

MSS発表用

ジャコビニ流星群、流星物質の天体力学数値シミュレーション

長谷川 隆

主旨

ジャコビニ流星群の彗星の周りの流星物質の分布の問題について、いわゆる天体力学的数値計算をこころみしたので、結果を発表する。

よく知られているように、この群の場合、1972年と1985年の挙動が、母彗星の軌道に添って流星物質の帯が並んでいるという、従来の見解からすると異常であり、流星雨の予想は困難である、という『理論』の有力な根拠？のひとつとされてきた。

ところで、『母彗星の軌道に添った流星物質の帯』という理論では、放出時加わる、余分な速度成分の他、いかなる力も、軌道上に流星物質がほとんど無く、はなれた所にある、といった状態をひきおこす、という事までは想定していない事に、注意しなければならない。良く率あいに出来るこうした力中、通常、大惑星の摂動作用も代表的なものとして、付け加えられている。はたして、そうか？ というのが、ここでのテーマである。

筆者は、ジャコビニ流星群に関して、常日頃よりいっていた、この疑問を解くため、数値計算にめぐまれた知人等に声をかけるだけでなく、自らも設備を方々あつた結果、幸運にも筑波のVMテクノロジー（島社長）の設備を休日ならかりられる事が判かり、同社の泉田正道氏とともに、スタンダードな数値力学計算を、おこなう事ができた。結果を以下に発表する。

計算条件等

計算法は、末尾に示した参考文献により、カウエル法の標準的なアルゴリズムに従い、プログラムを自作した。ただし、彗星と流星物質の位置差に寄与するほど、大きい潮汐力を及ぼすのは、木星だけだと考え、太陽-木星-流星物質の制限3体問題の数値計算をおこなった。流星物質の数は、130個、32ビットマイクロコンピューター、富士通FMR 70HD、i80387数値演算コプロセッサ付きで、コンパイラBASICで、演算時間、約1時間であった。なお、初期条件については、以下の考え方を採用した。

すなわち、1900年より回帰毎に、近日点通過時、流星物質を22m/秒以下で10個ずつ、核より放出させた。これは、1957年の摂動による、実シミュレーション結果からみて、1893年以前の流星物質は、1897年に受ける、木星との大接近による強い摂動作用によって、流星物質同志が、広い範囲にちりちりばらばらに分散されるため、密度の高い帯を形成する事はないという考えからであった。また、上記初期速度上限22m/sというのは、つぎのようにして決定した。

まず、1893年以前の流星物質を考えないで、分布を計算すると、1897年から、1956年までは、木星との大接近がおこらないため、『ほぼ母彗星軌道に添って流星物質の帯ができる時代』であった事が判かった。

そこで、実際にデータと照合しながら、シミュレーションをすすめていくと、興味ある事実が浮かび上がった。母彗星から相対的に離れていた1952年に出現したにもかかわらず、1939年には見えなかったというのである。

そこで、これをつぎのように解釈した。この時代には、流星物質の帯が、軌道にそって母彗星から、すこしづつ前後にのびていくという事は起こっていたので、1939年より、彗星から離れていた1952年には、帯が長くなっていたため、見えたのだと。逆に、この初期軌道差の問題は、そうなるようにすることで、大雑把には解決できた。この上限値の許容誤差は、±15%程度であった。つまりこの計算では、1900-1952年までの分散は、主として、彗星核から放出されたときに受けた力によるものと、仮定したことになる。

次にのべるように、核放出時の初速度が、22m/sの近辺だと、1894年以前の帯は、濼いまま生き残る事ができない。ジャコビニだけの特徴かと思われるが、観測点が、偶然にも初期条件に強い制限をあたえる事ができるように、うまく並んでいたのである！！

