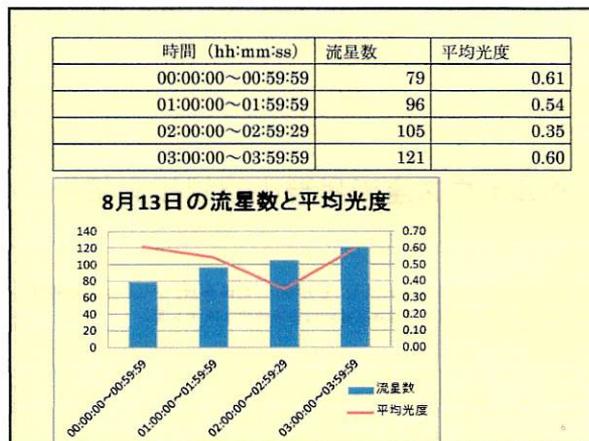
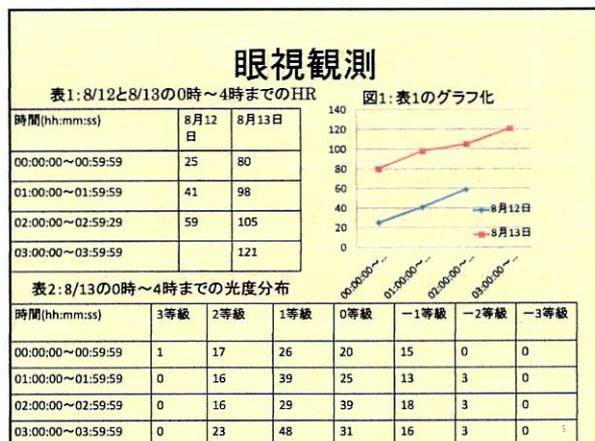
デネブ、アルタイルを1等星とした。

3

観測情報

- 機材
カメラ:Nikon D5000 レンズ:35mm
- 観測期間
8月11日～8月13日 0時～3時(4時まで)
- 観測場所
長野県松本市スポーティア乗鞍
(緯度:36、経度137)

4



結果

- 表1より、極大日の観測データの最大HR121に対し、予想がHR70であった。
- 図1より、両日とも明け方にかけて出現流星数が増加していることが分かる。
- 表2より、火球は観測されなかったが、明るい流星も出現した。

放射領域

- 眼視観測データと流星の写った写真から、群流星の写った写真を探す。
- 星図(心射図法)に群流星をプロットする。
- カメラの写真のゆがみは、ステラナビゲーター8を使用し処理した。
- プロットした群流星の軌道を延長する。

流星番号	出現時間
No.1	23:51:40
No.2	24:40:27
No.3	25:03:21
No.5	25:54:06
No.6	26:14:10
No.7	26:53:40
No.8	27:07:40
No.9	27:09:16
No.10	27:09:16

求めたペルセウス座流星群の放射領域は、
赤径: 03h21m11.64s 赤緯: +59° 10' 04.3"

オーストラリアでの“みずがめ座 η 流星群”の観測

柳 信一郎

みずがめ座 η 流星群の観測を目的とした海外遠征はこれで3回目になる。今年(2014年)はオーストラリア・ケアンズ近郊のアサートンという町で流星観測を行った。本報告では全天計数観測の結果をまとめると共に、1987年, 1989年の観測結果と比較した。

1. 遠征の記録

今年(2014年)を含めた過去3回の海外遠征は次の通りである。

1987年4月30日～5月10日 (このうち観測したのは3夜)

重野氏を隊長にして6名が遠征。メルボルン近郊のモアマ(Moama)とウォンブータ(Womboota)に分かれて4連カメラ2セットを用いて2地点同時観測を行った。

柳はラムカ観測(眼視観測)を行った。以下は柳の観測地のデータである。

2/3, 4/5 Womboota E144°34'09" S35°54'13" H=92m

5/6 Moama E144°44'56" S36°06'04" H=97m

1989年4月27日～5月7日 (このうち観測したのは3夜)

重野氏を隊長にして7名が遠征。内陸部のマウント・アイサ(Mt. Isa)で4連カメラ2セットを用いて2地点同時観測を行った。

柳はラムカ観測(眼視観測)を行った。以下は柳の観測地のデータである。

2/3, 4/5, 5/6 Mt. Isa E139°23'58" S20°57'36" H=400m

2014年5月3日～5月8日 (このうち観測したのは2夜)

家族旅行という形で2名で遠征。ケアンズ近郊のアサートン(Atherton)で全天計数観測を行った。

4/5, 5/6 Atherton E145°28'43" S17°14'10" H=770m

2. 観測結果

以下に2014年の観測結果を示す。

時刻は日本時間(JST)で表示する。現地時刻は日本時間+1時間(UT+10h)である。

観測方向は天頂で、記録はさぐり書きで行った。

DATE	JST	Time	aM	Spo	η Aqr	Lm	CL	Dir
May 2014								
04/05	03:00-03:30	30	19	5	14	5.5	0	Z
04/05	03:30-04:00	30	27	9	18	5.2	0	Z
04/05	04:00-04:30	30	15	8	7	4.5	0	Z
05/06	02:30-03:00	30	44	24	20	5.5	0	Z
05/06	03:00-03:30	30	31	14	17	5.0	0	Z
05/06	03:30-04:00	30	28	10	18	4.7	0	Z
05/06	04:00-04:30	30	51	16	35	4.5	0	Z

1日目と2日目で最微等級(Lm)がほぼ同じだったのに、散在流星の数が大きく異なってしまった。主たる原因は慣れない南天の星座だったので、群判定を間違えたためだと思う。

3. これまでの観測結果との比較

1987年, 1989年, 2014年の観測結果を比較する。

1987年, 1989年は空の一部を区切って“ラムカ観測”を行ったが、本報告ではこの時に記録されたラムカ外の流星も含めて全天計数観測とした。

光度比は1987年に求めた 1.57 と仮定した。

図-1 に太陽黄径と ZHR の関係を示す。

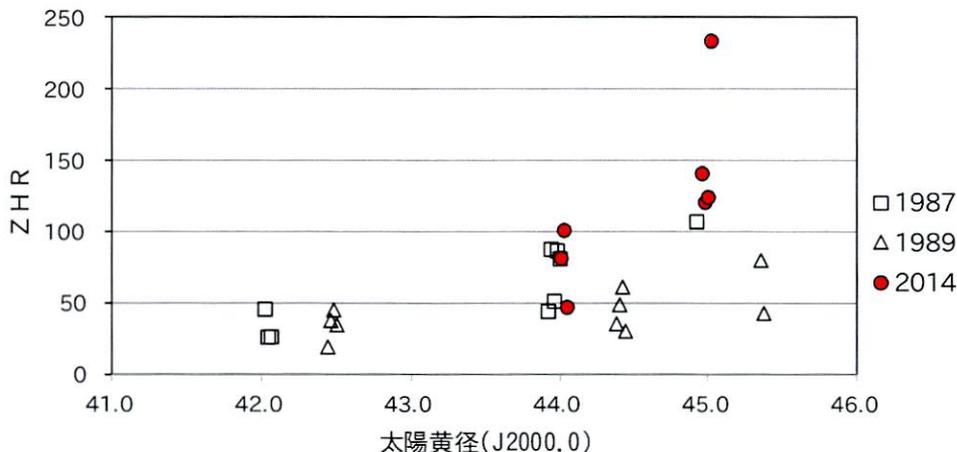


図-1 太陽黄径と ZHR の関係

図-1 によれば今年(2014年)の活動規模は1987年と同等だったと思われる。

しかしプロット状況から判断すると、輻射点の高度補正が充分であったとは思われない。

図-2 では補正を行う前の流星数、すなわち観測された群流星の1時間あたりの個数(HR)で比較する。但し観測は30分ごとに区切り、時間補正を行っている。(1987年5月5/6日だけは60分の観測記録を用いた。)

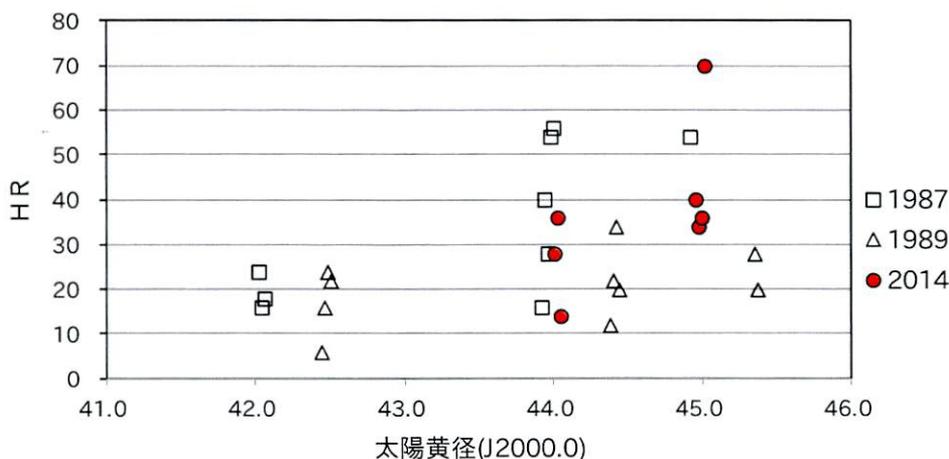


図-2 太陽黄径と HR の関係

縦スケールが広がった分、バラつきが大きくなったが、実際に観測された群流星の個数は図-2 の範囲で1時間あたり50以上、今年は70に達している。

今年の遠征では“みずがめ座η流星群”が健在であることを確認できた。

参考文献

同時流星写真観測オーストラリア遠征報告 WOMB00TA-MOAMA 編(1987年4月30日~5月10日)

同時流星写真観測オーストラリア遠征報告 Mt.Isa 編(1989年4月27日~5月7日)

表-1 これまでの観測記録

JST(UT+9h)	Dur (分)	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	計	最微星	雲量	太陽黄径 (J2000.0)	輻射点 高度	光度比 γ	HR	Fa	CHR	Fb	ZHR
1987.05.02/03	03h30m-04h00m					3	4	4	1			12	6.5	0	42.02	31	1.57	24	1.00	24.0	1.93	46
	04h00m-04h30m			2	2	2	2					8	6.5	0	42.04	37	1.57	16	1.00	16.0	1.67	27
	04h30m-05h00m					1	2	4	2			9	6.5	0	42.06	42	1.57	18	1.00	18.0	1.49	27
1987.05.04/05	02h30m-03h00m					2	3	1	2			8	6.5	0	43.92	21	1.57	16	1.00	16.0	2.79	45
	03h00m-03h30m				2	3	5	8	2			20	6.5	0	43.94	27	1.57	40	1.00	40.0	2.20	88
	03h30m-04h00m			1	2	1	2	4	4			14	6.5	0	43.96	33	1.57	28	1.00	28.0	1.85	52
	04h00m-04h30m			1	5	6	4	8	3			27	6.5	0	43.98	38	1.57	54	1.00	54.0	1.61	87
	04h30m-05h00m	1			2	7	7	7	4			28	6.5	0	44.00	43	1.57	56	1.00	56.0	1.45	81
1987.05.05/06	03h00m-04h00m				4	12	9	14	11	4		54	6.5	0	44.92	30	1.57	54	1.00	54.0	1.99	108
1989.05.02/03	02h30m-03h00m			1				1		1		3	6.5	0	42.44	18	1.57	6	1.00	6.0	3.31	20
	03h00m-03h30m						1	1	3	3		8	6.5	0	42.46	25	1.57	16	1.00	16.0	2.40	38
	03h30m-04h00m		2		1	1	1	5	1	1		12	6.5	0	42.48	32	1.57	24	1.00	24.0	1.91	46
	04h00m-04h30m				2	2	2	3	2			11	6.5	0	42.50	39	1.57	22	1.00	22.0	1.60	35
1989.05.04/05	02h30m-03h00m					1		2	2	1		6	6.5	0	44.38	19	1.57	12	1.00	12.0	3.01	36
	03h00m-03h30m			1			3	4	2		1	11	6.5	0	44.40	26	1.57	22	1.00	22.0	2.24	49
	03h30m-04h00m			1	3	4	1	5	2	1		17	6.5	0	44.42	33	1.57	34	1.00	34.0	1.81	62
	04h00m-04h30m			1	1	2		6				10	6.5	0	44.44	40	1.57	20	1.00	20.0	1.54	31
1989.05.05/06	02h30m-03h00m			1	1	2	3	3	1	1	2	14	6.5	0	45.35	20	1.57	28	1.00	28.0	2.87	80
	03h00m-03h30m				1		2	2	5			10	6.5	0	45.37	27	1.57	20	1.00	20.0	2.17	43
2014.05.04/05	03h00m-03h30m		1	1				4	8			14	5.5	0	44.01	33	1.57	28	1.57	44.0	1.86	82
	03h30m-04h00m		1				2	6	8	1		18	5.2	0	44.03	40	1.57	36	1.80	64.7	1.57	102
	04h00m-04h30m							3	4			7	4.5	0	44.05	47	1.57	14	2.46	34.5	1.38	48
2014.05.05/06	02h30m-03h00m		1			1		4	8	6		20	5.5	0	44.96	26	1.57	40	1.57	62.8	2.26	142
	03h00m-03h30m				2		3	5	7			17	5.0	0	44.98	33	1.57	34	1.97	66.9	1.81	121
	03h30m-04h00m				1	1	2	1	13			18	4.7	0	45.00	40	1.57	36	2.25	81.1	1.54	125
	04h00m-04h30m	1	1			1	3	17	12			35	4.5	0	45.02	47	1.57	70	2.46	172.5	1.36	234

ふたご座流星群の 有痕率の変化について

○戸田雅之 (日本流星研究会 流星痕同時観測チーム)

概略:

- ・ 毎年12月14日頃に出現数の極大を迎えるふたご座流星群は、眼視観測で流星痕の出現数が少ないことが知られている。しかし、超高感度デジタル一眼レフカメラでは多くの流星痕が観測されている。
- ・ 超高感度デジタル一眼レフカメラによるふたご座流星群の2010年から2013年までの観測を紹介する。
- ・ デジタルカメラ観測と眼視観測との流星痕数の違いを考察する。

観測

観測日時：2013年12月14日03h23m52s(JST)から
14日05h39m59sまで。

観測地：山梨県北杜市大泉町西出井

カメラ：ニコンD3.

レンズ：28mm/f1.4 (対角線画角：74度) .

設定：ISO 感度25,600.

シャッタースピード：1/1.3 秒 (0.77 秒).

インターバル：1 秒.

色温度：5560K

撮影枚数：6,934コマ

流星の検出:

今回も取得した6,934画像を全てPCのディスプレイ上で目視チェックし、流星と流星痕が写った画像をピックアップした。内訳は以下の通り。

全流星：117個.

ふたご座流星群の流星：96個.

ふたご座流星群の流星起源の流星痕：47個.

(短痕：38個、永続流星痕：9個)

散在流星：22個

散在流星起源の流星痕：15個

流星と流星痕の光度は流星用観測星図と比較して決定したので見かけの光度である。誤差は±1等。

流星の出現数 (2010年)

2010. Dec. 14/15

JST UT Gem. Train Spo. Train

15d

3h	18h*	43*	5*	9*	4*
4h	19h	36	5	8	6
5h	20h*	19*	2*	10*	6*

*印は正味60分の出現数ではない。

光度分布

2010.

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7

Gem	0	0	0	7	6	7	8	8	18	23	17	4	1
Tr	0	0	0	3	5	2	0	0	0	1	0	0	0
Spo	0	1	1	0	1	2	2	4	6	9	0	0	0
Tr	0	1	1	0	1	1	0	1	2	3	6	0	0

流星の出現数 (2012年)

2012. Dec. 13/14

JST UT Gem. Train Spo. Train

14d

0h	15h*	10*	5*	2*	
1h	16h	29	15	10	7
2h	17h	37	30	5	2
3h	18h	35	23	4	3
4h	19h	38	21	15	11
5h	20h*	19*	11*	11*	10*

*印は正味60分の出現数ではない。

光度分布

2012.

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7

Gem	0	2	10	8	12	25	21	23	22	26	16	7	0
Tr	0	2	10	8	10	22	17	16	13	10	1	1	0
Spo	0	0	0	1	2	3	7	4	11	11	9	2	0
Tr	0	0	0	1	0	3	6	3	8	7	6	1	0

流星の出現数 (2013年)

2013. Dec. 13/14

JST UT Gem. Train Spo. Train

14d

3h	18h*	14*	2*	2*	0*
4h	19h	45	20	10	8
5h	20h*	36*	21*	10*	7*

*印は正味60分の出現数ではない。

光度分布

2013.

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7

Gem	0	3	2	3	8	8	3	11	12	23	17	5	0
Tr	0	3	2	1	6	6	2	2	2	4	6	1	0
Spo	0	1	0	0	0	3	2	0	0	5	8	3	0
Tr	0	1	0	0	0	3	1	0	2	3	3	0	0

有痕率

有痕率 (= 流星痕出現数 / 流星出現数)

ふたご座流星群 (V_{∞} (km/s) = 35)

Year % Train / Meteor Method author

1990	: 3.5%	(80 / 2318)	NE	S. J. Evans and N. M. Bone(1993)
1991	: 1.8%	(21 / 1167)	NE	S. J. Evans and N. M. Bone(1993)
1993	: 5.4%	(149 / 2763)	NE	S. J. Evans and N. M. Bone(1996)
1996	: 4.0%	(101 / 2543)	NE	S. J. Evans and N. M. Bone(2001)
1999	: 3.7%	(56 / 1510)	NE	N. M. Bone(2005)
2001	: 3.6%	(101 / 2839)	NE	N. Bone(2007)
2012	: 2.8%	(14 / 501)	NE	Fuchu Astron. Soc. (2013)

2010	: 12%	(12 / 99)	DC	2013秋季年会
2012	: 67%	(110 / 173)	DC	2013秋季年会
2013	: 48%	(47 / 96)	DC	2014春季年会

Method : NE = Naked Eye, DC = Digital Camera.

デジタルカメラによる流星痕観測数が多い

2012年ふたご座流星群の観測で173個の群流星と110個の流星痕を観測。2013年では96個の群流星に対し47個の流星痕を観測した。

流星痕の有痕率(=出現確率)は2010年12%、2012年67%、2013年は48%。

眼視観測で高い出現確率で観測されたことはない。

デジタルカメラによる流星痕観測数が多い

眼視観測との有痕率の違いを、観測条件由来のものとして考察した。

変わらない：カメラ、レンズ、絞りとISO設定。

異なるもの：観測地、透明度、シャッタースピード(1秒→0.77秒)、カラーバランス、観測時間中の流星出現数。

デジタルカメラによる流星痕観測数が多い

考察を進めてみた。

デジタルカメラの高感度特性が大きく貢献。

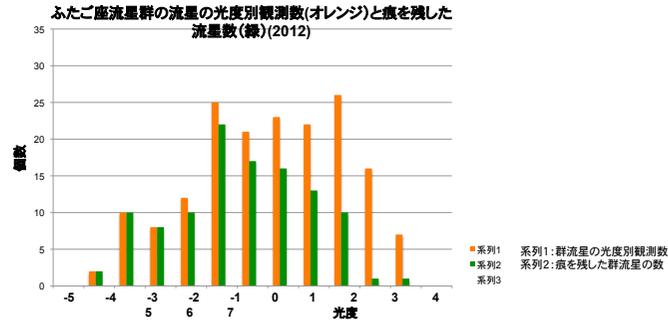
- (1) 眼視観測では捉えにくい暗い流星による流星痕や1秒以内で消失する流星痕を撮像している。
- (2) デジタルカメラでは見逃しが発生しない
- (3) 眼視観測で流星痕と判定するのに若干の時間を要する。

まとめ

- ・ふたご座流星群の有痕率は眼視観測と比べると1ケタ多い。
- ・デジカメ観測による流星痕有痕率の多さは、超高感度に助けられていると考える。デジカメ観測は眼視観測と比べて
 - (1) 見逃しが少ない
 - (2) 暗い流星による流星痕は眼視では捕獲不能?
 - (3) 流星痕と認知するまで時間がかかるので、その間に流星痕は消えてしまう。
- ・流星痕出現数の変動と流星群活動との関連はあるか? (例えば母彗星回帰を前に流星痕出現数が変化するか)

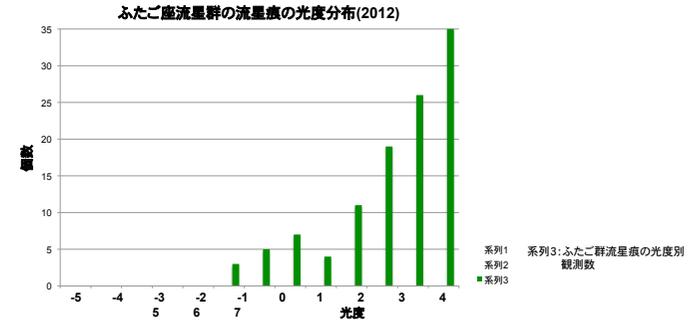
ふたご群流星の光度分布(2012)

流星の光度：流星の最も明るい部分の光度を用いた。
明るい流星ほど痕を残しやすい。



ふたご群流星痕の光度分布(2012)

流星痕の光度：流星出現後の次のコマで写った痕の最も明るい光度を用いた。
流星出現後の次のコマで写った痕の最も明るい光度を用いた



流星痕の色別光度分布

痕の光度：流星出現後の次のコマで写った痕の最も明るい部分。
痕の色：上と同じ条件で顕著な色を記述。少数だが1つの流星痕で複数の色を認めたものもある。その場合は痕の実数である合計(ALL)とは一致しない。

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7

Green	3	5	7	4	10	14	12	5				
Yellow				1	2	5	1					
Orange				1	2							
White				1	1	1	1					
NoClass							1	12	30			
ALL	3	5	7	4	11	19	26	35				

痕の色別光度分布(2012)

2015. 2. 1. 第139回流星物理セミナー@渋谷区神宮前区民会館

2014年ほうおう座流星群遠征報告

戸田雅之 (チーム流星痕 / 日本流星研究会)

2015. 2. 1. 第139回流星物理セミナー@渋谷区神宮前区民会館

2014年ほうおう座流星群の観測目的

- ・低速の流星群 (約9km/sec)
- ・流星痕が目撃されている(1956年)
- ・ほうおう座流星群の流星痕の確認。
→低速の流星群でも流星痕は見られるか?
→2010年のHayabusa Re-entryに伴う流星痕が撮影されている。しかし、Massが違いすぎる。
- ・この目でほうおう座流星群を見てみたい。

2015. 2. 1. 第139回流星物理セミナー@渋谷区神宮前区民会館

○高感度デジタル一眼レフカメラで観測した流星と流星痕

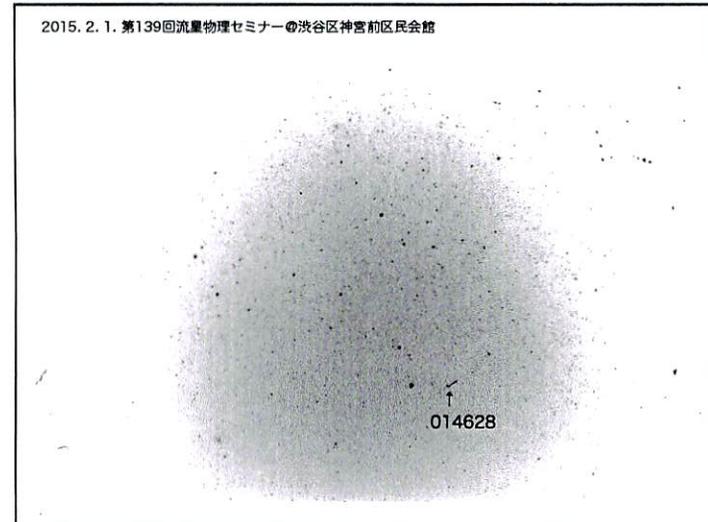
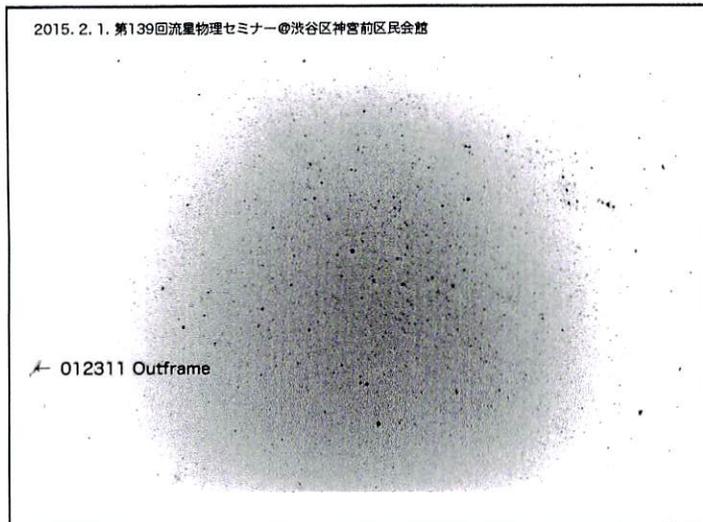
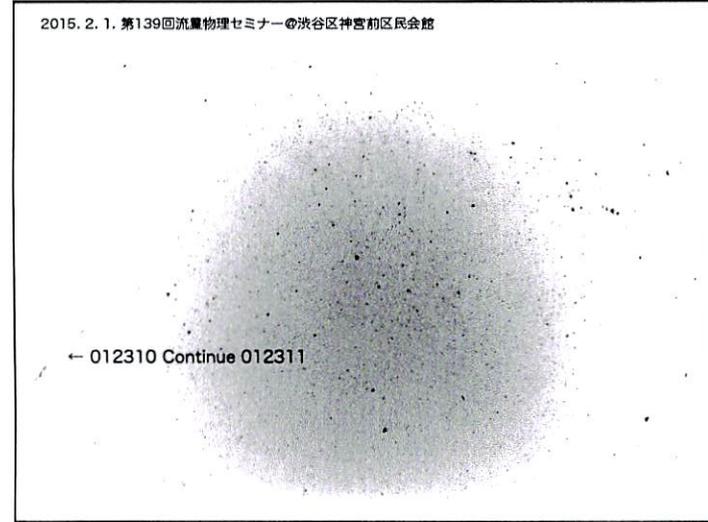
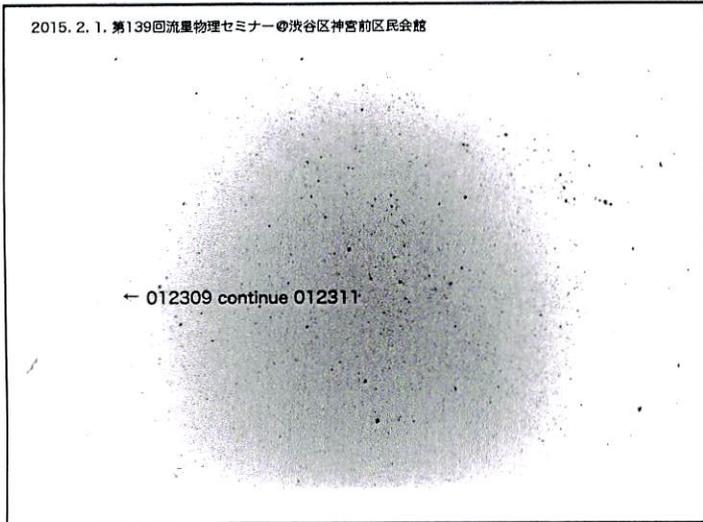
観測日 : 2014 Dec.02, (全チェック3回目)

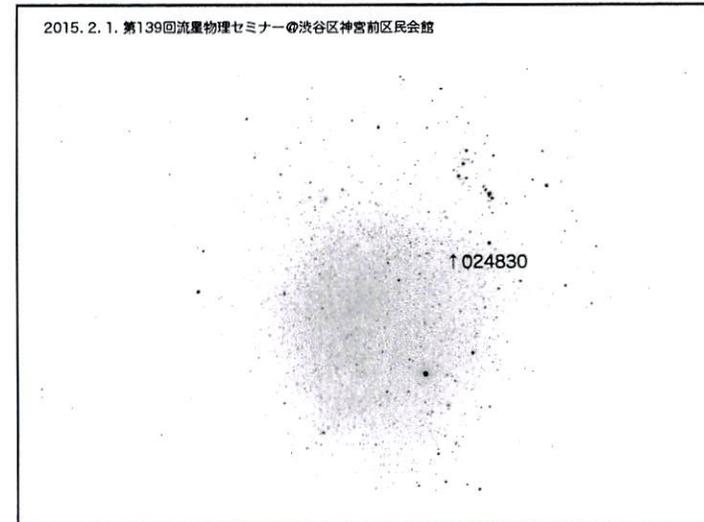
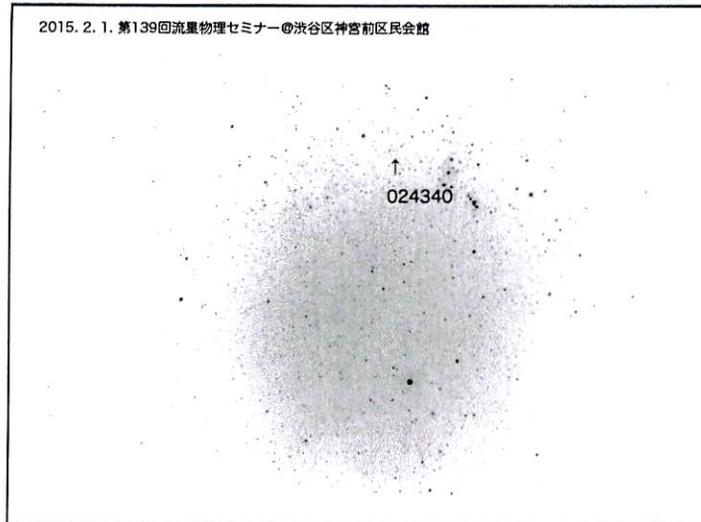
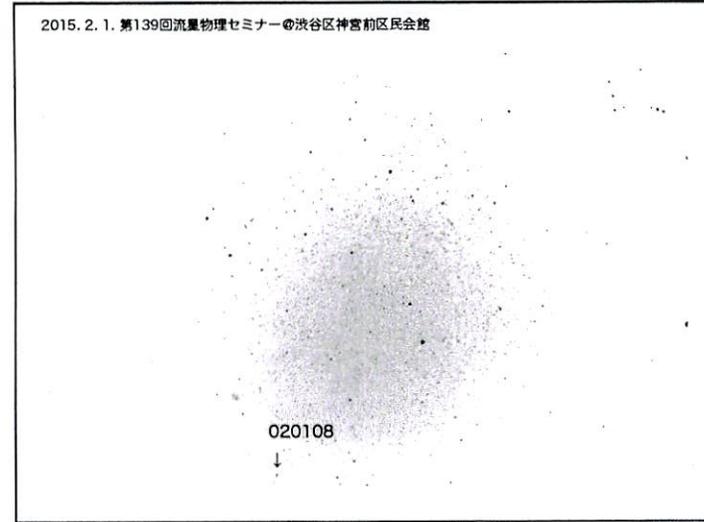
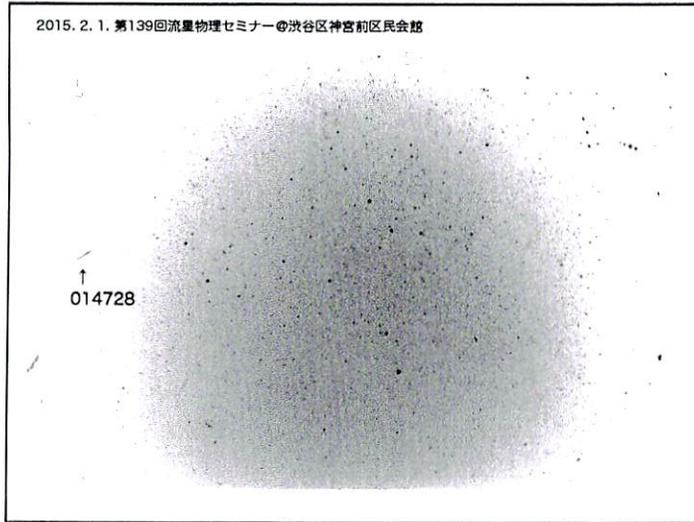
Check 1 2 3 hhmss 出現星座	光度 群/散在	Check 1 2 3 hhmss 出現星座	光度 群/散在
(00hUT)			
- * 004746 ふたご	5 散在【追加】	*** 020010 かに	4 散在
*** 004832 ぎよしゃ東側	4 Pho?	- ** 020108 かに	4 散在【追加】
*** 005324 ぎよしゃ中央	-1 散在 frameout 痕7秒	(02h09m14s-02h18m40s : 中断)	
(01hUT)			
*** 010236 こいぬ	3 Pho? 痕1秒	- ** 022009 オリオン	1 散在 痕1秒【追加】
*** 010748 オリオン	4 散在	- ** 022433 オリオン	6 散在【追加】
*** 011335 オリオン北部	5 散在	*** 022803 こいぬ	5 散在
- * 011529 ふたご	6 散在【追加】	*** 024320 ふたご→こいぬ	1 散在 痕1秒
*** 012105 ぎよしゃ東側	4 散在	- * 024340	5 Pho? 痕2秒【追加】
*** 012309 ふたご経路長い	1 Pho? 痕3秒	*** 024533 オリオン	-1 散在 遅い 痕1秒
- * 013759 ぎよしゃ→ふたご	5 散在【追加】	- ** 024546 ふたご	5 散在【追加】
- * 014543 ふたご	4 散在【追加】	- ** 024830 オリオン	5 Pho?【追加】
- ** 014628 こいぬ	3 Pho?【追加】		
*** 014728 ふたご	2 Pho?		
- * 015227 ふたご	6 散在【追加】		
*** 015916 かに	3 散在 痕2秒		

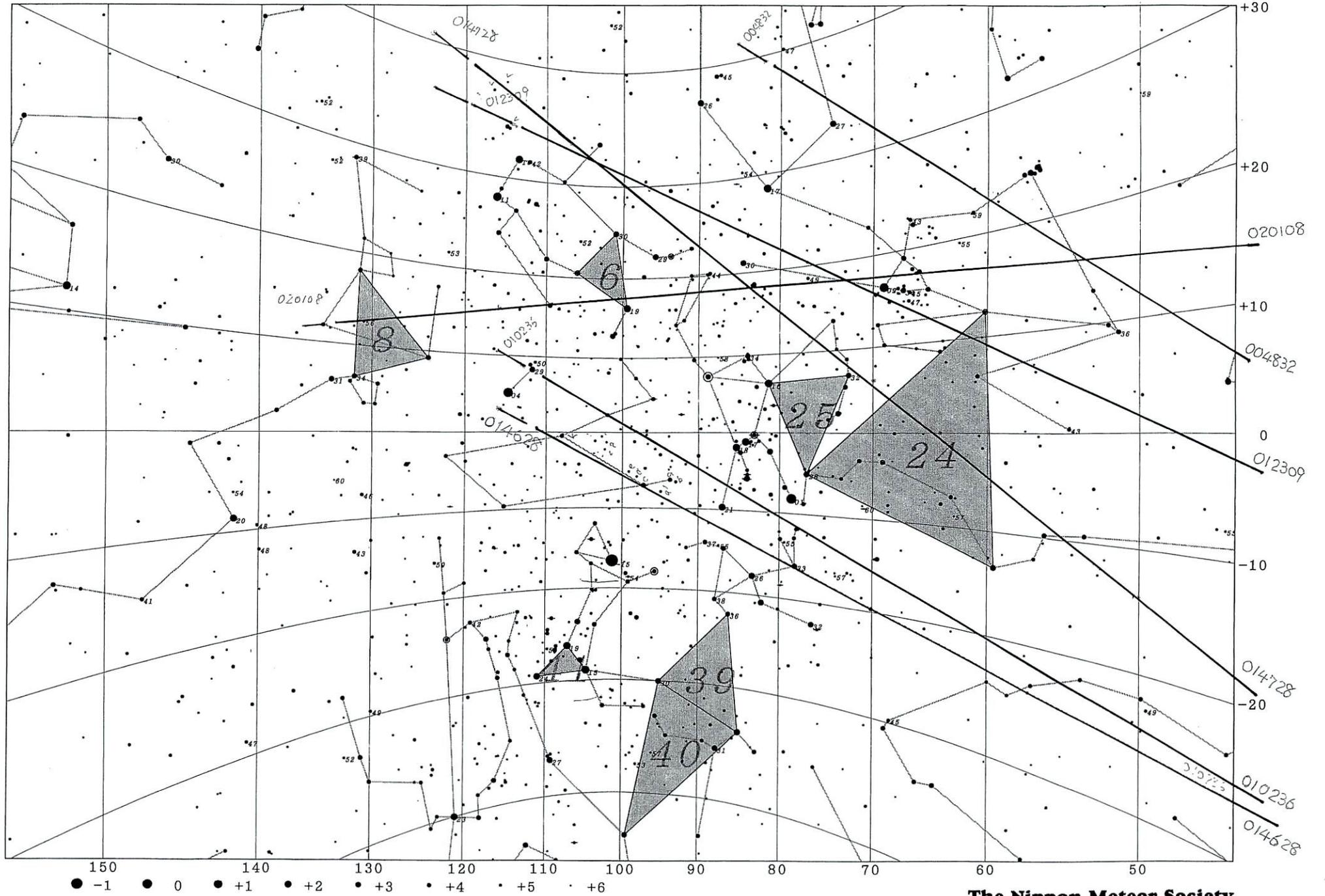
2015. 2. 1. 第139回流星物理セミナー@渋谷区神宮前区民会館

○光度分布

	-1	0	1	2	3	4	5	6	平均光度
ほうおう群			1	1	2	1	2		3.29
Tr			1	1			1		
散在流星	2		2		1	5	5	2	3.47
Tr	2		2		1	1			







● -1 ● 0 ● +1 ● +2 ● +3 ● +4 ● +5 ● +6

1. はじめに

太陽をかすめる彗星の代表の1つに 1965 年の池谷・関彗星がある。その後、太陽観測衛星(SOHO など)によって、太陽をかすめる小さな彗星が多数発見されるようになった。JPL の彗星軌道リストのかなりの部分を SOHO 彗星が占めている。近日点を通過しないで崩壊してしまう彗星が大半(ISON 彗星等)である。彗星を観望する立場では残念だが、その残渣が地球と遭遇するのであれば、流星ファンには別の期待、楽しみを提供してくれることになる。



2. 太陽をかすめる彗星のグループ

サングレーザー、サンスカーターと呼ばれたりするが、<http://www.ast.cam.ac.uk/~jds/klist.htm> による分類では次のようになる。

- Kreutz group I objects (1334 comets= 69%)
- Kreutz group II objects (304 comets = 16%)
- Probable Kreutz group (4+ comets)
- Meyer group (117 comets = 6%)
- Marsden group (39 comets/returns = 2%)
- Kracht group I (38 comets/returns = 2%)
- Kracht group II (6 comet apparitions, 2/3 comets = 0%)
- Other comets (93 comets/returns = 5%)
- All SOHO and STEREO comets (2022 comets)

このうち、Marsden group と Kracht group は昼おひつじ群、南δみずがめ群、さらには四分儀群に関連すると言われている。

3. 彗星からの流星出現の可能性・出現予想

「彗星の軌道要素よりの流星輻射点の計算法と、東京天文台での方法に就いて」(廣瀬秀雄、東京天文台報、10, 288-296, 1953) を教科書として学び、大学生の時に異なる方法で南δみずがめ群の輻射点移動を計算したことがある「輻射点の東方移動」(小関正広、星の友、19, 21-24, 1969)。この中で、筆者独自の“軌道半長径と近日点の方向を固定する”という方法を紹介している。これは、「流星群のプロファイリングーしし群を例として」(小関正広、流星物理セミナー、2011/10/2)と同じ発想である。以前であれば、対数表を片手にコツコツ計算するしかなかったが、現在では、ありきたりのエクセルで十分に用を足すことができる。次ページに計算画面を示す。

2行目：full_name 以下が彗星の原初軌道。

4行目以下：太陽黄経 0.1 度刻みで、地球と交差するように変化させた軌道と予想輻射点。

L 列：原初軌道と変化させた軌道の D_{SH} (ただし、次式の第4項を除く)。

$$[D(A, B)]^2 = (e_A - e_B)^2 + (q_A - q_B)^2 + \left(2 \sin \frac{I_{AB}}{2}\right)^2 + \left[\frac{1}{2}(e_A + e_B)2 \sin \frac{\Pi_{AB}}{2}\right]^2$$

3 0 行AN列： D_{SH} の最小値。

一般に、極小値は2回現れる。

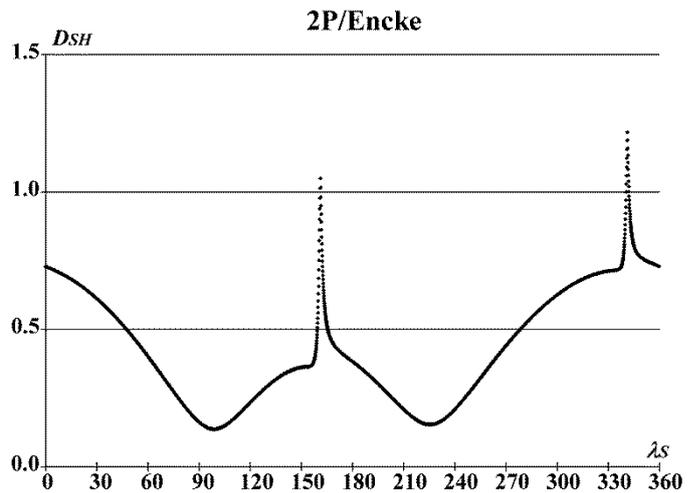
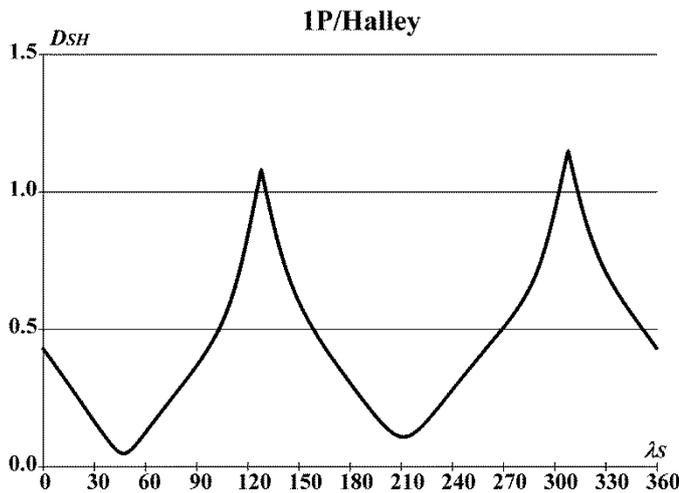
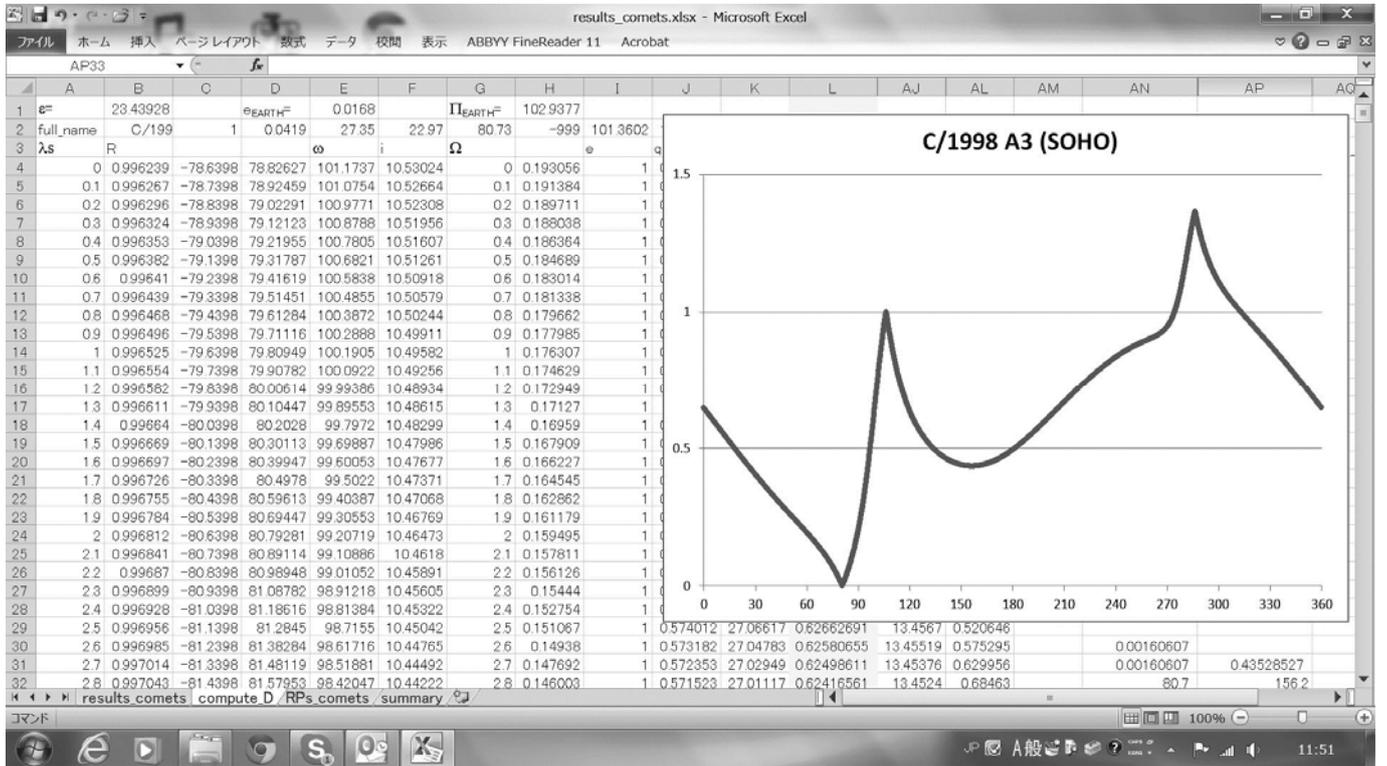
3 1 行AN列：第1回目の極小値、AP列：第2回目の極小値

3 2 行AN列：第1回目の極小値となる太陽黄経、AP列：第2回の極小値となる太陽黄経。

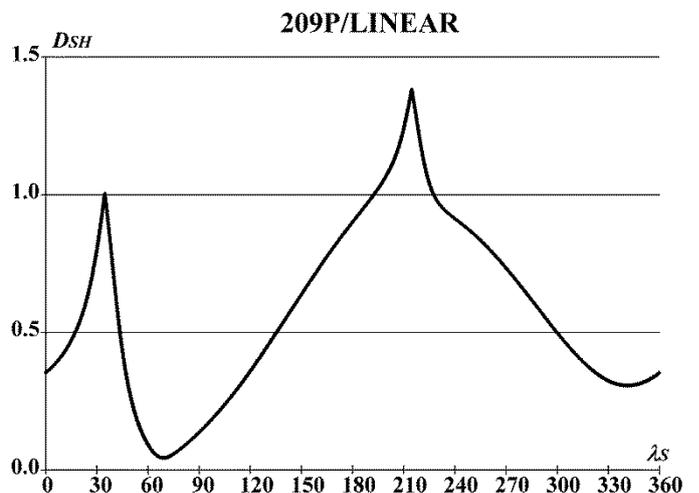
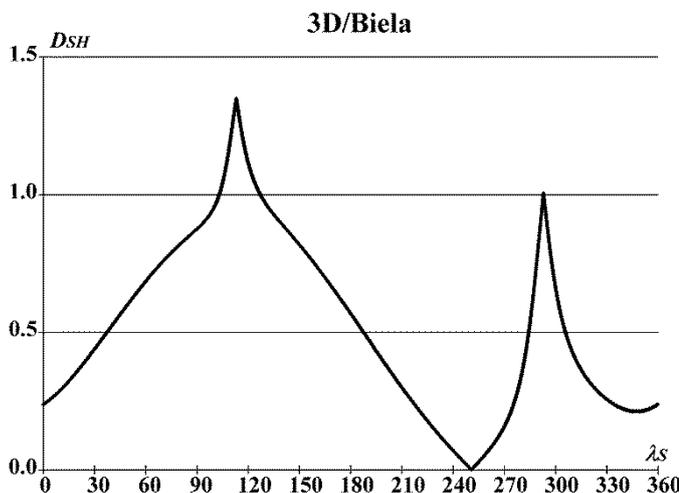
グラフは太陽黄経 0-360 度の間における D_{SH} の変化。