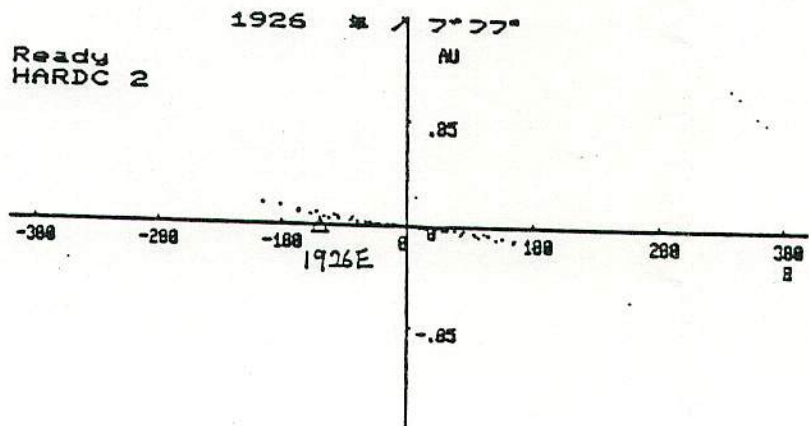
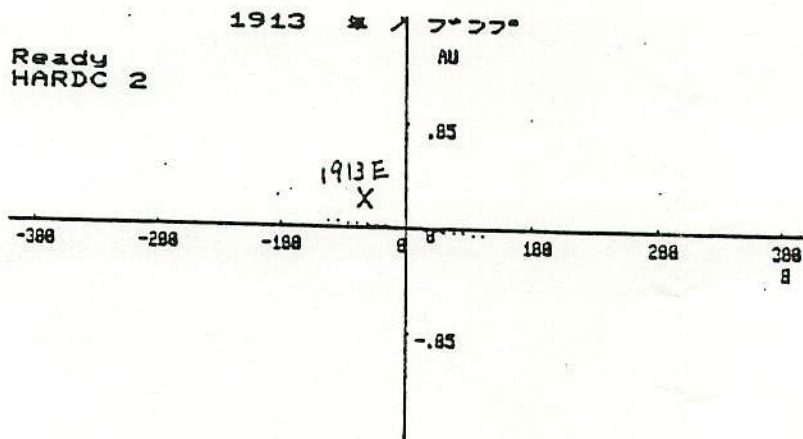
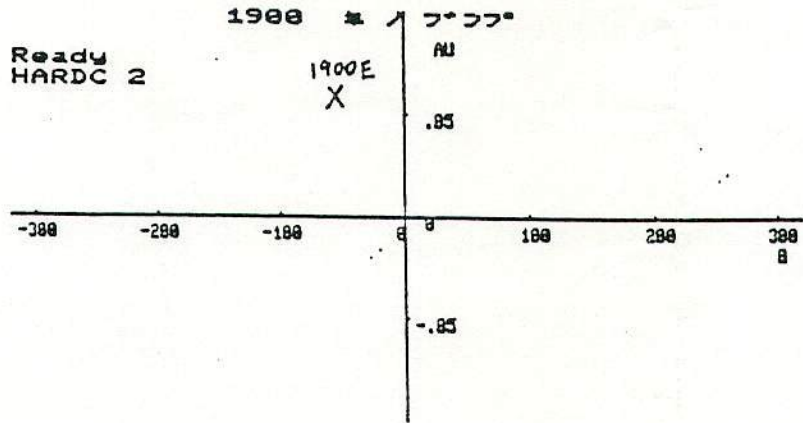
表1 ジャコビニ流星群と地球の関係 ~ 流星の観測と研究より ~

母彗星の軌道から 予測される極大時 (世界時)	日心距離の差** (彗星-地球) (天文単位)	降交点通過時の差*** (彗星-地球) (日)	観測から得られ た極大時 (世界時)
1900年10月 10.5 日	-0.0618	+ 55	—
1913 10 9.8	-0.0179	+ 30	—
1926 10 9.98	-0.0005	+ 69	10月 9.95日 ○
1933 10 9.78	+0.0054	- 80	10月 9.85日 ⊙
1939 10 10.3	+0.0013	+136	—
1946 10 10.16	+0.0015	- 15	10月10.16日 ⊙
1952 10 9.63	-0.006	+195	10月 9.65日 ○
1953 10 9.9	-0.006	-170	—
1959 10 10.2	-0.0594	+ 23	—
1966 10 10.0	-0.0621	-190	—
1972 10 8.63	-0.0008	- 58	? × 不出現
1979 10 9.38	+0.0013	-222	? —

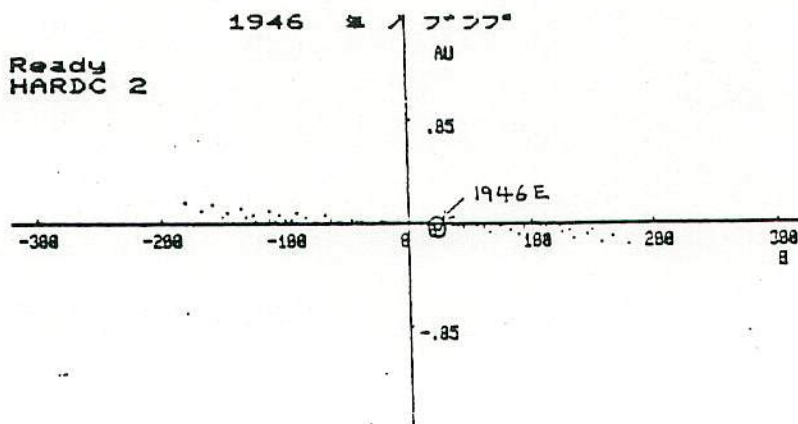
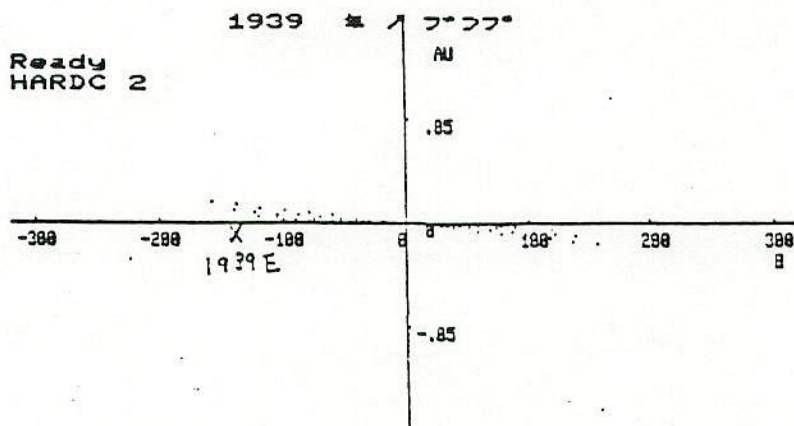
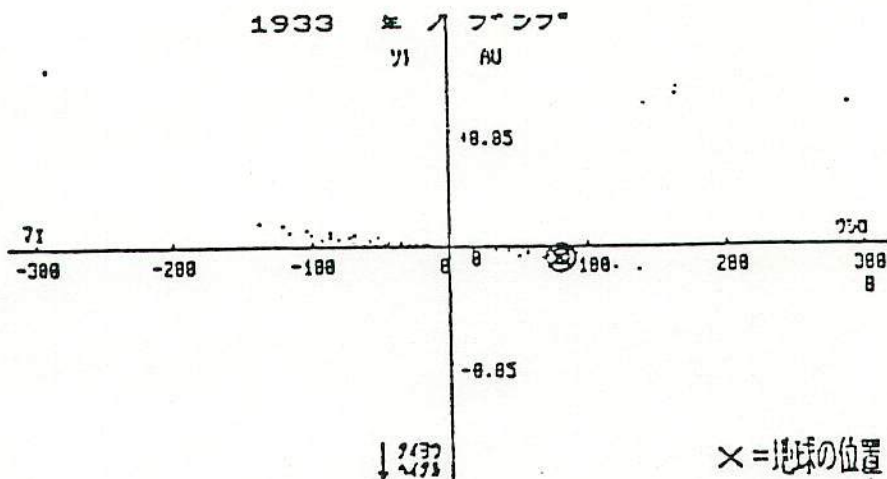
** (+) は彗星の軌道が地球より外側 (太陽より遠い側) にあることを示す
*** (+) は彗星が地球より後で降交点を通ることを示す

1985 10 8.6 +0.030 -27 10月 8.4日 ⊙

MSS-059



MSS-059



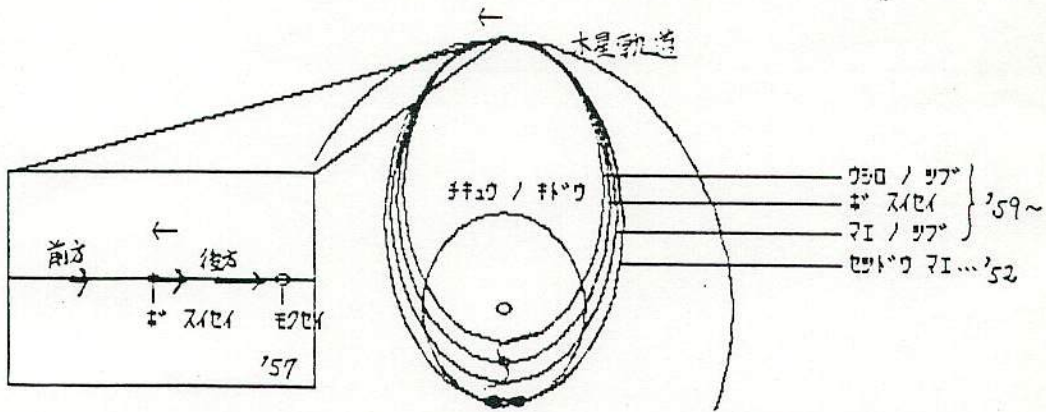
計算結果とその解釈

次のページ以降に計算結果をしめす。各年の分布図で、左が彗星を中心に軌道を北の方から見おろしたもの、右は、南北方向の分布を見るため、彗星後方から、前方に帯を見通した図である。なお、地球軌道が彗星軌道に対して約30度傾いているため、左の図では紙面下から上へ、右の図では、線で示した軌跡をえがいて、下から上に地球はつきぬけていく。