操作は JPL のサイトで取得した軌道要素 (多少手を加える) を full_name 以下に貼り付けるだけである。貼り付けてから、グラフが表示されるまでは<瞬く間>である。対数表を使ったら、0.1 度刻みで計算しないで、もっとスマートな方法を考えることになるだろうが、力技で済んでしまう。

計算例として示した、C/1998 A3 (SOHO)は Marsden group の彗星であるが、本稿では主として Kreutz group を扱うことにする。まずは、 D_{SH} の数値が意味するところをよく知られている彗星・小惑星を例として考察することにする。

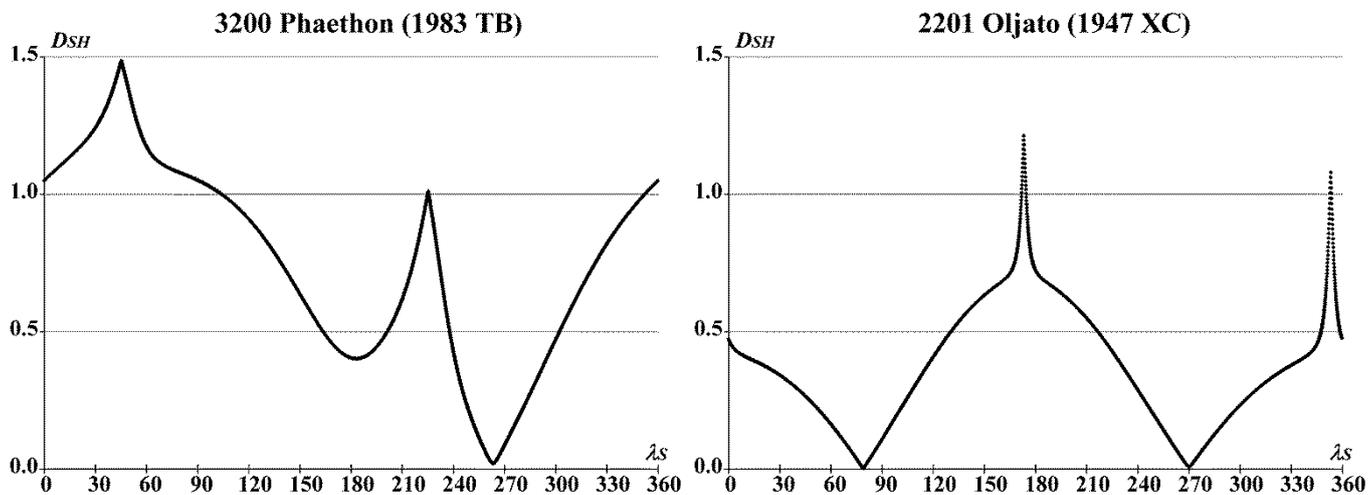


近日点引数 ω が90度または270度に近い場合には、2回の極小値がほぼ同じ値になり、流星活動が2回見られることになる。1P/Halley の場合は、 η -みずがめ群とオリオン群、2P/Encke の場合には、昼おうし群と夜のおうし群となる。



近日点引数が90度または270度から大きく外れると、2回の極小値は大きく異なり、一方の極小値においてだけ流星活動が見られる。

ここで別の例を見てみよう。3200 Phaethon (1983 TB)と 2201 Oljato (1947 XC)はともに活動を終えた彗星核と推定されて研究が進められているものである。3200 Phaethon (1983 TB)は、ふたご群の母天体として有力なものだが、昼ろくぶんぎ群にも関連すると考えられている。 $\lambda_s=183$ で $D_{SH}=0.40$ となっているのが、ろくぶんぎ群に相当する。ただし、ろくぶんぎ群と直接関連するのは 3200 Phaethon (1983 TB)の兄弟分 2005 UD ではないかと言われている。また、2201 Oljato (1947 XC)は $\lambda_s=79$ で $D_{SH}=0.002$ 、 $\lambda_s=270$ で $D_{SH}=0.008$ となり、極めて盛んな流星活動が期待され、前者は昼 β -おうし群、 χ -オリオン群の活動領域に相当するが、他の群や散在流星の活動に埋もれて、確実に関連すると見られる流星群は IAU のリストでも示されていない。



いよいよ「太陽をかすめる彗星」から流星が出現する可能性について見てみよう。C/1998 A3 (SOHO)は Marsden group の例であり、96P/Machholz 1 はそれから派生した彗星と推定されているものである。

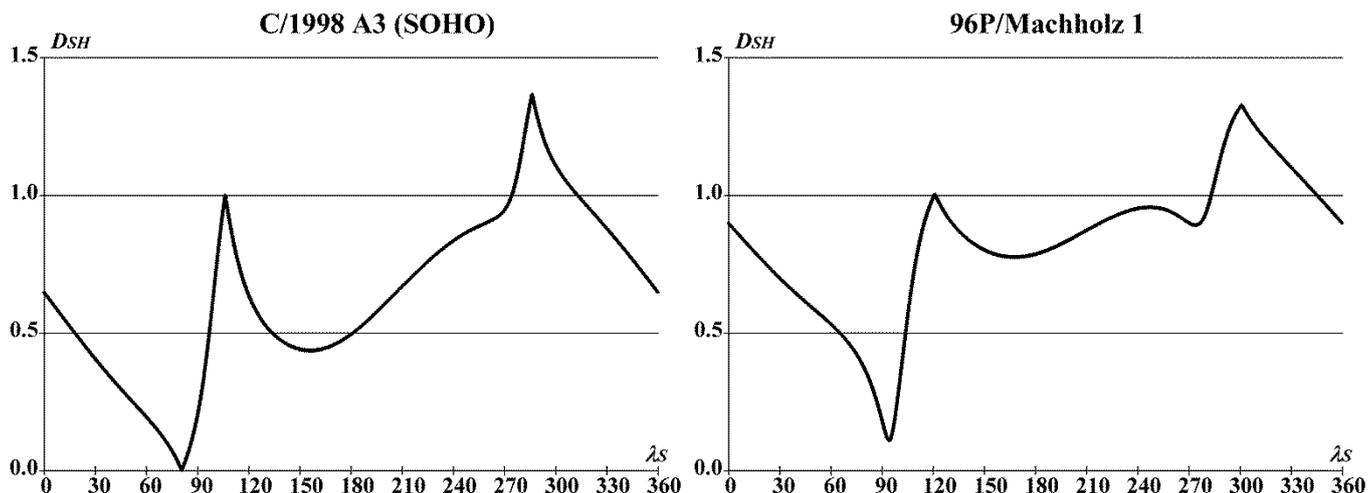
Marsden group や 96P/Machholz の場合には、以上で述べた例に従えば、流星活動が見られるのは1回だけということになる。しかし、これらが δ -みずがめ群やしぶんぎ群の源泉とされるのは長期間の摂動を考慮した場合のことである。つまり、現在の軌道が似ているというよりも、過去の軌道が現在の流星群の軌道に似ているかを検討する必要がある。

しかし、この問題については、様々な研究者が詳しく研究しているのでここではそれらの結果を単純化して説明するのにとどめる。

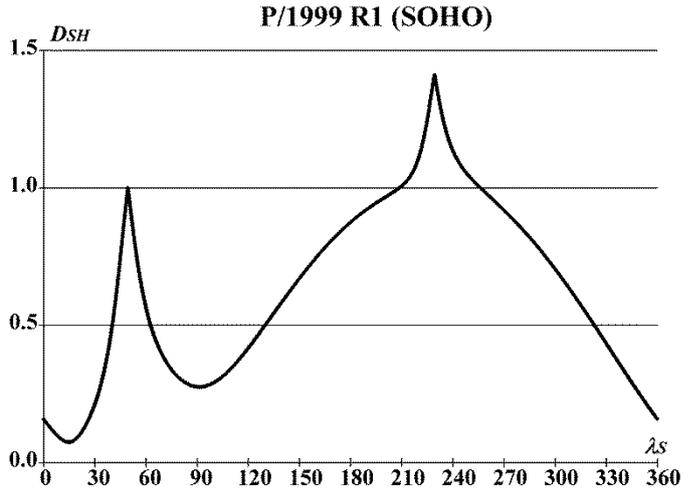
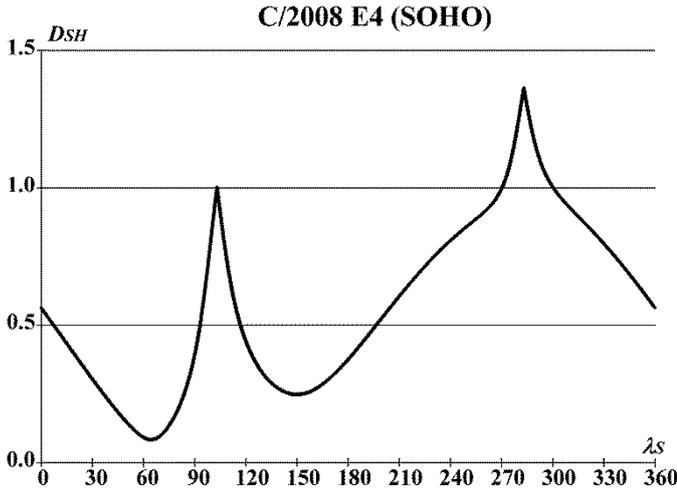
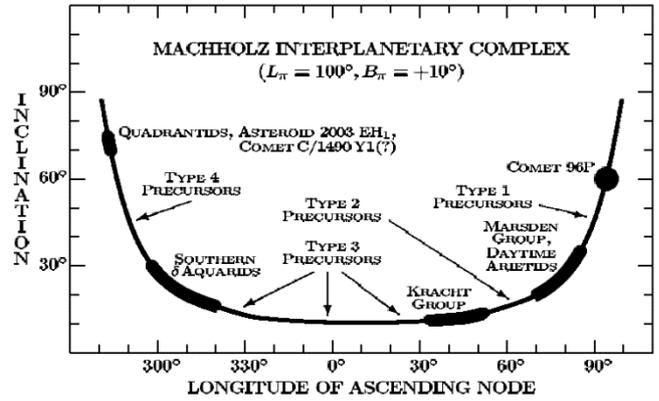
3D/Biela の場合に「アンドロメダ流星雨」を生じることが先の図から理解できるが、摂動によって軌道面が回転したらどうなるかを考えてみよう。昇降点・降交点は移動し、「アンドロメダ流星雨」を生じていた側(降交点)は地球軌道から離れて、流星雨は出現しなくなる。これが現在の状況である。しかし、回転が続けば、逆の側(昇降点)で地球軌道に接近して流星活動が見られるようになるはずである。 $\lambda_s=347.3$ 付近で昼間群として活動するようになるという予想がなされている。

ふたご群と昼ろくぶんぎ群との関係も同様で、軌道面の回転を考えると、3200 Phaethon (1983 TB)によって $\lambda_s=183.0$ 付近での昼間流星群が想定できるのである。

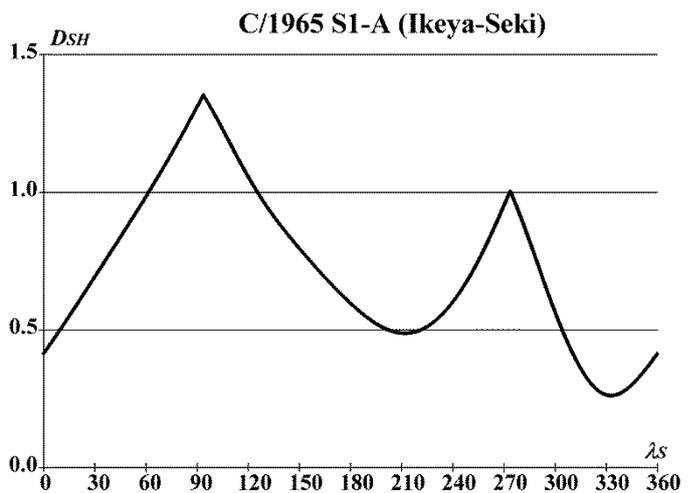
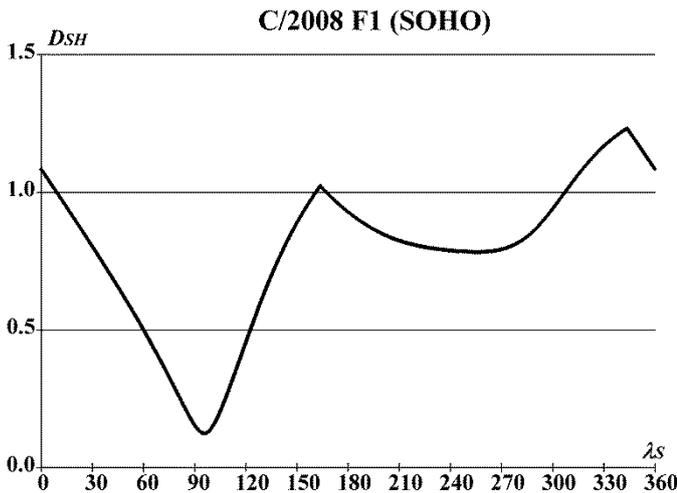
C/1983 A3 (SOHO)でも軌道面が回転すれば、 $\lambda_s=80.7$ (降交点)と逆側(昇降点) $\lambda_s=156.2$ 付近での流星活動が想定できる。これが δ -みずがめ群に相当するという考えが成り立つ。実際には摂動は軌道面の回転だけ働くわけではないので、活動時期また輻射点の位置は実際の δ -みずがめ群に近いとする計算結果が出ている。さらに長期間の摂動が働けば、しぶんぎ群の活動にも関連するという推定も提唱されている。



下図の左側が Kracht group I、右側が II である。この Kracht group も Marsden group に近縁のものとしてされている。Sekanina による右図を見てみよう。 $(L_{II}, B_{II}) = (100, 10)$ を軸として軌道面が回転したとして、しぶんぎ群、南δみずがめ群、Kracht group、Marsden group・昼おひつじ群、96P/Machholz 1 の関係を示したものである。Kracht group I/II 自体は Marsden group 同様に D_{SH} の値がかなり小さくなり、流星出現の可能性がかなり高いと推定できるが、輻射点等が Marsden group のものと識別困難なほどに近い。また、これらのグループに属する彗星はそれほど多くない。

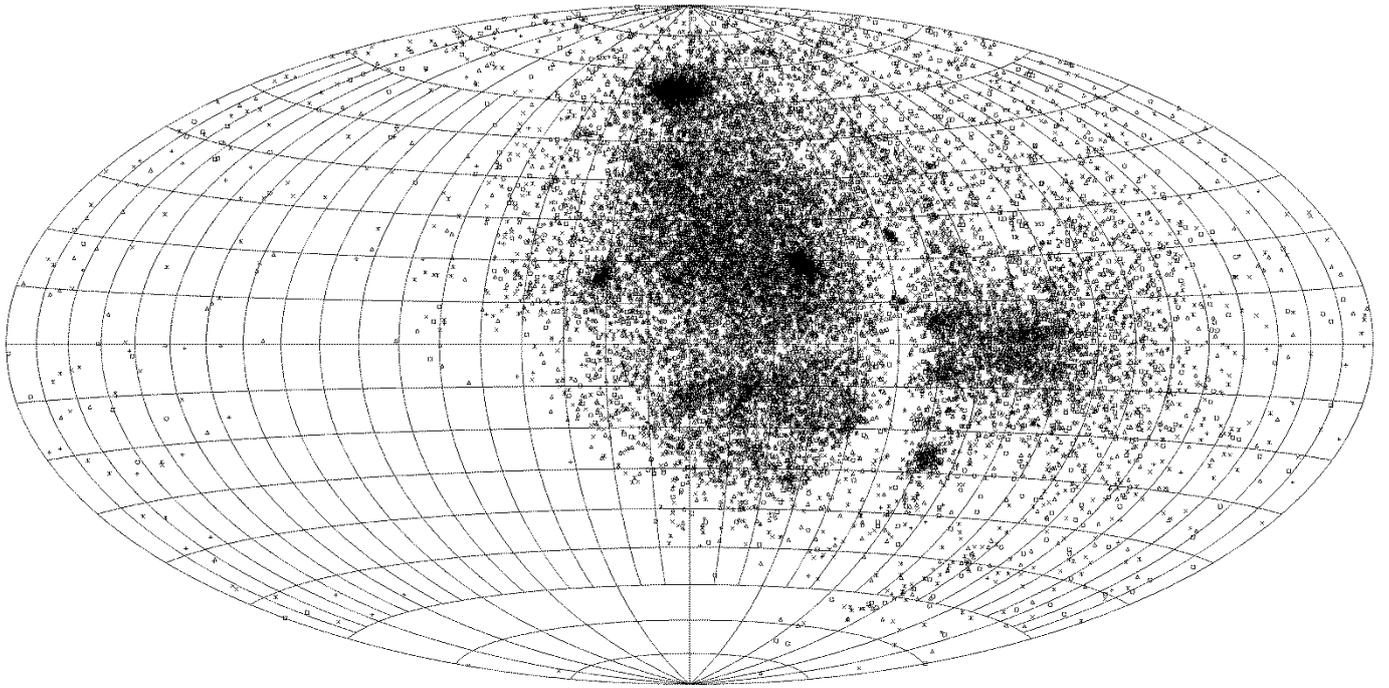


2 番目に多い Meyer group を下図左側に示す。Marsden group の場合と同様のグラフであり、単純に考えれば流星活動が見られるのは 1 回と考えられる。これもかなり D_{SH} が小さくなる。従って、そこそこの流星活動が期待されるが、このグループに関連すると見られる短周期彗星は発見されておらず、流星活動も知られていない。Harvard の電波観測の中には数個、 $DSH < 0.2$ となる流星が含まれる。しかし、とても流星《群》の活動を認めることのできるレベルではない。



太陽をかすめる彗星の中で最大グループである Kreutz group の例として、C/1965 S1-A (Ikeya-Seki) を上図右側に示したが、このグループは残念ながら D_{SH} があまり小さくならない。1P/Halley と 2P/Encke の例に見られるように、一般に $DSH < 0.2$ 程度が流星活動の見られる範囲と考えられる。単純に考えれば、Kreutz group からの流星出現はありえないことになる。

しかし、Kreutz group は巨大なグループであり、実は Kracht group 同様、I/II の区別があり、さらに、降交点 ($\lambda_s \sim 330$) で C/1965 S1-A (Ikeya-Seki) よりも地球軌道に接近するものがある。その中で C/2007 X13 (SOHO) は最も条件が良い。しかも SnotCo ネットの観測の中に 1 個だけではあるが、極めて類似した軌道をもつ流星が記録されている。輻射点が太陽に近い方向にあることを考えれば、貴重なデータと言える。もちろん、観測困難



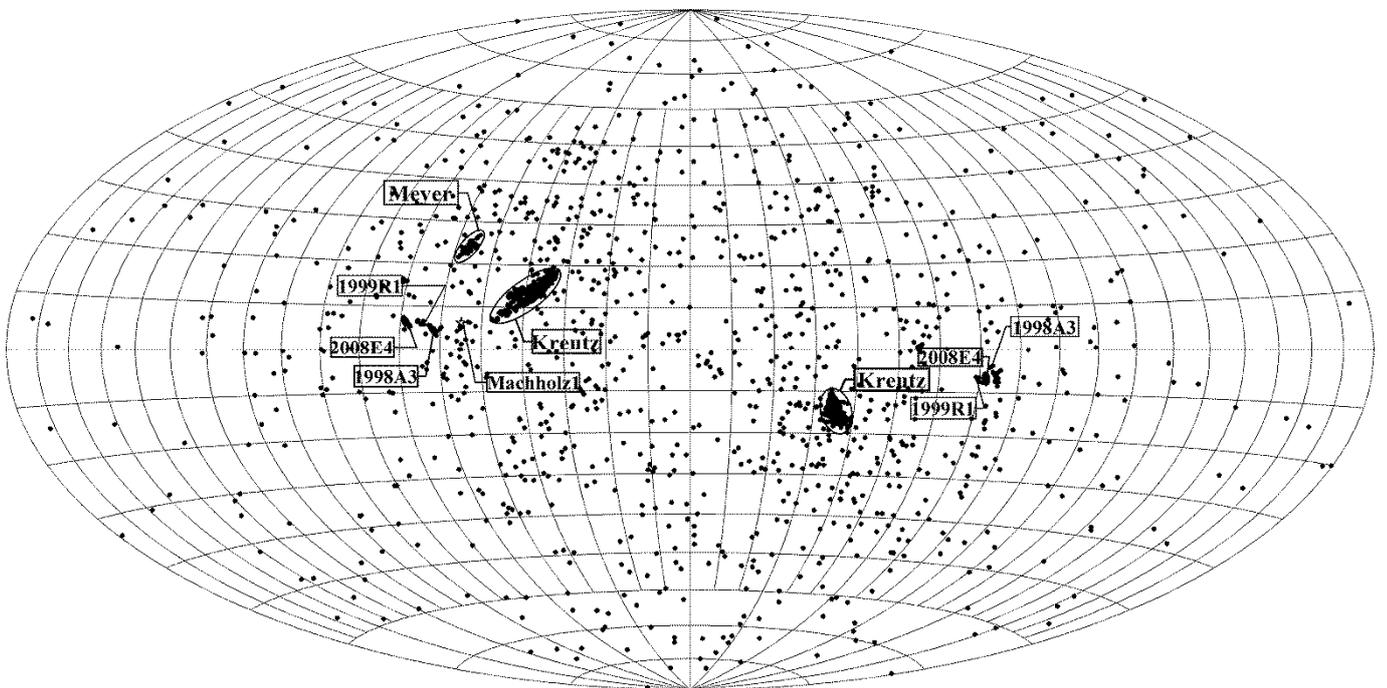
な状況にあるわけで、「流星群」と言えるだけの数ではない。275< λ_s <335 の時期について、SonotaCo ネットで得られた輻射点分布を下図に示す。Kreutz group の輻射点 that 想定される($\lambda-\lambda_s, \beta$)=(310,10)付近に明瞭な輻射点の集中は見られていない。 $(\lambda-\lambda_s, \beta)$ =(290, 10)付近に見られる集中は λ_s <290 の流星によるもので、SonotaCo ネットでは散在と判定されている流星である。電波観測は昼間群に強いはずであるが、Kreutz group と軌道の類似する流星群は知られていない。

Kreutz group の中には降交点よりも昇降点で地球軌道に接近するものもあり、C/2007 M6 (SOHO)はその例である。興味深いことに、 $D_{SH}>0.2$ ではあるが、こちらには関連する可能性を持つ観測が存在する。関連を指摘するには程遠いとは言え、今後の注意が必要であろう。

4. まとめ

太陽をかすめる彗星の中には、Marsden group のように流星群の起源と目されるものが存在する。一方、最大のグループである Kreutz group を起源とする確実な流星活動は残念ながら認められない。

しかし、膨大な数の太陽をかすめる彗星から、さらにそれらの彗星の祖先(太陽をかすめる彗星は近日点距離 $q<2$ の超長周期彗星から発生したと考えられている)からは大量の流星物質が放出されていることは明らかであり、それらの内の一部が摂動を受けて地球軌道に接近することは容易に考えられる。下図は放物線に近い軌道の彗星(逆を言えば短周期彗星を除いた)から予想される輻射点分布である。短周期彗星や小惑星からの輻射点分布とは異なり、地球向点方向に輻射点が多く存在する。我々が「夕方よりも朝方に流星が多く見える」と観測するのは、太陽をかすめる彗星も含めて、放物線に近い軌道をたどる彗星を起源とする流星を見ているのであろう。



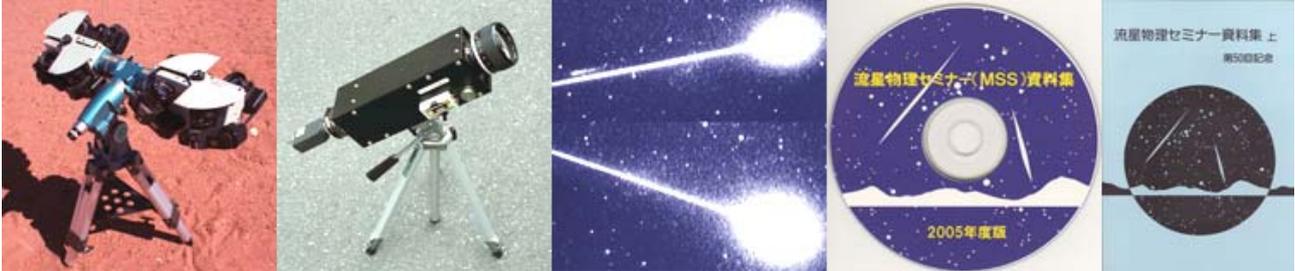
full_name	e	q	i	ω	Ω	I	D_{SH}	λ_s	α	δ	Vg	$\lambda-\lambda_s$	β	Shower
1P/Halley	0.967	0.586	162.3	111.3	58.4									
	0.966	0.605	163.2	100.6	47.2	3.5	0.047	47.2	338.6	-0.3	66.1	292.9	8.1	η -Aquariids
	0.969	0.545	163.5	85.4	31.3	-8.0	0.107	211.3	96.9	15.6	66.2	245.4	-7.7	Orionids
2P/Encke	0.848	0.336	11.8	186.5	334.6									
	0.850	0.331	1.5	242.2	278.8	11.0	0.136	98.8	86.0	22.2	29.3	347.5	-1.2	D-Taurids
	0.846	0.341	1.5	295.6	225.4	-12.3	0.152	225.4	55.3	20.9	28.9	192.4	1.2	Taurids
3D/Biela	0.751	0.879	13.2	221.7	250.7									
	0.751	0.879	13.2	221.6	250.7	0.0	0.000	250.7	26.2	46.3	15.8	151.8	32.8	Andromedids
	0.773	0.801	10.5	303.8	167.3	15.9	0.211	347.3	13.9	-17.7	17.7	18.3	-21.7	
209P/LINEAR	0.689	0.914	19.1	149.7	66.5									
	0.677	0.948	17.7	147.1	69.2	-1.7	0.042	69.2	118.7	69.7	15.3	35.1	47.7	
	0.727	0.802	11.4	56.8	161.3	23.0	0.305	341.3	139.7	-8.5	17.9	163.7	-23.0	
2201 Oljato (1947 XC)	0.713	0.624	2.5	98.2	75.0									
	0.713	0.624	2.5	94.2	79.0	-0.2	0.002	79.0	80.7	26.9	20.3	2.7	3.7	
	0.713	0.623	2.5	83.1	90.1	0.7	0.008	270.1	87.2	19.5	20.4	177.2	-3.9	χ -Orionids
3200 Phaethon (1983 TB)	0.890	0.140	22.2	322.1	265.3									
	0.794	0.262	18.2	228.0	3.0	-30.3	0.401	183.0	158.0	-4.5	28.8	338.4	-12.8	D-Sextanids
	0.881	0.151	23.2	323.9	263.4	-1.2	0.020	263.4	115.3	32.5	33.4	208.1	11.0	Geminids
C/1998 A3 (SOHO)	1	0.042	27.4	23.0	80.7									
	1	0.040	27.3	23.0	80.7	0.0	0.002	80.7	48.7	22.9	46.4	331.7	4.7	
	1	0.219	12.6	124.5	336.2	-32.7	0.435	156.2	355.3	-9.0	38.4	195.9	-6.3	
96P/Machholz 1	0.959	0.124	58.3	14.8	94.3									
	0.993	0.020	57.9	14.8	94.2	0.4	0.109	94.2	55.7	26.1	46.1	325.2	6.2	D-Arietids
C/2008 E4 (SOHO)	1	0.050	13.1	50.6	51.9									
	1	0.110	16.4	38.5	64.4	-4.6	0.082	64.4	37.8	20.4	42.6	337.6	5.2	
	1	0.174	13.4	130.9	330.0	-17.3	0.247	150.0	351.6	-9.9	40.0	198.4	-5.8	
P/1999 R1 (SOHO)	0.977	0.057	13.7	43.7	4.9									
	0.958	0.107	16.9	34.3	14.7	-4.1	0.073	14.7	347.5	1.0	38.7	334.2	5.8	
	0.930	0.176	13.5	135.7	271.3	-19.7	0.274	91.3	295.1	-27.9	35.9	200.9	-6.4	
C/2008 F1 (SOHO)	1	0.032	66.7	46.1	94.6									
	1	0.153	67.7	45.7	95.7	-1.5	0.123	95.7	58.4	39.2	47.3	328.9	18.5	
C/2007 X13 (SOHO)	1	0.008	138.3	27.7	306.0									
	1	0.055	137.7	27.3	305.5	0.7	0.048	305.5	262.7	-16.3	56.1	317.5	6.9	
SNM2008-1453	0.984	0.064	135.5	27.9	306.2		0.044	306.2	261.1	-15.1	54.3	315.1	8.0	
C/2007 M6 (SOHO)	1	0.006	124.5	115.2	42.4									
	1	0.255	121.4	119.0	49.5	6.7	0.262	229.5	97.9	4.7	57.8	228.8	-18.5	
LE-658	0.93	0.26	142.7	122.4	61.2		0.411	241.2	115.9	8.5	59.7	235.1	-12.6	
T1-143S	0.946	0.301	147.0	116.2	50.3		0.453	230.3	106.4	10.6	60.5	236.2	-11.9	(S)CMi-Aurds
NMS-61								235	109	5		235	-17	α -Canis Minorids

MSS資料集ホームページ ～2014年度更新～

重野好彦

MSS資料集を2014年度版に更新しましたのでお知らせします。

 <http://msswg.net/> (ドメイン名を変更しました)



「第137回流星物理セミナー」のお知らせ

発表するのも話を聞くのも予約不要です。どうぞお気軽に。

日時 2014年7月6日(日) 13時～17時
場所 渋谷区 神宮前 区民会館 会議室1
内容 内容 太陽をかすめる彗星と流星(小関正広)
ペルセウス座流星群の眼視観測報告(東大附属中学校)
MSS資料集最新版公開(重野好彦)
募集中!
費用 300円
幹事 重野好彦(奇数回) / 寺田充(偶数回)

【渋谷区 神宮前 区民会館 案内図】

至新宿 	1) JR原宿駅南口から5分 2) 地下鉄明治神宮前駅4番出口1分	明
JR		治 【和民(2次会)】
原宿		通
駅	Laforet	リ 東急プラザ

表参道通り

		地下鉄	ロッテリア
至渋谷	北	4番出口	-----
	西+東		-----
	南		【区民】
			【会館】

2. 資料集

本資料集は2014年7月版です。

[2014年度資料.pdf](#)

[2013年度資料.pdf](#)

- [MSS00-1-はじめに.txt](#)
- [MSS00-2-ごあいさつ.txt](#)
- [MSS00-3-インデックス.txt](#)
- [MSS00-3-インデックス.xls](#)
- [MSS00-A-50回記念誌上.pdf](#)
- [MSS00-B-50回記念誌下.pdf](#)
- [MSS01-隕石.pdf](#)
- [MSS02-隕石落下シミュレーション.pdf](#)
- [MSS03-遠征観測報告.pdf](#)
- [MSS04-音.pdf](#)
- [MSS05-解析法.pdf](#)
- [MSS06-観測機器.pdf](#)
- [MSS07-観測結果.pdf](#)
- [MSS08-観測理論.pdf](#)
- [MSS09-軌道計算研究発表.pdf](#)
- [MSS10-軌道計算精度.pdf](#)
- [MSS11-軌道計算論文.pdf](#)
- [MSS12-軌道シミュレーション.pdf](#)

- [MSS13-1-議事録.pdf](#)
- [MSS13-2-議事録.txt](#)
- [MSS14-空間密度.pdf](#)
- [MSS15-構造.pdf](#)
- [MSS16-痕.pdf](#)
- [MSS17-シューメーカーレビー9.pdf](#)
- [MSS18-出現予報.pdf](#)
- [MSS19-スペクトル.pdf](#)
- [MSS20-測光.pdf](#)
- [MSS21-その他.pdf](#)
- [MSS22-電波.pdf](#)
- [MSS23-同時観測.pdf](#)
- [MSS24-同時観測MSS-WG.pdf](#)
- [MSS25-同時観測理論.pdf](#)
- [MSS26-発光.pdf](#)
- [MSS27-輻射点.pdf](#)
- [MSS28-豆まき現象.pdf](#)

3. 流星動画像

[6等より明るい流星動画像をDVDで配付します](#)

4. 流星物理セミナー・ワーキンググループ(MSS-WG)の紹介

[観測報告と流星用プログラム](#)

ユニークアクセス数

2013.06.30~2014.04.27 176PC

2014.04.27~2014.07.05 086PC (ドメイン変更)

ファイル名	Page	MB	回	年.月.日	発表	参加	70	04.10	-	25
MSS00-1-はじめに.txt	6	0	1	1978.10.08	5	16	71	06.26	-	42
MSS00-2-ごあいさつ.txt	4	0	2	1979.02.12	6	40	72	10.16	-	18
MSS00-3-インデックス.txt	-	-	3	04.15	4	20	73	1995.01.08	-	23
MSS00-3-インデックス.xls	-	-	4	06.24	4	33	74	04.23	-	15
MSS00-A-50回記念誌上.pdf	174	33	5	09.09	3	34	75	07.16	-	16
MSS00-B-50回記念誌下.pdf	187	34	6	11.11	6	35	76	10.15	-	12
MSS01-隕石.pdf	55	12	7	1980.01.20	6	18	77	1996.01.07	-	27
MSS02-隕石落下シミュレーション.pdf	78	19	8	03.16	8	37	78	04.07	-	17
MSS03-遠征観測報告.pdf	225	58	9	05.18	7	30	79	07.07	-	19
MSS04-音.pdf	19	6	10	07.13	7	35	80	10.13	-	7
MSS05-解析法.pdf	128	30	11	09.28	7	50	81	1997.01.26	-	14
MSS06-観測機器.pdf	179	53	12	11.16	7	35	82	04.12	-	12
MSS07-観測結果.pdf	289	64	13	1981.01.18	3	?	83	07.13	-	31
MSS08-観測理論.pdf	65	13	14	03.29	6	40	84	10.05	-	27
MSS09-軌道計算研究発表.pdf	187	41	15	05.17	8	63	85	1998.01.11	5	29
MSS10-軌道計算精度.pdf	91	19	16	07.19	7	20	86	04.19	3	25
MSS11-軌道計算論文.pdf	120	35	17	09.06	8	32	87	07.12	7	31
MSS12-軌道シミュレーション.pdf	133	26	18	11.01	7	36	88	10.18	5	25
MSS13-1-議事録.pdf	53	9	19	1982.01.15	6	37	89	1999.01.10	8	34
MSS13-2-議事録.txt	-	0	20	03.21	4	26	90	04.18	3	18
MSS14-空間密度.pdf	116	36	21	05.16	4	45	91	07.11	5	21
MSS15-構造.pdf	5	1	22	07.11	4	47	92	10.17	7	25
MSS16-痕.pdf	268	69	23	10.03	7	41	93	2000.01.30	8	40
MSS17-シューメーカーレビー9.pdf	35	8	24	1983.01.07	8	50	94	07.09	5	21
MSS18-出現予報.pdf	66	21	25	03.08	6	36	95	10.15	8	21
MSS19-スペクトル.pdf	91	18	26	05.08	4	44	96	2001.02.12	10	41
MSS20-測光.pdf	19	7	27	07.03	6	45	97	04.15	12	30
MSS21-その他.pdf	270	67	28	10.02	2	41	98	07.08	5	23
MSS22-電波.pdf	210	37	29	12.18	7	45	99	10.14	9	27
MSS23-同時観測.pdf	129	32	30	1984.03.11	2	32	100	2002.02.17	16	46
MSS24-同時観測MSS-WG.pdf	165	44	31	05.13	1	30	101	07.07	8	24
MSS25-同時観測理論.pdf	46	14	32	07.22	4	30	102	10.20	6	20
MSS26-発光.pdf	11	2	33	09.30	2	33	103	2003.01.19	10	18
MSS27-輻射点.pdf	171	31	34	12.09	5	31	104	07.06	4	20
MSS28-豆まき現象.pdf	24	5	35	1985.03.17	2	20	105	10.19	4	11
MSS30-2009~2014.pdf	-	75	36	06.02	4	40	106	2004.02.29	8	29
合計	3,619	912MB	37	09.01	2	28	107	07.04	6	28
[MSS-001回から136回までを集計]			38	12.22	5	30	108	10.24	6	13
			39	1986.04.20	3	32	109	2005.02.20	4	11
			40	07.06	4	?	110	07.03	4	11
			41	10.05	4	29	111	10.16	9	22
			42	1987.01.11	6	24	112	2006.02.05	10	22
			43	04.19	3	20	113	07.09	6	9
			44	07.05	6	31	114	10.15	10	12
			45	10.04	5	18	115	2007.02.04	8	15
			46	1988.01.10	1	17	116	07.01	8	30
			47	04.17	7	21	117	10.21	4	12
			48	07.03	4	38	118	2008.02.17	8	14
			49	10.16	7	25	119	07.06	7	18
			50	1989.04.23	6	32	120	10.05	9	14
			51	07.16	-	51	121	2009.02.08	6	23
			52	10.29	-	?	122	07.05	6	17
			53	1990.01.14	-	?	123	10.04	9	23
			54	04.15	-	?	124	2010.02.07	11	20
			55	07.15	-	?	125	07.11	6	25
			56	10.07	-	?	126	10.10	8	27
			57	1991.01.15	-	?	127	2011.02.06	6	21
			58	04.14	-	38	128	07.03	3	15
			59	07.07	-	34	129	10.02	4	20
			60	10.06	-	36	130	2012.02.05	5	17
			61	1992.01.15	-	40	131	07.01	4	18
			62	04.12	-	41	132	10.07	6	25
			63	07.05	-	26	133	2013.02.03	3	12
			64	10.04	-	31	134	07.07	5	17
			65	1993.01.17	-	37	135	10.06	8	20
			66	04.11	-	48	136	2014.02.02	8	25
			67	07.04	-	26				
			68	10.17	-	22				
			69	1994.01.16	-	30				

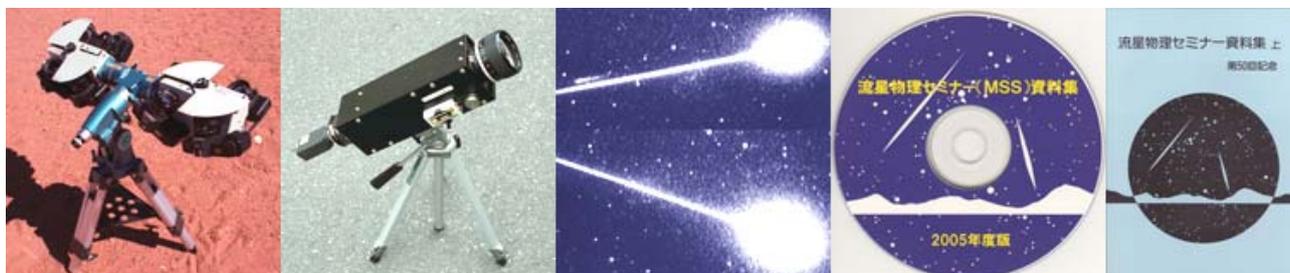
MSS資料集ホームページ ～ドメイン変更後～

重野好彦

MSS資料集ホームページは、2014.04.27にドメイン変更を行った <http://msswg.net>。また次回流星物理セミナーのお知らせコーナーを作った。2014.07.05～2015.01.31のユニークアクセス数は559PCだった。

新  <http://msswg.net/>

旧  <http://meten.net/mss>



「第139回流星物理セミナー」のお知らせ

発表するのも話を聞くのも予約不要です。どうぞお気軽にご参加下さい。

日時 2015年2月1日(日) 13時～17時 (確定しました)

場所 渋谷区 神宮前 区民会館

内容 流星はどこから来るのか(小関正広)

ほうおう群遠征報告(戸田雅之)

地球の衝突断面積と隕石落下速度(海老塚昇)

募集中!

費用 300円

流星物理セミナー(MSS)資料集

本資料集は2014年7月版です。

[2014年度資料.pdf](#)

[2012年度資料.pdf](#)

[2010年度資料.pdf](#)

[要約集.txt](#)

⋮
⋮

[2013年度資料.pdf](#)

[2011年度資料.pdf](#)

[2009年度資料.pdf](#)

3. 流星動画像

[6等より明るい流星動画像をDVDで配付します](#)

4. 流星物理セミナー・ワーキンググループ(MSS-WG)の紹介

[観測報告と流星用プログラム](#)

ユニークアクセス数

2012.06.28～2013.03.27 174PC

2013.06.30～2014.04.27 176PC

2014.07.05～2015.01.31 559PC

2014.04.27 (ドメイン変更)

IIビデオ同時観測により検出された流星群輻射点カタログ
 (IAUに登録された輻射点番号432番~443番を表記した)
 (MSS138用に一部のみ紹介)

重野好彦

要旨

1992年12月から2009年10月までにImage Intensifier (II) 付きビデオで2点観測し軌道の求まった3,770例の同時流星に関して、D判定及びD'判定を利用して、IAU流星群リストと照合を行った。その結果22既知群と12未知群を検出した。IAUリストには295群(2009年6月現在)が登録されているが、毎年定常的に出現している群は少ないことが分かった。またIIは8等までの暗い流星を対象としているため、得られた未知群の多くが地球向点付近の高速で暗い流星群であった。IAUリストは流星群数が多いため全体のイメージがつかみ難い。そこで本報告では星図上にプロットすることで読者に理解しやすくした。

観測機材

観測に用いた機材の外観とブロック図を図1に示す。IIは浜松ホトニクス製V3287P、またはデルフトハイテック製XX1470を使用した。これらは第2世代IIと言われ、増幅率は約5万倍である。1992年当時の可能な限りの観測方式として、画像は41万画素CCDで撮影し、Hi8ビデオテープに録画した。2005年以降はDVフォーマットでPCに録画している。

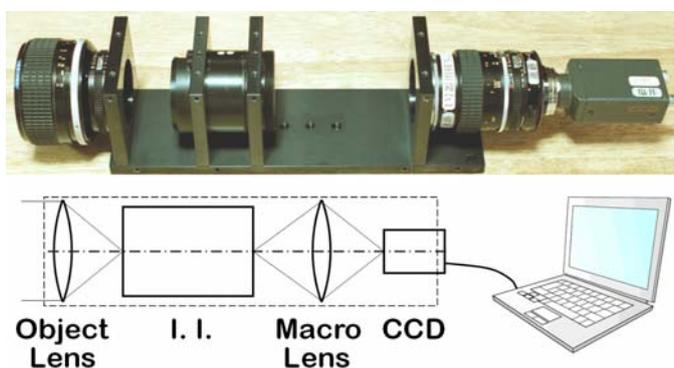


図1. IIを使用したビデオ機材とブロック図

対物レンズは交換式で、主に使用したレン

ズは Canon製 85mm F1.2、視野は12度×9度、最微恒星等級は約9.5等、最微流星等級は約8等である。位置の平均測定誤差は約70秒角(標準偏差)、三角測量による輻射点算出の平均誤差は約0.6度(標準偏差)である。この観測機材は約50台製造され、日本の観測者に配付されている。

著者のグループの主な観測地は群馬県赤城山(E:139° 11' 33" N:36° 28' 42")と埼玉県秩父郡(E:139° 06' 10" N:36° 05' 56") (世界測地系)で、ほぼ南北に並んでおり、基線は42.9 kmである。視野が狭いのでファインディング星図を作成し、最大の同時率が得られるように約0.5度の精度で視野設定を行った。

図2. II同時観測により得られた3,770例の輻射点分布

月ごとに星図を分けて理解しやすくした。

- 1) 左図は我々の観測した輻射点、M&Pデータの輻射点、IAUリストの輻射点を表す。
- 2) 右図は今回検出された輻射点を表す。これには既知群、未知群が含まれる。

- ×印 : 我々の観測した輻射点
- +印 : M&Pデータの輻射点
- ◎印 : 地球向点(各月15日の位置)

実線の楕円(半径6度) : IAUリストの輻射点295群(2009年6月現在)
 established meteor showers 65群は太線で表した

点線の楕円(半径7度) : 今回検出した未知群の輻射点

432番~443番はIAUに登録された輻射点番号

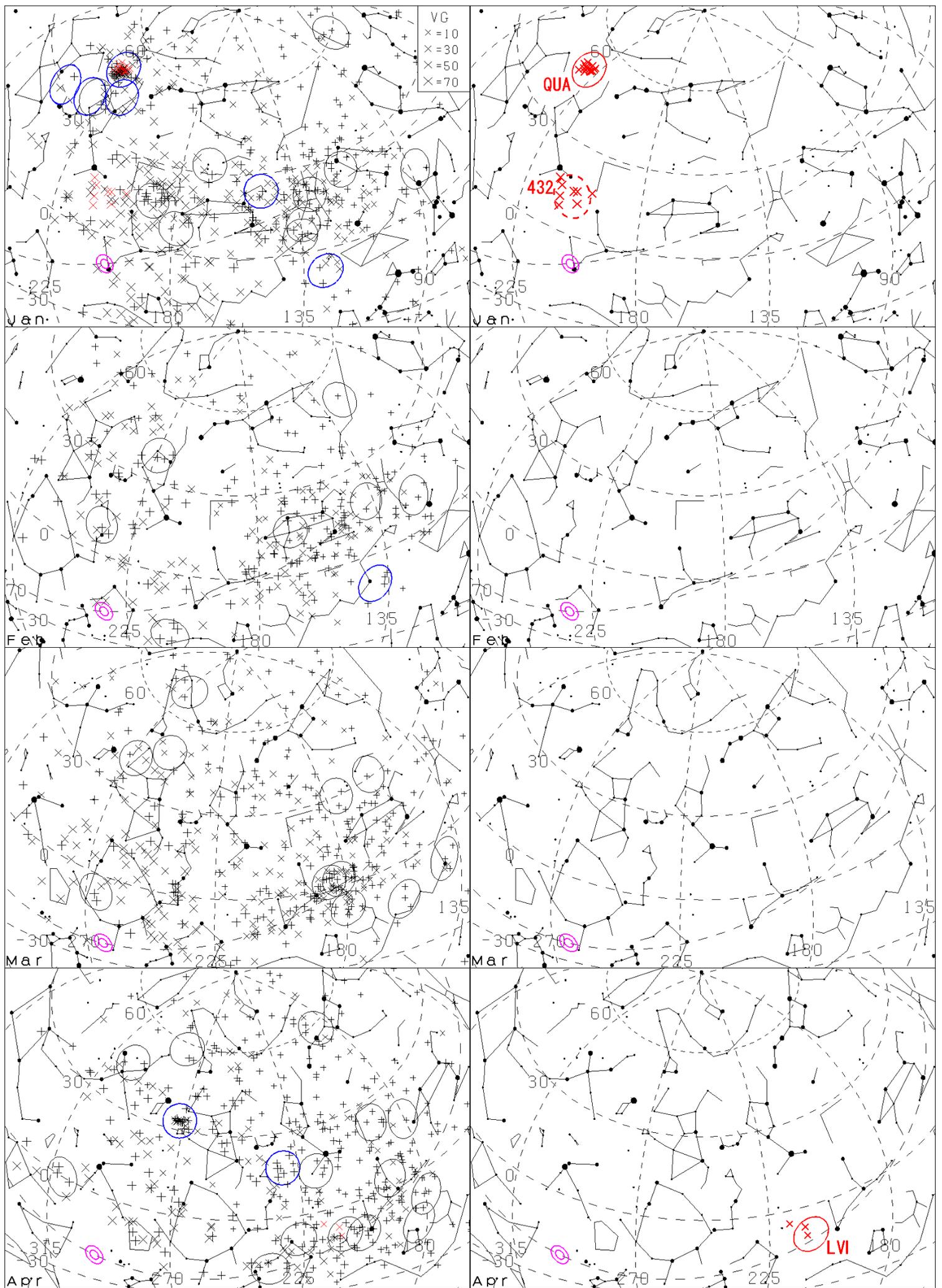


图2-1 (1月~4月) 左图: 辐射点分布 右图: 检出された辐射点

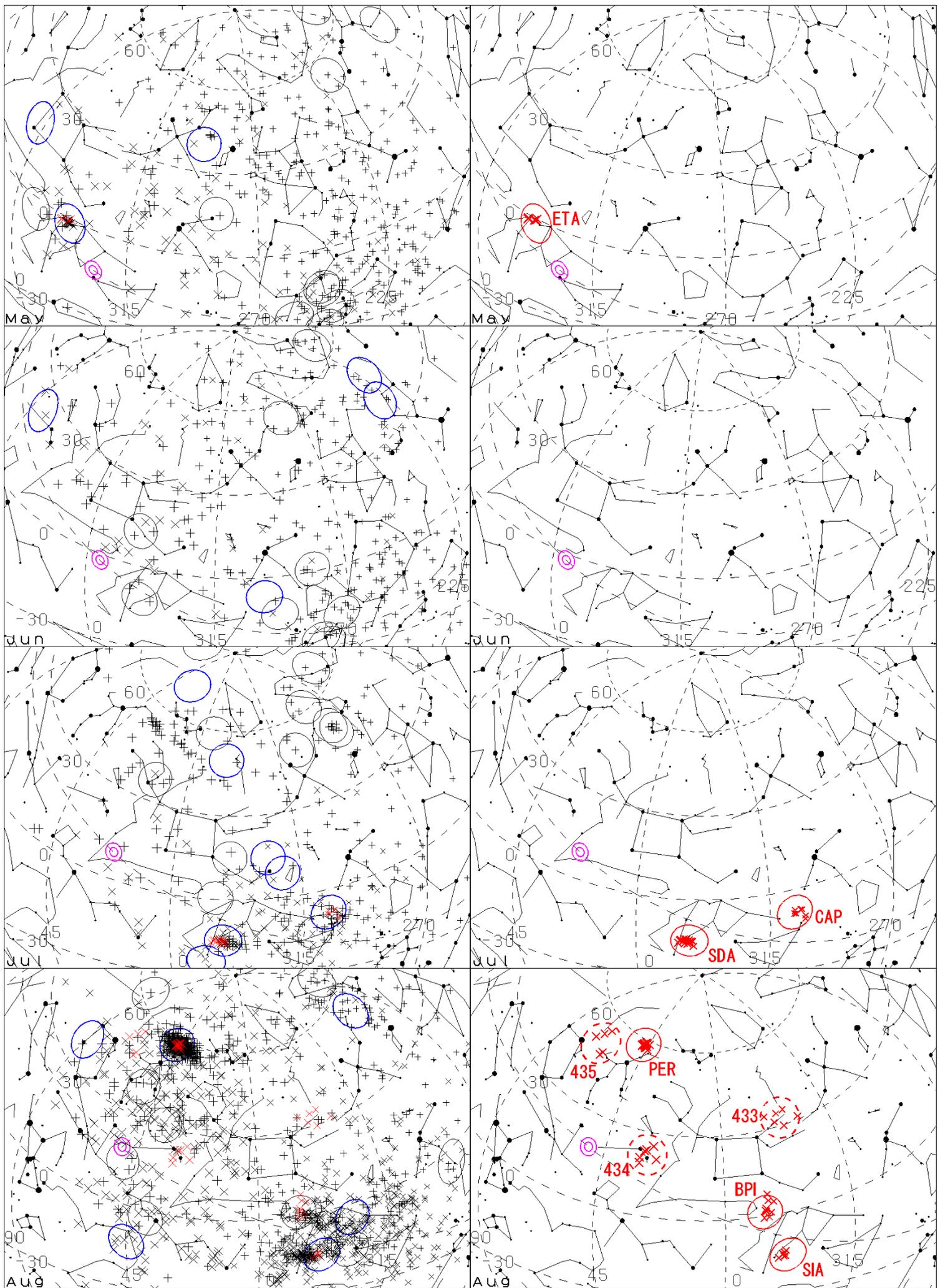


図2-2 (5月~8月) 左図: 輻射点分布 右図: 検出された輻射点

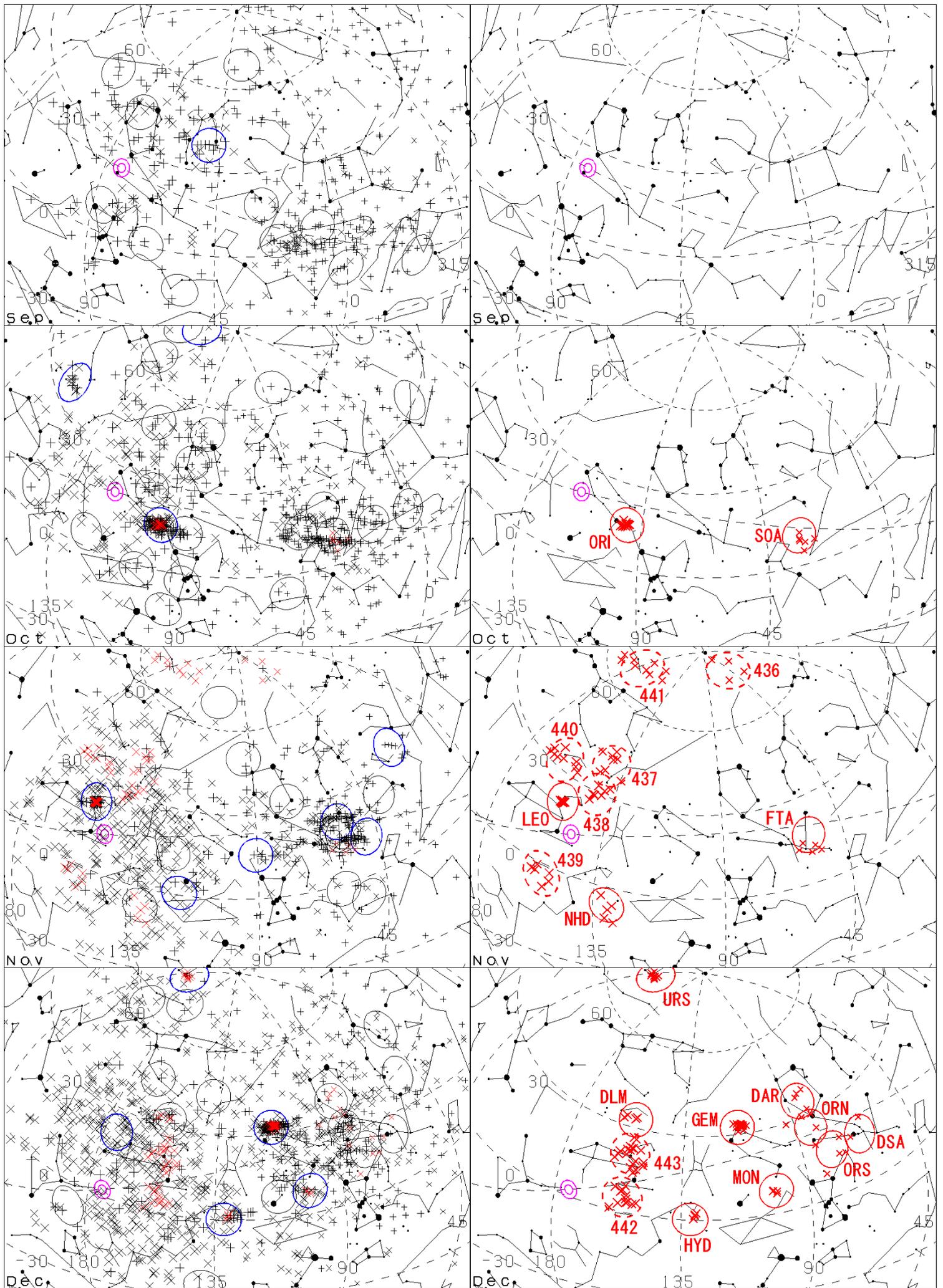
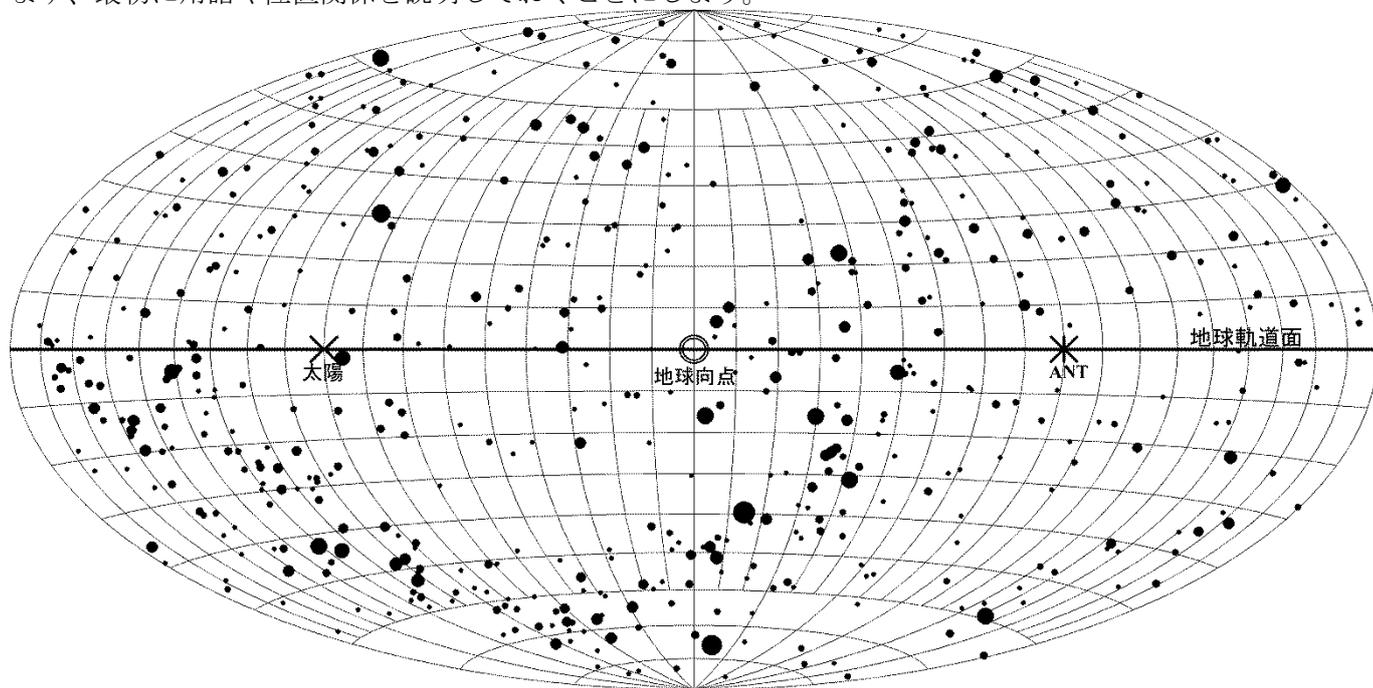


图2-3 (9月~12月) 左图: 輻射点分布 右图: 検出された輻射点

天文回報4月号の観測指針に「輻射点の広がり」という解説を載せたが、スペースの関係で説明しきれなかった部分があるので、この場を借りて補足しておくことにする。

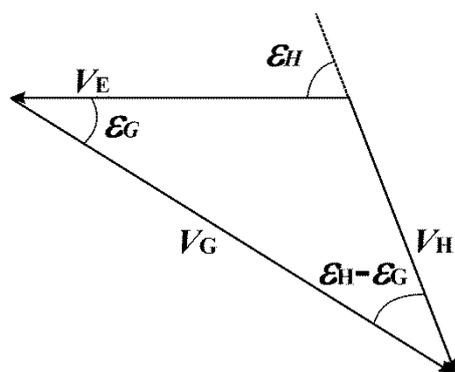
まず、最初に用語や位置関係を説明しておくことにしよう。



第1図：オリオン群の極大期に地球の進行方向を正面に見たときの位置関係

この図は、オリオン群の極大期における地球の進行方向を示すものである。地球進行方向正面を「地球向点」と呼ぶが、星座ではかに座のあたりである。この頃、太陽は地球の進行方向から左手90度の方向、星座ではおとめ座、スピカの方角になる。地球向点から右手90度が太陽の反対方向で「ANT」（アンチヘリオン）と呼ばれる。上図は展開図なので、進行方向の180度反対は図の左右両端になり、「地球背点」と呼ばれる。いて座からやぎ座のあたりになる。地球の軌道面（黄道）は中心を通る水平な線で示される。座標の目盛は黄道座標により、天体の黄経から太陽黄経を引いたものと黄緯、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)$ で表しているのので、地球向点が(270, 0)、太陽は(0, 0)、ANTは(180, 0)である。

太陽系内での流星体と地球の運動方向と地球から観測される流星の運動方向の関係は、地球軌道面の北側から見下ろし、地球の進行方向を左向きで表すと、右図のようになる。ここで、 V_H 、 V_E 、 V_G はそれぞれ流星体と地球の運動速度、地球から見た流星の運動速度を表している。また、 ϵ_H と ϵ_G はそれぞれ地球の運動方向（地球向点）と流星体の運動方向及び地球から見た流星の運動方向のなす角度である。



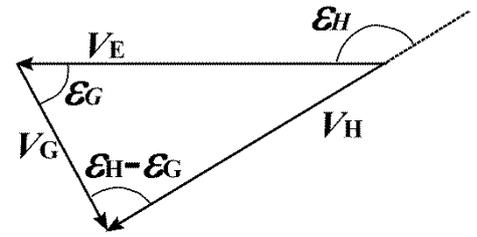
第2図：日心速度と地心速度

今回取り上げるのは、 ϵ_H が変化すると、 ϵ_G はどのように変化するかという問題である。次ページに示した図は、P/Halley から放出された流星体が地球付近を通過するときの速さ 41.6km/s で運動する粒子が地球に様々な角度で突入する様子を示したもので、地球の公転速度を 29.8km/s として流星体の運動が地球から見るとどのようなかを表している。粒子の速さは 41.6km/s で一定として地球向点の方向から15度ずつ地球への突入方向が変化した場合(円周上から中心に向かう 1~13 の矢印)、地球からの見かけの運動方向・速度はそれぞれ中心から外に向かう 1~13 の矢印になる。

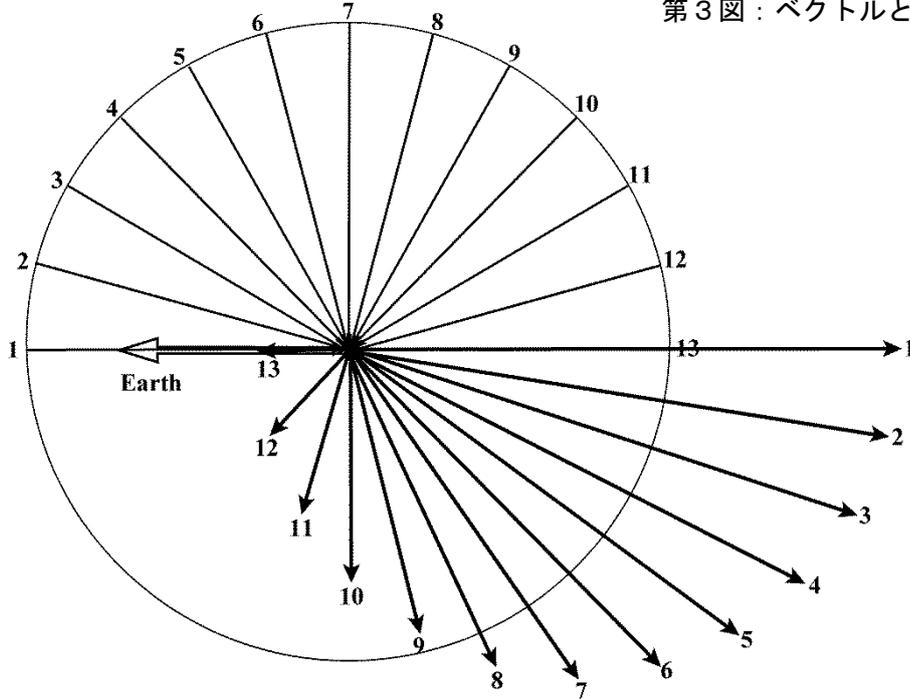
地球と粒子が正面衝突する1の場合は、見かけの速度は両者の和となり、速さは $41.6+29.8=71.4\text{km/s}$ であり、地球から見ると進行方向から突っ込んでくるように見える。先の図では「地球向点」からくる（地球向点が輻射点）流星が見られることになる。一方、13の場合は粒子が地球の背後からの追突型であり、見かけの速度は両者の差となり、速さは $41.6-29.8=11.8\text{km/s}$ で、地球から見ると背面からやってくる流星になる。地球背点に輻射点がある流星になる。

このように書くと、 $\vec{V}_G = \vec{V}_H + \vec{V}_E$ のように思われがちであるが、 V_H 、 V_E が太陽を基準とした（宇宙から見

た)ものであるのに対して、 V_G は地球から見たものなので単純に和として表すことはできない。高校で物理を選択すれば相対速度として、地球から見た場合には地球の運動ベクトルの先から流星体の運動ベクトルの先を見る、つまり、 $\vec{V}_G = \vec{V}_H - \vec{V}_E$ としなければならない。もちろん、これはベクトルでの話であり、スカラー(数値)として $V_G = V_H - V_E$ ではない。この例では、流星体が地球の運動方向側から突入してくるので、 V_G は V_H よりも大きくなる。逆に流星体が地球の運動方



第3図：ベクトルとしての関係



第4図：粒子が地球に向かってくる方向が変化した場合の地球からの見え方

向の後ろ側(背点)から突入してくる場合も図で示す。この場合には、 V_G は V_H よりも小さくなる。先ほど触れた下図は、この関係を連続的に示したものである。1と13だけでなく、途中の変化を見ることによって、ベクトルとして扱った場合の V_H 、 V_E 、 V_G 、 ϵ_H 、 ϵ_G の関係が理解されるであろう。注目すべきは、矢印10(地球向点からの角度が135度)になって、地球から見える流星の突入方向が地球向点から90度、つまり、ANTの方角になることである。

観測指針には木星族の彗星を起源とする流星を想定して、次の表を示した。 V_G 、 V_H 、 V_E 、 ϵ_H 、 ϵ_G の関係式は付録として詳しく示したので参照されたい。

第1表：木星族の彗星を起源とする粒子が、地球進行方向に対し様々な角度で突入する場合

ϵ_H	0	30	60	90	120	130	140	150	160	170	180
ϵ_G	0.0	16.8	33.9	51.7	71.5	79.2	87.9	98.7	113.7	138.4	180.0
V_G	68.0	63.0	56.7	46.7	33.9	29.2	24.5	19.9	15.6	12.2	8.0
$d\epsilon_G/d\epsilon_H$	0.56	0.56	0.58	0.62	0.73	0.81	0.96	1.24	1.85	3.26	4.75

ϵ_H が130~150度のときに ϵ_G は80~100度、つまり $(\lambda - \lambda_s, \beta) = (270, 0)$ から80~100度離れたところ $(\lambda - \lambda_s, \beta) = (170 \sim 190, 0)$ になる。これがANTに相当するので、逆に言えば、ANTは ϵ_H が130~150度で地球に向かってくる粒子の群れだということになる。上図は粒子が地球軌道の外側からやってくる、太陽に接近する際の状況を示したものであるが、流星が太陽から遠ざかる場合には、上図を中心の水平な線を対称軸として上下を入れ替えた形になる。ANTに相当する粒子の群れが太陽を回ってくる時には、同様に ϵ_H が130~150度で ϵ_G は80~100度、 $(\lambda - \lambda_s, \beta) = (270, 0)$ から80~100度離れたところ $(\lambda - \lambda_s, \beta) = (340 \sim 10, 0)$ のところに輻射点が集中して、Helion sourceと呼ばれる昼間群となっているのである。

話を元に戻そう。このように、注意が必要なのは ϵ_G が ϵ_H に比例するわけではないことである。重要な点は、 ϵ_H が小さいときには、 ϵ_H が変化しても ϵ_G はあまり変化しない。つまり、流星群内で粒子の運動方向に多少のばらつきがあったとしても、地球から観測される流星の突入方向(輻射点)に大きな違いは現れない。逆に ϵ_H が大きいときには、 ϵ_H が少し変化しても、 ϵ_G が大きく変化し、輻射点が広がることになる。

L.Kresak(“Structure and Evolution of Meteor Streams”, <Physics and Dynamics of Meteors>, 1968)が(地心)輻射

点が地球軌道と流星軌道との位置関係によってどのように変化するかを示しているので引用する。真ん中の列が地球の位置における流星群の広がり（太陽を基準にした宇宙空間が視点であることに注意）、上下の円・楕円が地球から見た流星群（輻射点）の広がりである。左側は流星体が地球向点から突入する場合であり、右側は地球背点からの場合である。 ϵ_G が ϵ_H に比例しないで、 ϵ_H が小さいときには ϵ_G の変化の割合は小さいが、 ϵ_H が大きくなると ϵ_G の変化は急激に大きくなる。なお、Kresak の図で上段は軌道半長径 a が無限大（ペルセウス群やオリオン群のような場合）、下段は $a=2$ で母天体が木星族（おうし群やジャコビニ群）の場合と考えてよい。

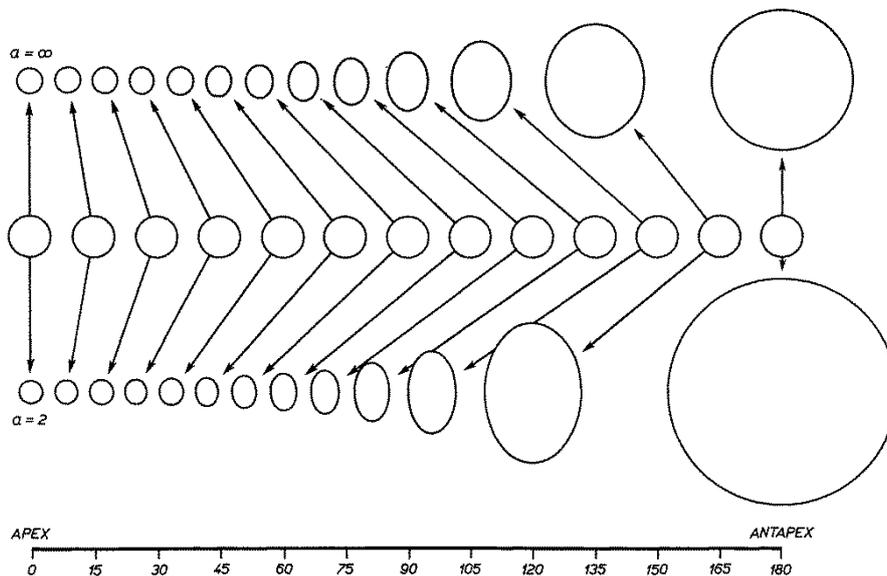


FIG. 2. Transformation of the true radiant area (middle row) into the apparent radiant area (above for $a = \infty$, below for $a = 2$) at different elongations from the apex.

第5図：Kresakによる地球向点からの離角と輻射点の広がりとの関係

一般に軌道半長径が大きい流星群は逆行型で地球向点から、また、木星族の場合には順行型で地球背点から突入することが多い。従って、ペルセウス群やオリオン群はおうし群やジャコビニ群よりも見かけ上、輻射点の広がりはいさくなる。

L.Kresak(“The Dispersion of Meteoroids in Meteor Streams. I. The Size of the Radiant Areas”, BAC, 21(1970), 153-170.)は、さらに地球から見た輻射点の広がりとは流星群の太陽を基準とした宇宙空間（地球軌道の位置）での広がりについて詳しく説明している。先ほどの模式図を数値で示したものが次の表である。 $W=1\text{km/s}$ というのは、流星群内での流星体の運動方向・速度の違いを 1km/s と仮定して求めた数値であることを意味する。この数値は写真観測の結果と比較して妥当なものであることが示されている。2行目の a は先ほどと同じ軌道半長径で、この場合には5通り示されている。次の Q_H は $W=1\text{km/s}$ の仮定をベクトルの的に考えて、流星体が流星群の中心線となす角（宇宙空間における輻射点の広がりと考えられる）を求めたものである。 ϵ_H の欄は ϵ_H が $0\sim 180$ 度まで変化したとき、 ϵ_G の欄は ϵ_G が $0\sim 180$ 度まで変化したとき、それぞれ地球から見た流星輻射点の分布が中心から何度広がるのかを示している。

Kresak はこの論文で、主要流星群の輻射点の広がりを写真観測のデータから図示している。 $W=1\text{km/s}$ とした場合に計算される輻射点の広がりが図中に円で示されている。この当時に得られていた写真流星のデータは多くないが、おおむね、 $W=1\text{km/s}$ という仮定が妥当であり、粒子の地球に対する突入角により、流星群の輻射点の見かけの広がりが大きく変わることが明瞭に示されている。

Table VIII
 $Q_G (W = 1 \text{ km/s})$

a	1	2	5	10	∞
Q_H	1.924	1.571	1.434	1.396	1.360
ϵ_H					
0	0.962	0.865	0.821	0.809	0.797
30	0.996	0.895	0.850	0.837	0.824
60	1.111	0.997	0.945	0.930	0.916
90	1.360	1.217	1.150	1.130	1.111
120	1.924	1.703	1.593	1.559	1.528
150	3.716	3.126	2.788	2.687	2.593
180	(∞)	8.559	5.631	5.084	4.644
ϵ_G					
0	0.962	0.865	0.821	0.809	0.797
30	1.111	0.970	0.911	0.894	0.879
60	1.924	1.408	1.262	1.223	1.189
90	(∞)	2.720	2.151	2.028	1.924
120	(∞)	5.255	3.666	3.361	3.113
150	(∞)	7.633	5.076	4.597	4.211
180	(∞)	8.559	5.631	5.084	4.644

第2表：Kresakによる輻射点の広がりとの推算値

この表は、流星群の輻射点の見かけの広がりが大きく変わることが明瞭に示されている。

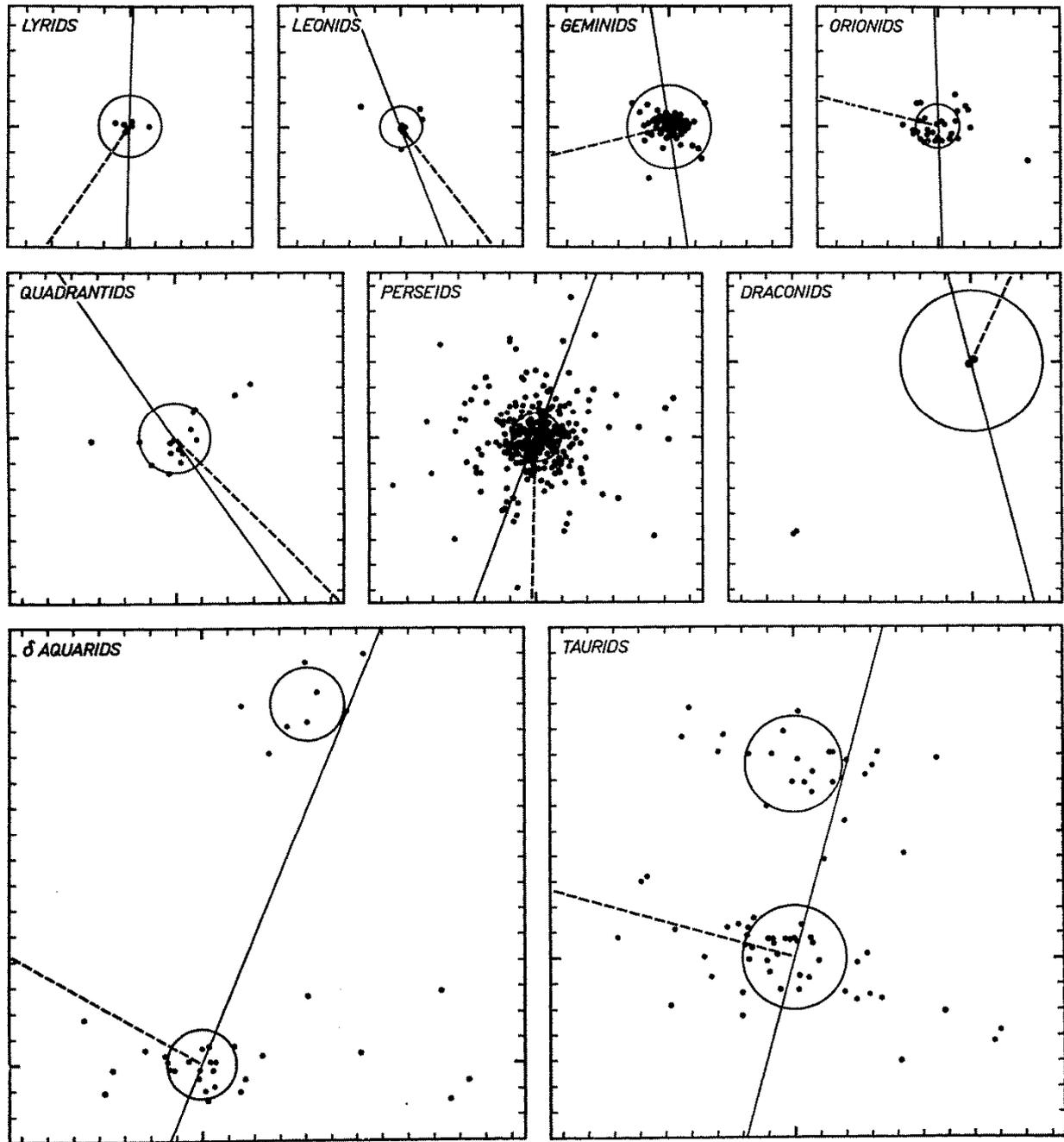


Fig. 1. The observed dispersion of apparent radiants of meteor showers corrected for the diurnal motion. Co-ordinates $\Delta\alpha_G \cos \delta_G$ and $\Delta\delta_G$, markers by 1° . Full lines, direction to the poles of the ecliptic; dashed lines, direction to the Earth's apex; circles, computed maximum deviations ϱ_G for $W = 1 \text{ km/s}$.

第6図：Kresakによる輻射点の広がり の推算値と観測値の比較

[補注1]

V_G 、 ε_G と V_E から ε_H 、 V_H を求めるのが、流星観測により軌道を求めることであり、 V_H 、 ε_H と V_E から ε_G 、 V_G を求めることが彗星（小惑星）軌道からの輻射点予報にあたる。実際には三次元のベクトルを成分に分解して計算するため、三角関数が登場するので難しく見えるが、原理はベクトルの加減であり、中学校の理科で学習する力の作図と同じことである。

[補注2]

ε_H が小さいときには、 ε_H が変化しても ε_G はあまり変化せず、 ε_H が大きときには、 ε_H が少し変化しても、 ε_G が大きく変化するというは、輻射点の広がり の問題だけでなく、流星の出現数と流星群の空間密度の問題にも大きくかかわってくる。もちろん、 ε_H が大きいと地心速度（流星体に対する相対速度）が小さくなることによって、流星群内を単位時間に通過する距離が異なることが一番大きな要因である。雨の中を走行する自動車のフロントには雨粒が多く当たるが、リアウィンドには少ないことと同じである。さらには、地心速度が小さくなると、流星の発光量が減少するので、粒子の空間密度が同じであっても ε_H が大きい流星群の出現数は少なくなる。出現数が少ないことに加えて、輻射点の広がり が大きくなると、通常の眼視観測では「流星群」に属するとか否かの判定が極めて困難になってしまうのである。

[付録] V_G 、 V_H 、 V_E 、 ε_H 、 ε_G の関係式

三角形 ABC について、正弦法則から

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$

$$\sin B = \frac{b}{a} \sin A$$

ここで $A = 180 - (B + C)$ であり、

また、 $\sin(180 - (B + C)) = \sin(B + C)$ なので、

$$\sin B = \frac{b}{a} \sin A = \frac{b}{a} \sin(B + C)$$

加法定理を使って、

$$\sin B = \frac{b}{a} (\sin B \cos C + \cos B \sin C)$$

$\sin B$ を左辺に集めて

$$\left(1 - \frac{b}{a} \cos C\right) \sin B = \frac{b}{a} \cos B \sin C$$

$$\tan B = \frac{\sin B}{\cos B} \text{ なので、}$$

$$\tan B = \frac{b \sin C}{\left(1 - \frac{b}{a} \cos C\right) a} = \frac{b \sin C}{a - b \cos C}$$

これを $\varepsilon_H = 180 - C$ であることに注意して、流星と地球の関係に置き換えると、

$$\tan \varepsilon_G = \frac{V_H \sin \varepsilon_H}{V_E + V_H \cos \varepsilon_H}$$

これを ε_H について微分する。まず、次のように置き換える。

$$t = \frac{V_H \sin \varepsilon_H}{V_E + V_H \cos \varepsilon_H} \quad \varepsilon_G = \tan^{-1} t$$

$$\frac{d\varepsilon_G}{dt} = \frac{1}{1+t^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H \sin \varepsilon_H}{V_E + V_H \cos \varepsilon_H}\right)^2} = \frac{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2}{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2 + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H}$$

$$t = \frac{ax}{cx+d} \text{ を } x \text{ について微分すると } \frac{dt}{dx} = \frac{a}{cx+d} - \frac{ax}{c(cx+d)^2} = \frac{ac(cx+d) - ax}{c(cx+d)^2}$$

また、 $(\sin \theta)' = \cos \theta$ 、 $(\cos \theta)' = -\sin \theta$ に注意して、

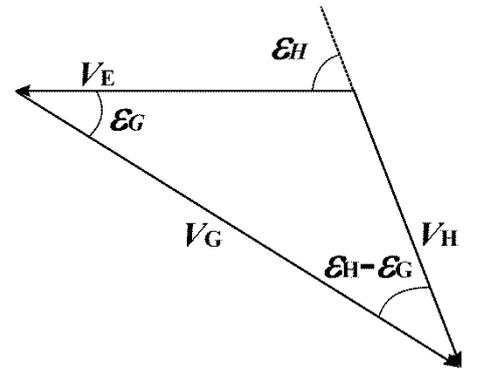
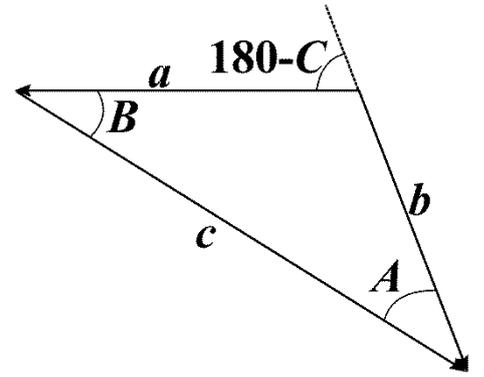
$$\frac{dt}{dV_H} = \frac{V_H \cos \varepsilon_H (V_E + V_H \cos \varepsilon_H) + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H}{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2}$$

従って、

$$\frac{d\varepsilon_G}{dV_H} = \frac{d\varepsilon_G}{dt} \frac{dt}{dV_H} = \frac{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2}{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2 + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H} \cdot \frac{V_H \cos \varepsilon_H (V_E + V_H \cos \varepsilon_H) + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H}{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2}$$

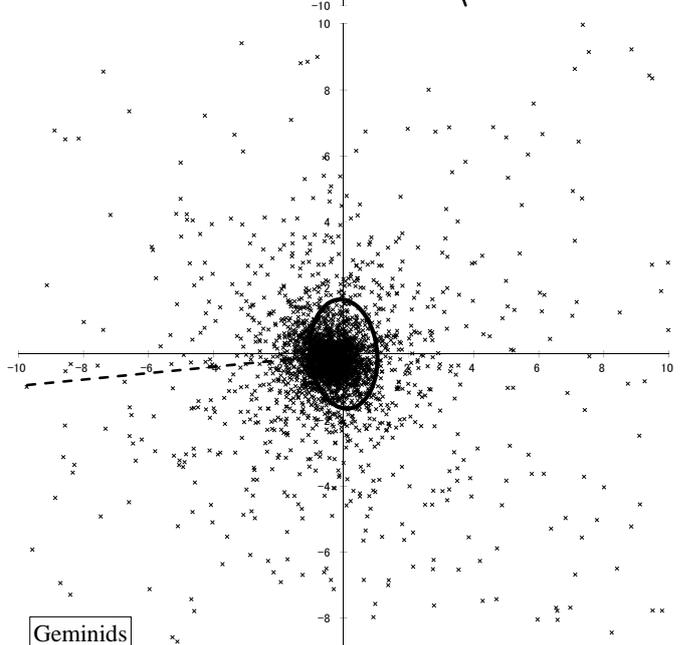
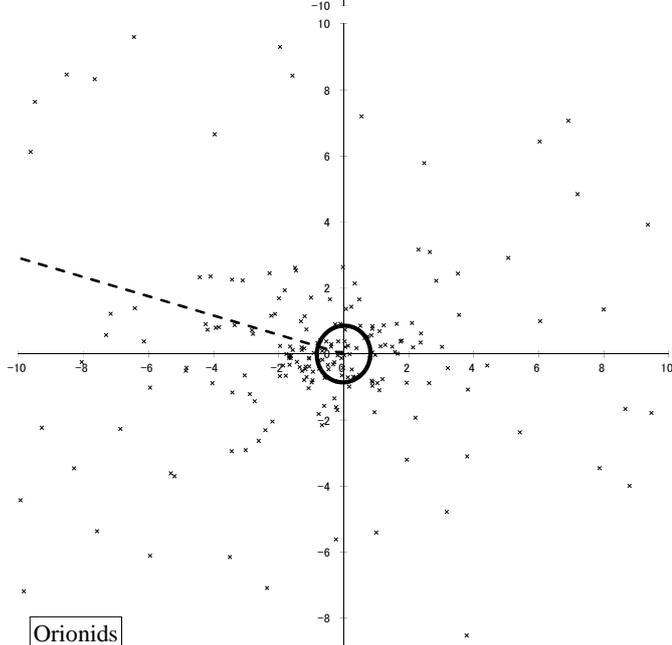
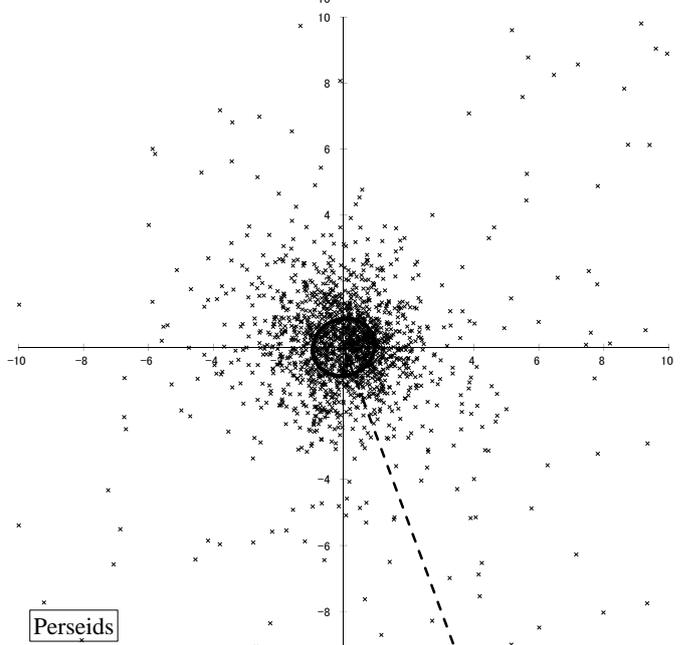
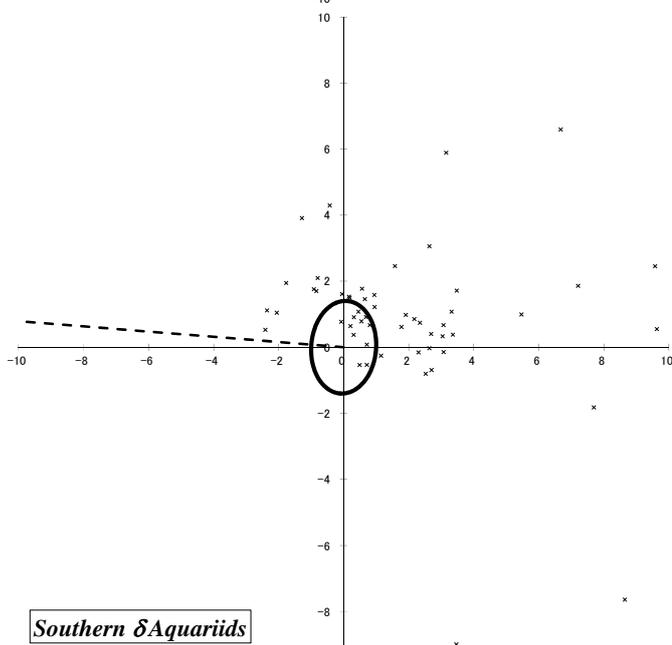
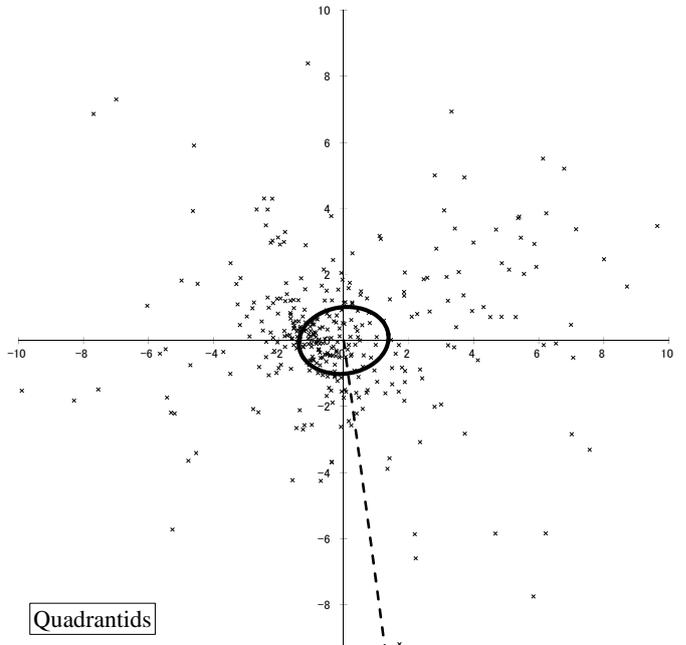
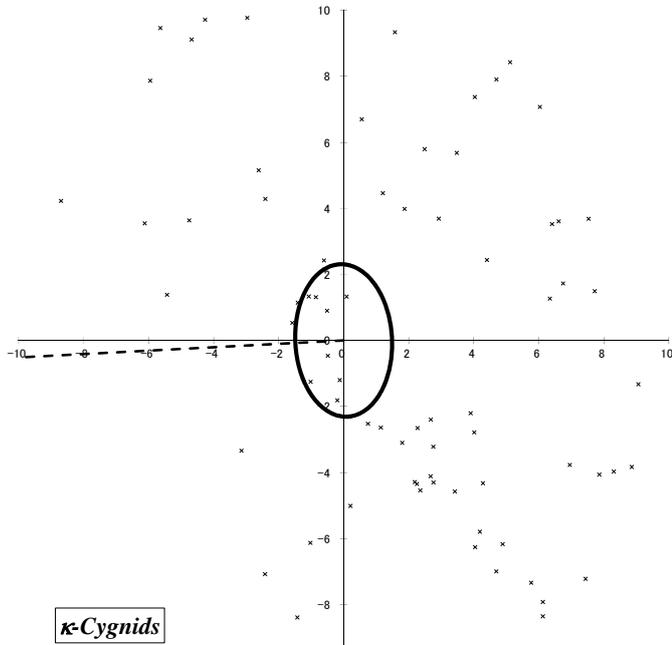
結果として次の式が得られる。

$$\frac{d\varepsilon_G}{dV_H} = \frac{V_H \cos \varepsilon_H (V_E + V_H \cos \varepsilon_H) + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H}{(V_E + V_H \cos \varepsilon_H)^2 + V_H^2 \sin^2 \varepsilon_H}$$



[おまけ]

2013年のビデオ流星に Kresak の輻射点の広がりをあてはめたものを次ページに示す。破線は地球向点の方向。



SonotaCo Network データから見る地球速度による流星群の放射点への影響

土屋 智恵

・研究目的

本研究では、SonotaCo Network に集められたデータにおいて、地球速度を考慮することによりその年に出現が確認されていなかったり、これまでに検出されていない流星群を見つけ出すことを目的とする。新たな流星群候補を見つけ出すことで、流星群の活動や出現状況により、その流星群の母天体である彗星や小惑星の活動について予測できる可能性がある。

・原理

しし群やオリオン群など高速の流星群は放射点が集中しているが、10月りゅう座（ジャコビニ）流星群などの低速群は放射点の広がりが大きく、放射点が離れていても軌道要素は似ている。流星群ごとの速度の違いは、流星物質の突入方向によるものであり、放射点分布の範囲は流星物質の速度に依存することがわかっている。（詳しくは第136回流星物理セミナー 低速流星群の放射点分布に対する修正効果（佐藤幹哉氏）の資料を参照）

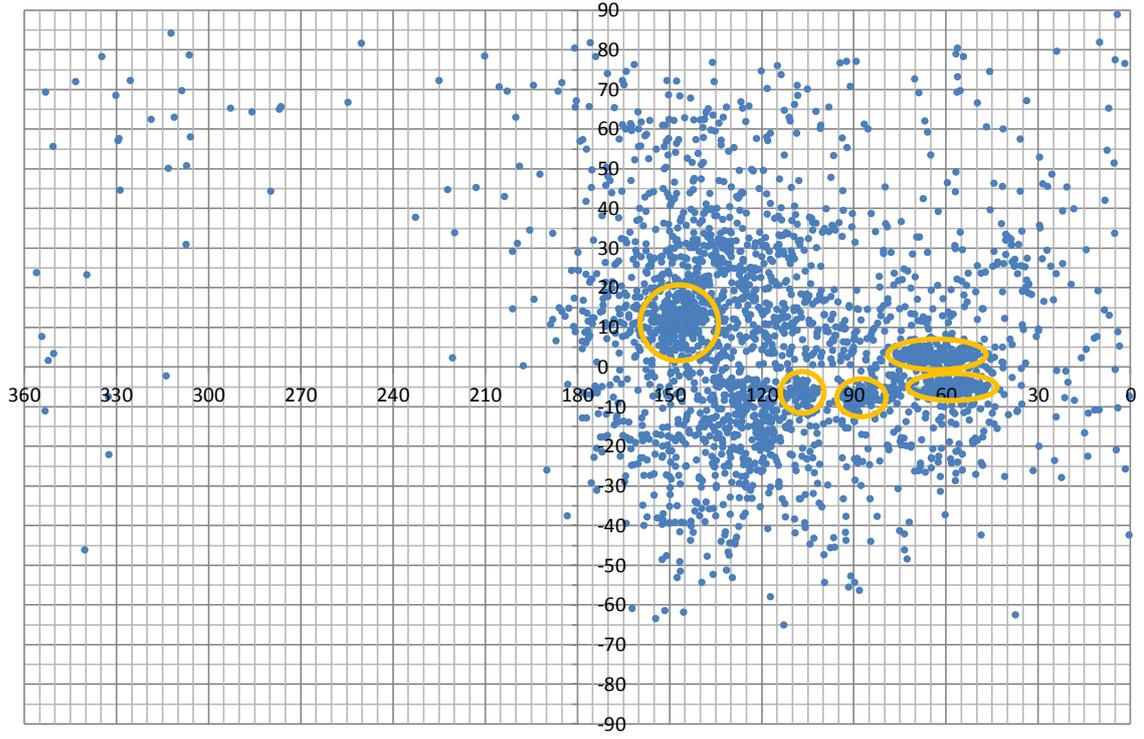
・方法

本研究では SonotaCo Network に集められた 2007 年～2013 年までの流星輻射点のデータセットを使う。今回は予備実験として、2008 年 11 月に出現が予測されており、低速であることでも知られているほうおう座流星群が SonotaCo Network でも捉えられていたのか、地球速度を考慮した計算を行い、放射点の分布から検出できるのか試みる。比較のために 2007 年～2013 年までの 11 月のデータについても同様の計算を行う。地球の速度ベクトルなどのデータは Horizons のデータを用いる。

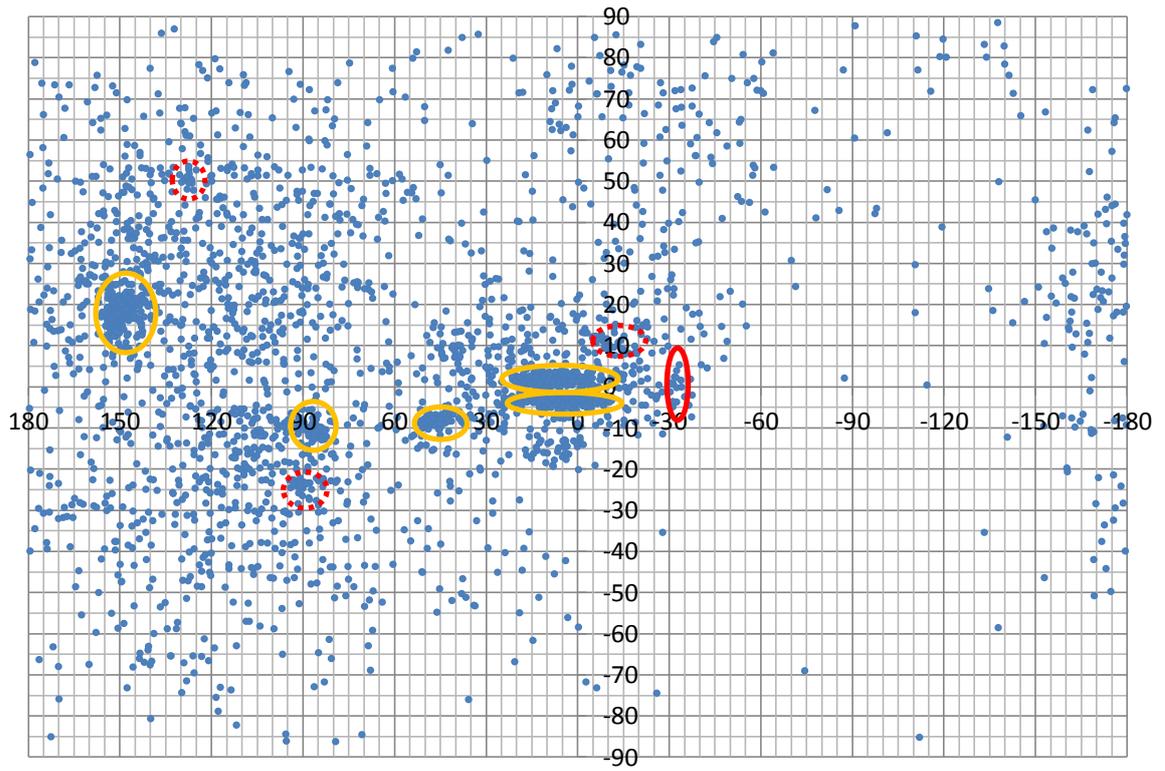
・結果

2008 年 11 月の流星放射点の元のデータを使用し放射点の分布を黄経黄緯で表したものからは、毎年定常的に活発な活動を見せているしし群、おうし南・北群、オリオン群の集まりが見られる。しかし、予測されていたほうおう群の黄経黄緯には流星群と見られる集まりは確認できない。地球速度を考慮し、放射点分布を示すとほうおう群と見られる流星の集まりが確認できた。さらに、修正前には見られなかったいくつかの放射点の集まりがあることがわかった。

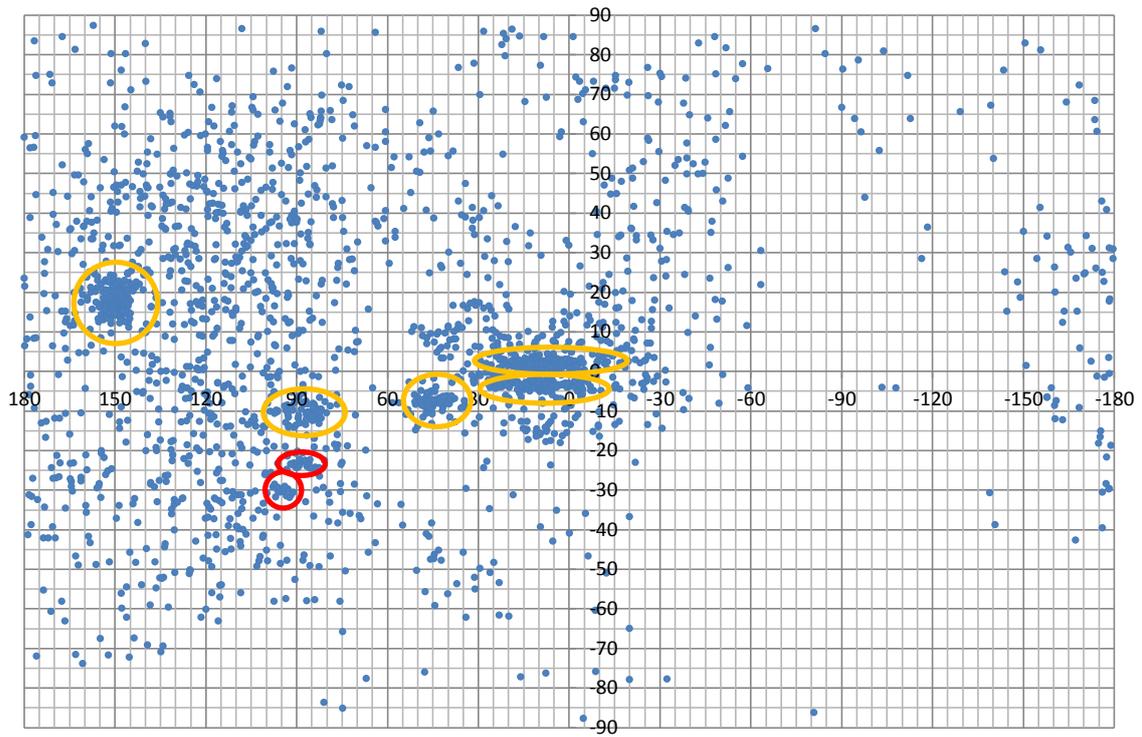
また、2007 年～2013 年の 11 月も同様について調べたところ、ほうおう群と見られる放射点の集まりは見られなかったが、2011 年と 2013 年にうみへび群の集まりが 2 つにわかれていることがわかった。



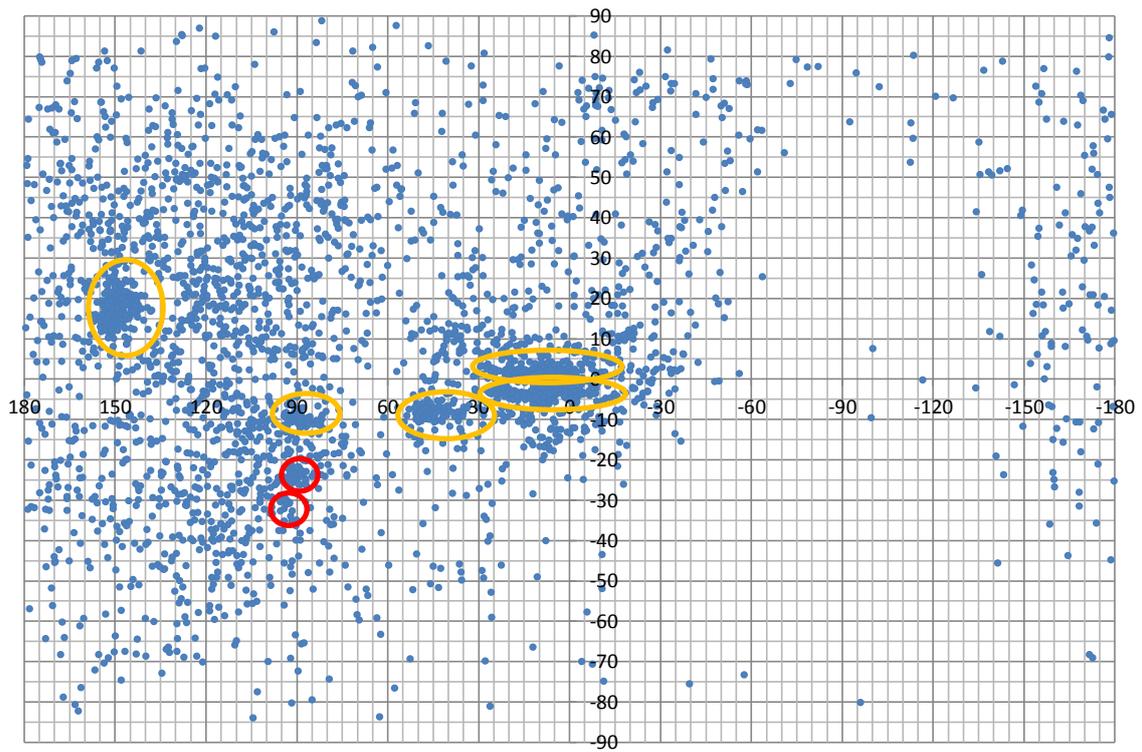
2008年11月 修正前



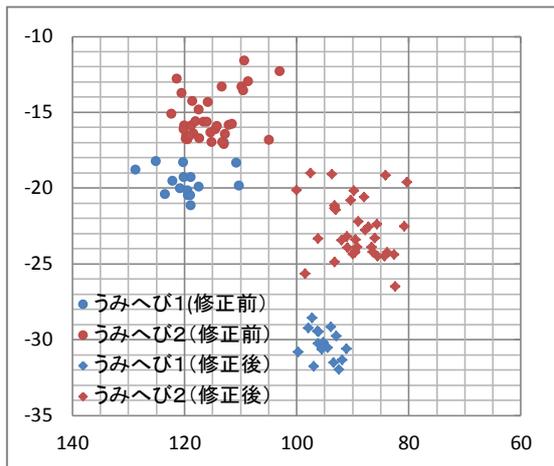
2008年11月 修正後



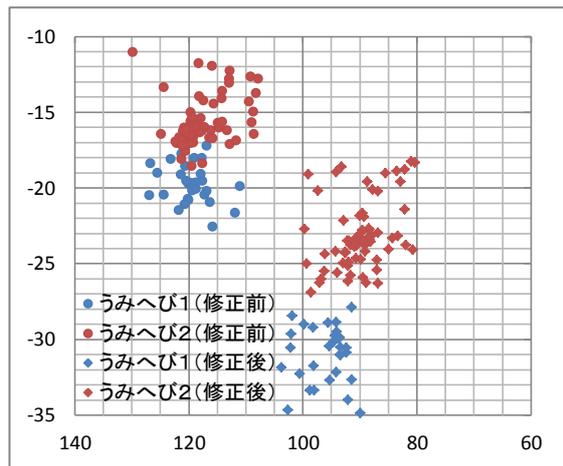
2011年11月修正後



2013年11月 修正後



2011年11月うみへび群



2013年11月うみへび群

・考察

地球速度を考慮して計算した結果、ほうおう群のように低速の流星群には地球速度の影響が大きく、しし群のように高速の流星群では放射点の位置や集まりにさほど変化は見られなかった。この結果からも低速であるほど地球速度が与える影響は大きく、放射点の広がりが大きくなることがわかった。したがって、今までにも低速である流星群の出現が見落とされてきた可能性もあり、流星群とはみなされなかったものもあるのではないかと考えられる。

それに加えて、地球速度を考慮することで元のデータからは見えてこなかった放射点の集まりが見えてきた。うみへび群に関しては速度が低速ではないにも関わらず放射点が集まったのは、周りの散在流星の放射点の位置が変わったことによるものではないかと考えている。以上のことより、これまでの軌道要素からだけでなく、放射点分布から流星群を見つけ出す方法も有用だと言える。

・今後について

SonotaCo Networkにあるデータのすべてにおいて地球速度を考慮した計算を行い、これまでに活動が確認できていない流星群を検出できるか探してみる。また、流星速度がどのくらいから地球速度の影響を受けやすいか、放射点はどの程度の広がりを見せるのかという検証も必要である。

また、うみへび群についても詳しく調べる必要がある。

1. はじめに

「どこから」というのには2つの意味がある。一つは地球上で観測して「どの方向から飛来するのか」であり、もう一つは「何を起源とするのか」ということである。もちろん両者には関係があり、起源によって飛来方向が規定され、逆に飛来方向から起源を推定することも可能である。本稿は流星の飛来方向を分析することによって、<流星>は何を起源とするのかということに迫る試みである。

2. 流星の飛来方向

2. 1. 卓越する飛来方向

流星の飛来方向としては、(1)地球進行方向(Apex)、(2)太陽方向(Hellion)、(3)反太陽方向(ANT)、(4)トロイダルグループ(Toroidal)の4方向が卓越するとされている。これは1960年代に行われたハーバード・スミソニアンレーダー観測によって指摘されたものである。(4)はAdelaideの南半球からの観測によって南北両方向に存在することが確認された。

上の図はHarvardの1961-65年の観測、下の図はAdelaideの1960-61、1968-69年の観測で、図に示す囲み線は、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)=(270, 0)$ 、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)=(340, 0)$ 、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)=(200, 0)$ 、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)=(270, 65)$ 、 $(\lambda-\lambda_s, \beta)=(270, -65)$ をそれぞれ中心とする半径30度の円である。図法の関係で歪んで見えるが、それぞれが(1)~(4)の飛来方向を表している。

電波観測では、主要流星群であっても輻射点は際立った存在とならず、(1)~(4)への輻射点集中が顕著である。

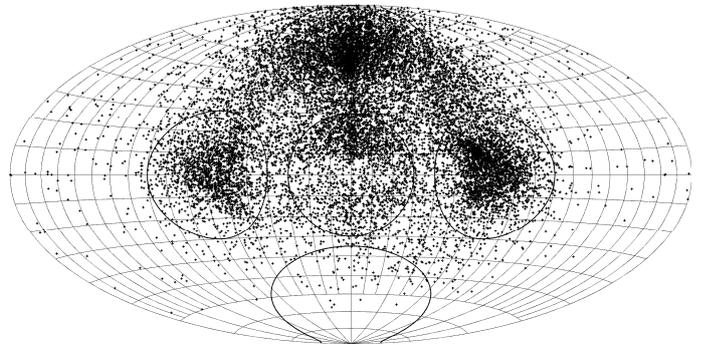


Figure 1: Harvard 1961-65

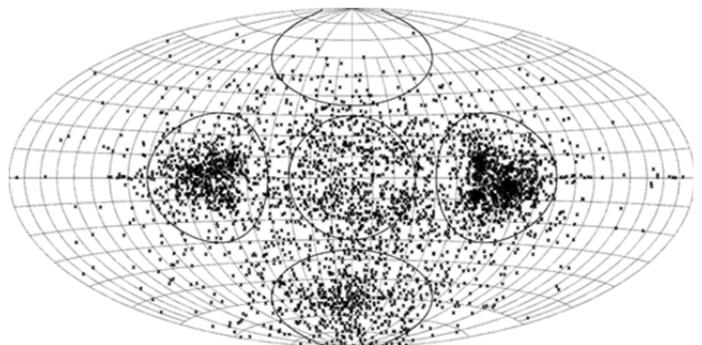


Figure 2 Adelaide 1960-61 & 1968-69

2. 2. 観測方法と飛来方向

まずは、この4つの飛来方向が他の観測でも確認できるのか検証しよう。

日本の眼視観測(NMS)では、この4方向への集中は明確ではない。これはDenning、Hoffmeister、AMS等の観測でも同様である。基本的に(1)~(4)の飛来方向は眼視観測によっては<散在>と認識されるためと考えられる。複数の流星の飛跡が輻射点(流星群)の存在を認識させるために必要である以上、眼視観測における輻射点分布とレーダー観測や写真同時観測における輻射点分布とは区別して考える必要がある。

しかし、実際にNMSで観測された輻射点分布は写真観測の分布によく似て、両者ともに、主要流星群の存在が際立っている。これは後で述べるように観測される流星体の大きさが電波と眼視・写真とは異なっていることによる。

その他、ANTにおける輻射点の集中がともに見られ、ANTからToroidal(N)の西側にかけて弧状に輻射点密度が高くなる傾向が両者に共通している。

Apex方向の輻射点は、やや眼視観測の方が多く、写真観測では集中は明瞭ではない。

CCDやIIの観測でも、主要流星群とANTへの輻射点集中は明瞭である。この他、CCDとIIの観測では、眼視や写真に比べてApex方向での輻射点増大が強く認められる。

総じて、光学観測では、電波観測に比べて、Toroidal方向における輻射点集中は明瞭ではなく、主要流星群とANTへの集中が卓越していると言える。4方向

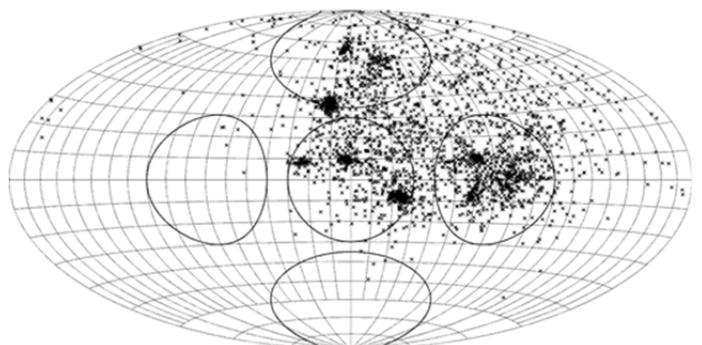


Figure 3: Visual observations (NMS)

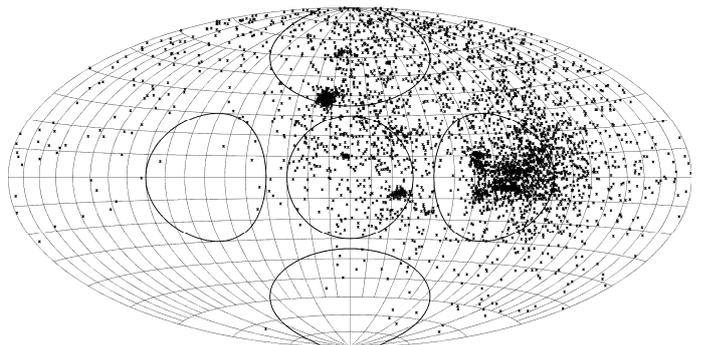


Figure 4: Photographic observations

における輻射点集中は電波観測における現象である。

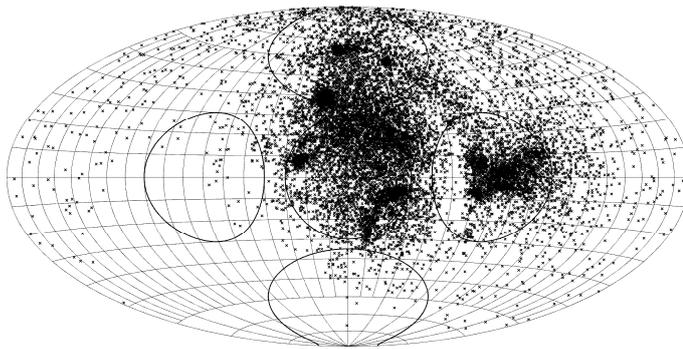


Figure 5: CCD observation (2013 SonotaCo)

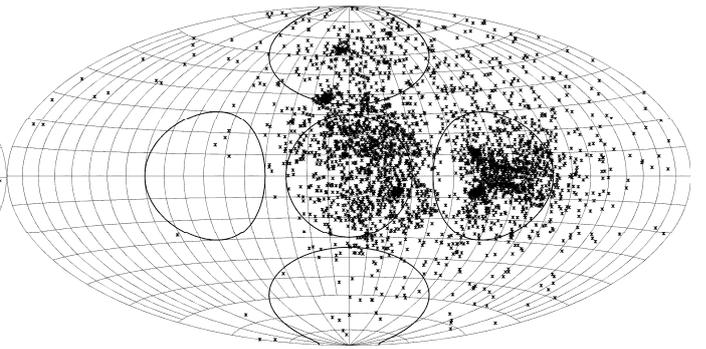


Figure 6: II observations

3. 彗星と流星

流星は彗星または小惑星に由来すると考えられ、特に彗星が母天体として重要と考えられてきた。前2回の発表では、非周期彗星、小惑星を取り上げた。本報告では周期彗星を扱うこととする。

JPL Small-Body Database Browser(<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>)からダウンロードした周期彗星のデータによると(昨年4月)、Deadと付されているものも含め、番号は1~297であるが、分裂した核も含めると365個の周期彗星が存在する。これらから、 $D < 0.5$ の条件によって74個の彗星から126個の輻射点が求められた。

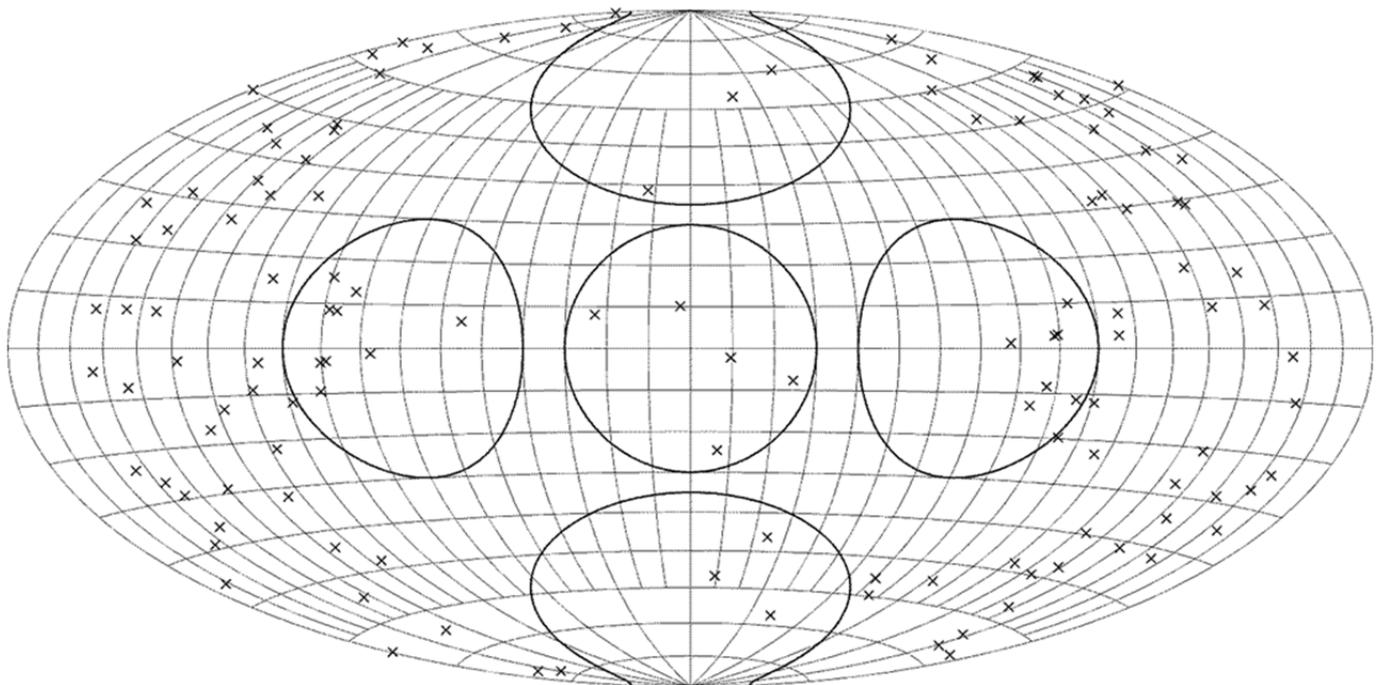


Figure 7: Estimated radiants from periodic comets

ほとんどの輻射点は、輻射点集中域とされる4つの領域の外側に位置している。非周期彗星による輻射点がApex、小惑星による輻射点がANTとHellionに集中しているのは極端な対比をなしている。さらには、先に取り上げたいずれの観測手段によっても周期彗星から予測される輻射点領域の流星は多くないことは注目される。

右の図は、予想輻射点の天球上における単位面積当たりの密度を最大10に規格化して示したものである(ただし、今回はSOHOによ

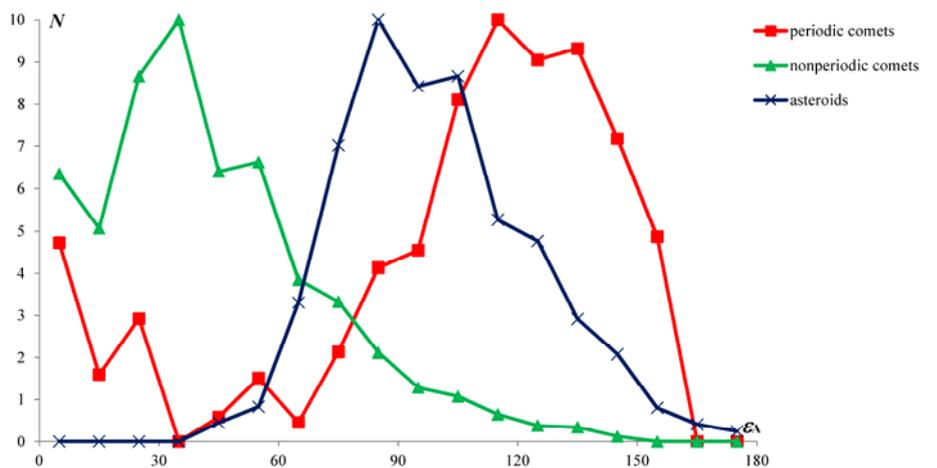


Figure 8: Periodic comets, nonperiodic comets and asteroids

る太陽をかすめる彗星群を除いている)。横軸は Apex からの離角(ϵ_A)を表す。3者の違いは明瞭である。少なくとも、我々が見ている「流星」の多くについて、起源を彗星に求めることは妥当でなさそうである。

4. 検討：流星はどこから来るのか、起源はどこにあるのか

4. 1. 観測方法による違い

先に見たように、観測方法によって見える流星の飛来方向は異なっている。観測方法ごとに第8図と同様な輻射点分布の密度を周期彗星、非周期彗星、小惑星による予想輻射点と比較してみよう。

右図は、II と CCD(SonotaCo 2013)から得られた輻射点より、群流星とされているものを除いた<散在流星>の輻射点分布密度である。II と CCD ではほぼ一致した傾向を示している。Apex 方向が卓越し、非周期彗星からの予想輻射点分布に近いことが分かる。

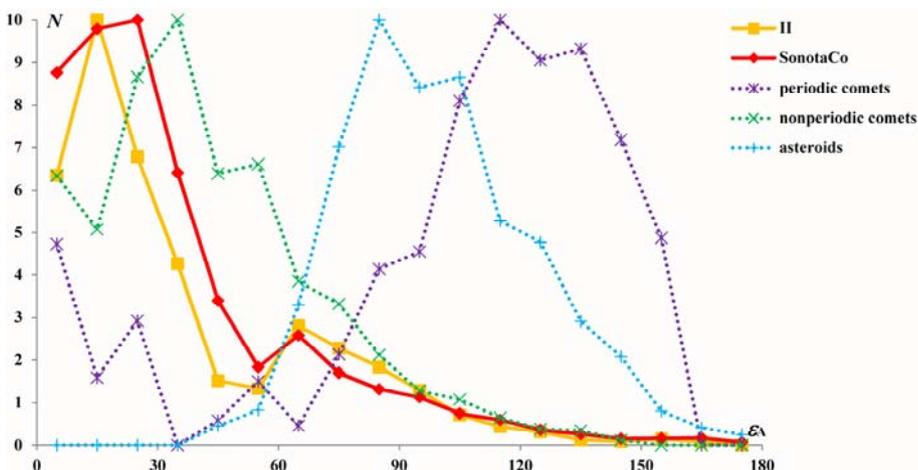


Figure 9: II and CCD observation with the estimates

逆に言えば、II と CCD では、周期彗星と小惑星を起源とする流星をほとんど捉えていないことになる。

II と CCD では、かなり特性が異なり、II は CCD で捉えることのできない暗い流星が主体である。それにもかかわらず、CCD が II と同様に Apex 方向の流星を多くとらえているのはなぜか。この問題については、次項(4. 2)で取り上げることとする。

次に電波観測を取り上げる。電波観測の軌道データには、流星群への帰属は記されておらず、また、先に述べたように電波観測における流星群の流星数の比重は相対的に低いので、ここでは全流星の輻射点分布密度を示している。

II や CCD 同様、Apex 方向の流星が多く、非周期彗星を起源とする流星を捕えていることが推察されるが、注目すべきは Apex からの離角が 60 度付近で密度が最大となることである。つまり、Toroidal と呼ばれる領域の流星が圧倒的に多いという点である。しかし、第 10 図から分かるように Toroidal に直接結びつく天体は存在しない。

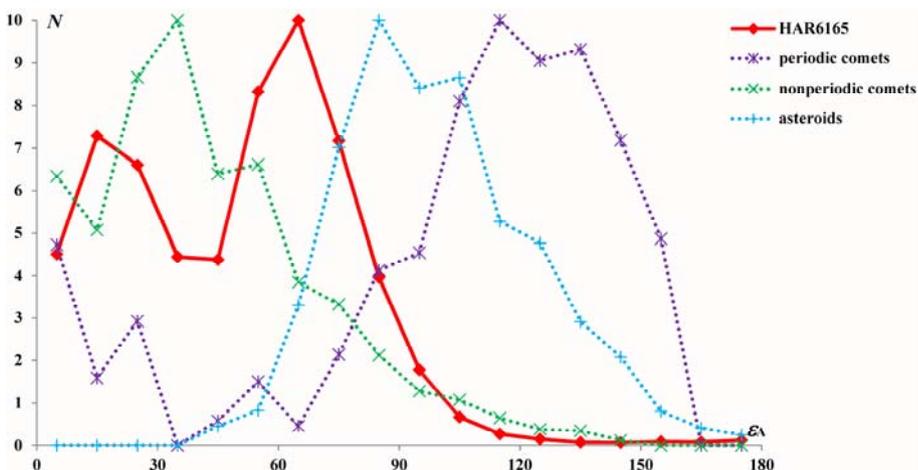


Figure 10: Havard 1961-65 with the estimates

ここで Toroidal は軌道にどのような特徴をもつのか、起源はどこにあるのか簡単に考察しておこう。

右図は、6つの流星群について他の軌道要素は変化させず、軌道傾斜角のみ 360 度回転させると輻射点がどのように変化するか示したものである。

Toroidal 領域にまで輻射点が移動するのは、ジャコビニ群、ペルセウス群、 κ -はくちょう群である。昼間おひつじ群、おうし南群、オリオン群は比較的狭い範囲にとどまる。後者は軌道傾斜角が ± 90 度前後になっても、輻射点の黄緯が ± 90 度に近づくことはない、前者は軌道傾斜角が ± 90 度に近い場合には Toroidal の領域にまで移動する。

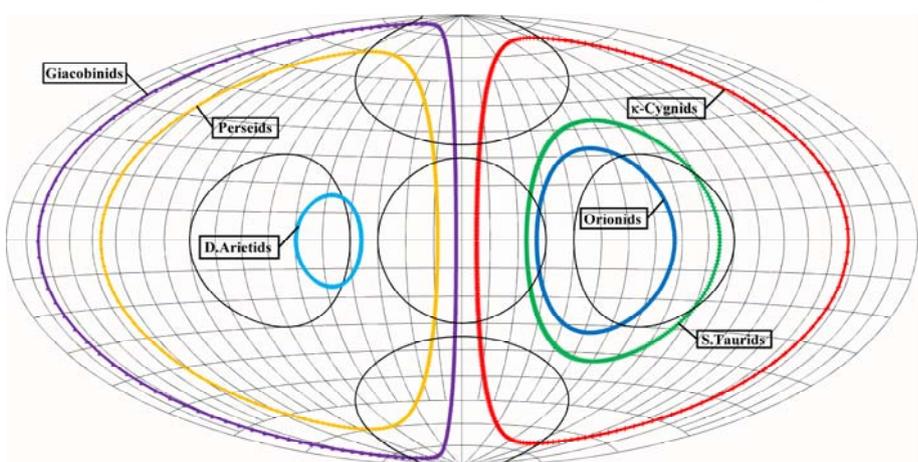


Figure 11: RP drifts by the orbital inclination

前者と後者との違いは、近日点引数にある。つまり、近日点の近傍で地球軌道に交差するか否かである。Toroidal の流星は近日点・遠日点が地球軌道付近にある、軌道傾斜角が大きい流星体なのである。起源は周期・非周期彗星の（または単独で飛来する）流星物質の軌道が何らかの原因で変化したものと推定される。

最後に写真流星について考えてみよう。◇でしめしたものが、群流星を除いた流星全体の分布である。ほぼ、非周期彗星と小惑星のところにピークが一致していることが分かる。つまり、写真観測は、2つの起源をもつ2種類の流星を捕えていると考えられる。

ここで、質量が求められているものから質量が 1g 以上の写真流星に限定して、改めて第 1 3 図に輻射点分布を示す。

第 4 図と比較すれば、Apex 方向の流星が大幅に減少している様子が分かる。この点については、CCD がなぜ、Apex 方向の流星を多数記録しているのかという問題と合わせ、次項で検討する。

第 1 2 図に質量が 1g 以上の写真流星の分布を■で示した。質量が 1g 以上の流星はほぼ完全に小惑星による輻射点分布と一致している。写真流星のうち、Apex 方向から来るものは、ほぼ質量の小さいものに限られ、質量の大きいものが ANT (正確には ANT の中心より西側) 領域からやって来ているのである。前回の発表で「隕石の起源は小惑星と考えられる」と結論付けたが、同様に写真流星の半分はマイクロ隕石で小惑星と同一起源と見てよいであろう。

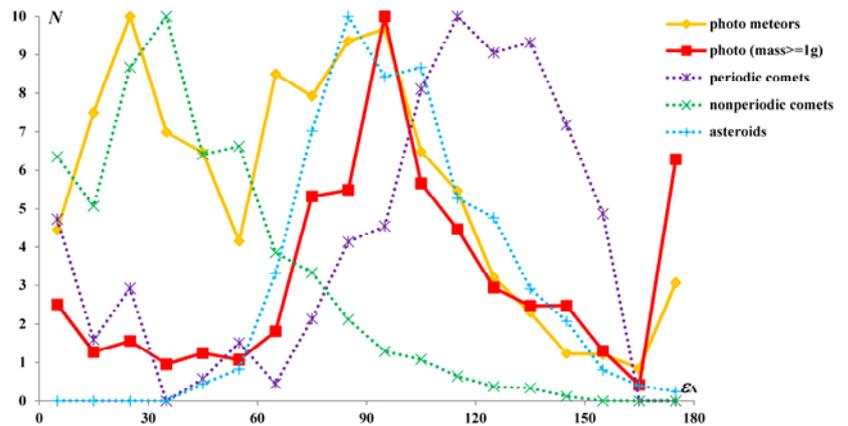


Figure 12: Photographic meteors with the estimates

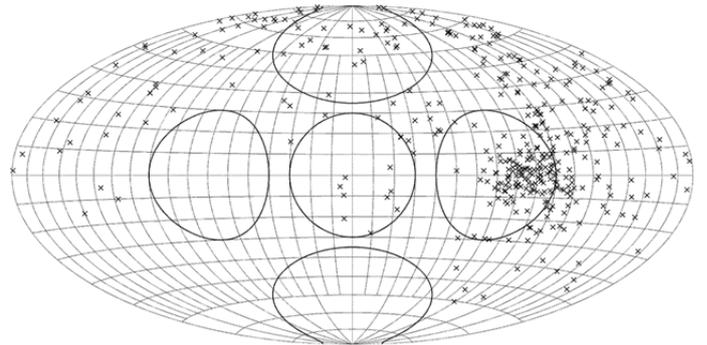


Figure 13: Photographic meteors (mass >= 1g)

4. 2. 周期彗星を起源とする流星はなぜ少ないのか

彗星から予想される輻射点について、地心速度の分布を以下に示す。

Vg	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55	55~60	60~65	65~70	70~
N	0	5	47	34	17	7	4	2	1	2	1	1	0	3	2

輻射点が地球進行の背面方向に多いことから推測されるように、地心速度 20km/s 未満が 86/126=68%と圧倒的多数である。小惑星や非周期彗星に比べて周期彗星の数が少ないだけでなく、地心速度が小さいということにより、観測される流星数が少なくなると考えられる。

流星が観測・記録されるには一定程度の光度が必要であるが、この光度に流星体の質量だけでなく、速度が大きく影響している。先に NMS 同報でも取り上げられたが、スーパーシュミットにより撮影され、詳しく測定された 413 個の流星から高度と質量等の関係を表す式として Jacchia は次の式を求めている。

$$M_{\max} = 55.34 - 8.75 \log v_{\infty} - 2.25 \log M_{\infty} - 1.5 \log \cos Z_R$$

類似の式は様々な研究者によって報告されているが、以下ではこの式を用いて考察する。

1g の質量をもつ流星体が様々な対地速度と天頂離角 (輻射点高度ではないことに注意) で大気へ突入するとどのような明るさの流星になるかをグラフ化すると右図のようになる。

地心速度 v_g と大気圏外速度 v_{∞} には次のような関係がある。

$$v_{\infty} \approx \sqrt{v_g^2 + 125}$$

$v_g=15$ のとき、 $v_{\infty}=18.7$ であるから、周期彗星からの流星の大多数は右図の $v=20$ の線にあてはまる。

$v=20$ と $v=70$ の場合を比べると、実に 4.76 等級の差

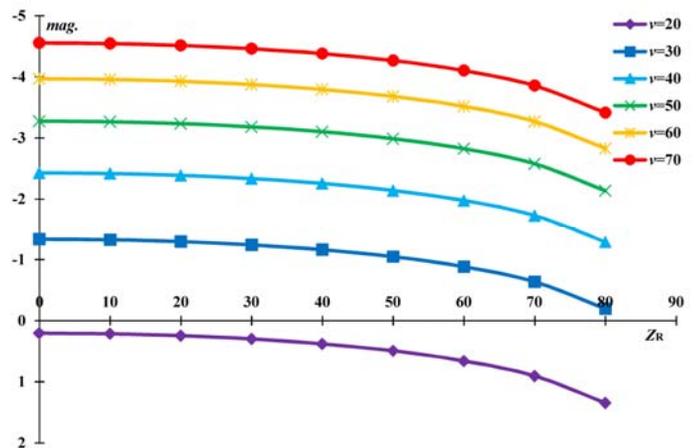


Figure 14: Magnitude change with velocity and Z_R

になる。また、Jacchia の式で質量を 0.1(g) に変えて考えたとしても、この差に変化はない。

$$\Delta M_{\max} = 8.75 \times (\log 70 - \log 20) \approx 4.76$$

さらに、彗星からの予想輻射点が地球進行の背面（背点）、つまり、日没時の天頂方向であり、夜間の観測では輻射点の天頂離角が大きくなる（第 14 図で右側）ことを考慮すればこの差は一層大きくなると推定できる。 $v=70$ となるのは交点方向からの流星であり、夜半過ぎから夜明け前の観測時間では背点の場合より輻射点の天頂離角が小さいと考えられるからである。従って、以下の考察で向点方向の流星と背点方向の流星では、同じ質量でも 4.76 等級の光度差があるとみなす。

この光度差は観測し得る流星体の質量に大きく影響する。この 4.76 等級の差が流星体の質量だけによってもたらされるとすると、

$\Delta M_{\max} = 2.25 \log \Delta m_{\infty} = 4.76$ から、 $\Delta m_{\infty} = 10^{4.76/2.25} \approx 130$ 、つまり 2 桁以上の質量比になる。この関係をグラフ化したものが右図である。通常の光学的観測（写真・CCD）では、 $v=20$ の群は 0.1(g) の流星体までしか捉えられないのに、 $v=70$ の群では 0.001(g) 或いはそれ以下の流星体まで捉えているということになる。

次にこのような違いが観測され得る流星数にどれだけの影響を及ぼすのか考察しよう。 m 等級の流星数 N は m_0 等における流星数を N_0 、光度比を r とすると次のように表せる。

$$N = N_0 \cdot r^{(m-m_0)}$$

ここで、仮に $m_0=0$ 、 $N_0=1$ と置く。 $r=2.5$ とすると、これはよく見られる流星群の活動状況を表していることになる。Kresakova の視認率を最微等星=6.5 として適用した場合には次の表に示した流星が出現していることを仮定したことに相当することが分かる。以下で用いる $Z_R=0$ と考えれば、ZHR=11.0 に相当する。

等級	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	合計
流星数	0.0	0.1	0.2	0.4	1.0	2.5	6.3	15.6	39.1	97.7	244.1	
視認率	0.95	0.87	0.73	0.57	0.48	0.42	0.343	0.232	0.064	0.008	7E-05	
観測数	0.02	0.06	0.12	0.23	0.48	1.05	2.14	3.63	2.50	0.78	0.02	11.0

$m_0=0$ 、 $N_0=1$ という設定を $v=20$ と $v=70$ にあてはめると、 $m_0=0$ となる流星体の質量はそれぞれ、0.488g、0.004g であり、 $v=20$ に比べて $v=70$ では、小さい流星体の個数を 1 個と考えていることになる。

先ほどの式の対数をとると、

$$\log N = m \log r$$

一方、Jacchia の式で質量以外の項を定数項として C で表すと、

$$M_{\max} = C - 2.25 \log M_{\infty}$$

この M_{\max} に流星の等級と流星数の関係を代入して整理する。

$$\log N = (C - 2.25 \log M_{\infty}) \log r$$

これにより、異なる対地速度の群について、同じ光度で同数の流星数を観測するとき、流星体の質量にどのような違いがあるのかが分かる。この関係を $v=20$ 、 $r=2.5$ 、 $M_{\infty}=1(g)$ 、 $Z_R=0$ の場合で $v=70$ 、 $r=2.5$ 、 $M_{\infty}=1(g)$ 、 $Z_R=0$ の場合と比較したものが右図である。このように v だけが異なる条件で、流星体数の比は次式から約 78 倍ということになる。

$$\log \frac{N_{v=20}}{N_{v=70}} = -8.75 \times (\log 20 - \log 70) \times \log 2.5 = 1.894$$

つまり、右図で 2 つのグラフの差は $v=20$ と $v=70$ の流星群について同じ光度ではなく、同じ質量の流星数の比を表している。

前述の表が ZHR を表していると考えれば、これらの直線を任意の範囲で積分し、観測視野面積、観測時間(3600 秒)、大気圏外速度で割ることにより、任意の等級に相当する流星体の空間密度を求めることができる。観測視野面積を仮に 5000km^2 とすると、1g 以上の流星体の空間密度は $v=20$ の群で 3.75×10^{-9} (個/ km^3)、 $v=70$ の群で 1.37×10^{-11} (個/ km^3) となる。つまり、同数の流星を観測するとき、空間密度で約 274 倍の違い（大気圏外速度が異なるので、その比が差を増大して 78 の 3.5 倍になる）があることを意味する。言い換えると、同じ空間密度であれば、観測流星数には約 274 倍の違いを生じることになるのである。これが光学観測（特に CCD）で Apex 方向の流星が卓越する理由である。

電波観測においては、Apex 方向の流星も光学観測に比べて少なくなる理由がある。大気圏に高速で突入する Apex 方向の流星は発光点高度が高くなる。これは、光学観測では何の障害にもならないが、電離層という電波を反射する存在により、それ以上の高度における流星からの反射波を観測できなくなるのである。つまり、

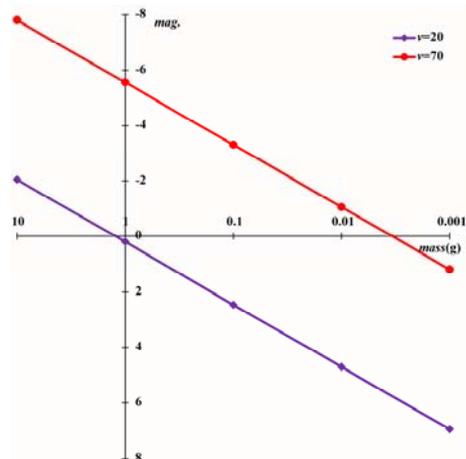


Figure 15: Mass-magnitude relation

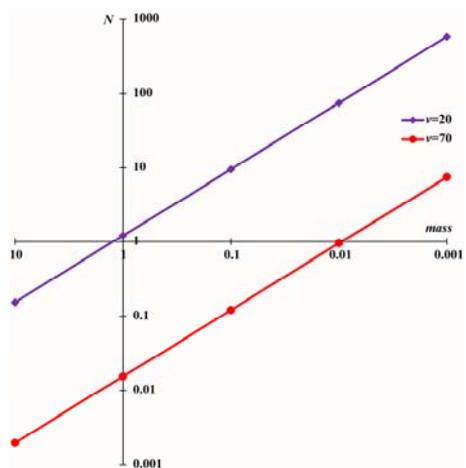


Figure 16: Mass-meteor number (r=2.5)

電離層によって、高速の流星は一部が遮蔽されてしまい、電波観測では光学観測より流星数が少なくなるという宿命的な問題が存在している。

5. まとめ

流星体が流星として観測されるには、発光（プラズマ生成）がなされなければならない。これには対地速度が大きいものほど有利である。非周期彗星の多くは逆行軌道をもち、それを起源とする（或いは彗星雲からやってくる）流星体は Apex 方向から地球大気に突入する。従って、それらの対地速度は大きくなり、小さな流星体でも十分観測し得る明るさとなる。小惑星を起源とする（或いは小惑星帯からやってくる）流星体は ANT 方向から大気に突入する。この場合には、Apex 方向より突入速度は小さくなるが、大きな粒子が多いことが想定され、多数の流星が観察される。周期彗星を起源とする流星体（或いはそれらの末裔）は Antapex 方向から突入することになり、速度は小さくなる。従って、これらが流星として観測されるのは、よほど空間密度が高い場合に限られるのである。彗星を直接の起源とする流星が見られるのは彗星核から放出されて時間が経過していないか、摂動の影響が小さく空間密度が極めて高い一部の流星群の場合に限られるのである。

最初に示した、4つの飛来方向は電波で観測されるものであり、光学観測される流星のかなりの部分は、Apex 方向からの微小流星体、そして、ANT 方向からの小惑星と起源をともにする比較的大きな流星体なのである。彗星を起源とするものは、むしろ特殊な場合と考えていいだろう。

6. 補足：主として П.Б.Бабаджанов, «Метеоры и их наблюдение»による流星体の大気中での運動

$$M \frac{dv}{dt} = -\Gamma S \rho v^2 \quad F = ma = S \rho v \times (-\Gamma v)$$

M ;流星体の質量、 v ;流星体の速さ、 Γ ;流星体の正面抵抗係数、 S ;流星体の断面積、 ρ ;大気密度
流星体によって、排除される大気の単位時間当たりの運動エネルギー

$$K = \frac{1}{2} S \rho v^3 \quad K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} S \rho v \times v^2$$

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\Lambda}{2Q} S \rho v^3 \quad \frac{dM}{dt} = -\frac{\Lambda}{Q} K$$

Λ ;熱伝導係数（運動エネルギーが流星体に伝えられる割合）、 Q ;蒸発熱（石質でも鉄でもほぼ 8×10^3 [J/g]）

$$I = -\tau \frac{dM}{dt} \frac{v^2}{2} \quad I = -\tau \times \frac{1}{2} \Delta m v^2$$

τ ;流星体の運動エネルギー（減少）が光エネルギーに変換される割合

Öpik は肉眼の波長(4500-5700 Å)による感度曲線、恒星の光度と太陽光度との比較、太陽の可視光域の放射を検討して、次の関係を導いている。

$$m = 24.3 - 2.5 \log I$$

これら様々な仮定を用い、さらに数値を想定することによってババジャノフは次式を導いている。

$$I_{\max} = \frac{2\tau}{9H^*} M_{\infty} v_{\infty}^3 \cos Z_R$$

$$\tau = 5.25 \times 10^{-10} v \quad (m < 0)$$

$m \geq 0$ の場合、

$$\tau = \frac{2 \times 10^3}{v} \quad v \geq 17 \text{ (km/s)}$$

$$\tau = 6.8 \times 10^{-10} v \quad 10 < v < 17 \text{ (km/s)}$$

$H^* = 5.64 \text{ (km)}$ （標準大気の密度を流星の出現領域 $H = 90 \text{ (km)}$ で指数近似するための定数）

これらを組み合わせて、ババジャノフは明るい流星について、

$$M_{\max} = 63.50 - 10 \log v_{\infty} - 2.5 \log M_{\infty} - 2.5 \log \cos Z_R$$

また、暗い流星について、

$$M_{\max} = 32.0 - 5.0 \log v_{\infty} - 2.5 \log M_{\infty} - 2.5 \log \cos Z_R$$

と理論的に導いている。しかし、実際にソビエトにおける 300 個の明るい写真流星からは、

$$M_{\max} = 49.7 - 8.0 \log v_{\infty} - 2.0 \log M_{\infty} - 1.5 \log \cos Z_R$$

本文中で引用した Jacchia の式も観測値から求められたものである。

$$M_{\max} = 55.34 - 8.75 \log v_{\infty} - 2.25 \log M_{\infty} - 1.5 \log \cos Z_R$$

理論値には仮定が多く、また、観測値については使用した観測手段、流星に差があるので、これらの式はどのような観測方法についても厳密にあてはまるわけではない。桁数のレベルで扱う（使用する）ことが適切と言える。