結果をみると、流星物質の分布が、奇妙にS字型にねじれた分布になっている。これは、大雑把に言うと、次のプロセスで形成される。

まず始めに、彗星の軌道にそって整然と並んだ帯があったとする。1952-1959年の1回帰中に、qが急激に減少するような、木星との大接近が起こった。ところが、近日点通過時間のわずかな差で、その変化量に大きな差があったとすると、より木星との会合タイミング時間差の少なかった『帯の後ろの方』ほど、大きな摂動量を受けるため、後ろの帯が、彗星軌道の内側に湾曲して、『彗星軌道に添って整然と並んだ帯』のイメージからはおよそほど通り、『S字状に湾曲した帯』を形成するのである。1972年の不出現、1985年の『異常』出現は、この効果でびたりと説明する事ができた。

図4 木星の接線摂動による分布変化の概念図



【表2】ジャコビニ・ジンナー周期彗星の軌道要素 (1950.0分点時刻)

番号	近日点通過 (西暦年)	ω	Ω	i	q	e	周期	計原
(1894)	2月 6日	167.0	199.0	11.3	1.229	0.664	6.97年	ダイビス、ブルスキ
1900Ⅱ	11 28.496	171.0309	197.4323	28.8266	0.931321	0.71568	6.46	ヨーマンス
(1907)	—	—	—	—	—	—	—	—
1913V	11 2.567	171.4864	196.2662	30.7472	0.976009	0.720616	6.33	ヨーマンス
(1920)	—	—	—	—	—	—	—	—
1926VI	12 11.708	171.7349	196.2424	30.7326	0.993723	0.717005	6.38	ヨーマンス
1933Ⅲ	7 13.147	171.7715	196.2430	30.6829	0.993227	0.715993	6.60	ヨーマンス
1940 I	2 17.211	171.7921	196.2498	30.7414	0.993603	0.716704	6.39	ヨーマンス
1946V	9 18.486	171.8103	196.2332	30.7259	0.993706	0.716679	6.39	ヨーマンス
(1953)	4 17.0	171.91	196.23	30.83	0.9887	0.7179	6.36	クリップス
1959Ⅷ	10 25.919	172.8443	196.0299	30.9038	0.923915	0.72947	6.42	ヨーマンス
1966 I	3 28.291	172.9199	193.9631	30.9442	0.923507	0.729400	6.41	ヨーマンス
1972 d	8 4.936	171.9063	193.1314	31.7092	0.993993	0.715093	6.32	ヨーマンス
1979	2 13.083	171.9735	193.0697	31.7000	0.996039	0.714673	6.32	ヨーマンス

(注) (番号) () は省略された年を示す。ω = 近日点引数、Ω = 昇交点経度、i = 軌道傾斜角、
 q = 近日点距離 (天文単位)、e = 偏心率、周期 = $\sqrt{a^3}$ 、ここで a = q/(1-e)。
 1984年 9 5.2571 172.4897 194.0764 31.8793 1.828263 0.707533 6.59 ヤコビニ
 ジャコビニ・ジンナー周期彗星の軌道 (表2) ジャコビニ・ジンナー周期彗星の位置予報 (T = 1972年8月4.90日)

考察

以上のべたように、1952年から1959年にかけての1回帰で受けた木星の摂動作用によって、帯の形態が急激に変化し、軌道に添わない流星物質の帯というものができうる事が、力学シュミレーションによって、おおむね再現された。すなわち1957年の木星の摂動のため、それまでは母彗星の軌道におおむね添って分布していた流星群の帯が、母彗星の軌道とかけ離れた『奇妙なS字形』に突如として変化したために、1972年は、彗星軌道以上に地球が交わっても不出現、1985年は、離れていても出現になるという、結果となった。

なお、シュミレーション結果から、母彗星軌道面の上下方向の流星分布をみると、『1985年に極大時刻が早まった件』および『出現時間幅が広がらなかった件』も、確かに力学的に説明のつく、事実である事が確認できた。

これらは、帯の南北方向へのねじれ、および、3次元的でない、2次元的一曲面的な流星の拡散によって、ひきおこされていたらしいのである。図をよく見ていただくと判かるのであるが、1985年の極大時刻が4時間程度ずれたことさえ、この計算結果から説明できることが、明らかとなった。

今後への結びつけ

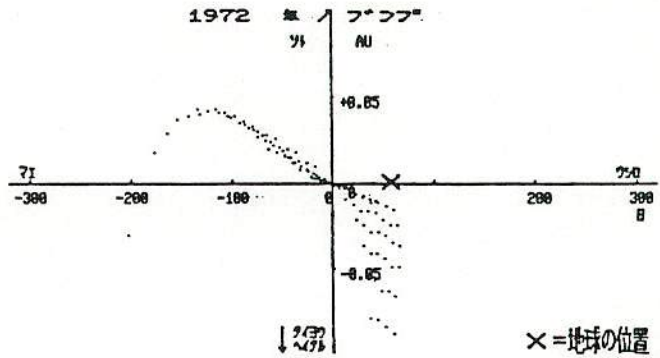
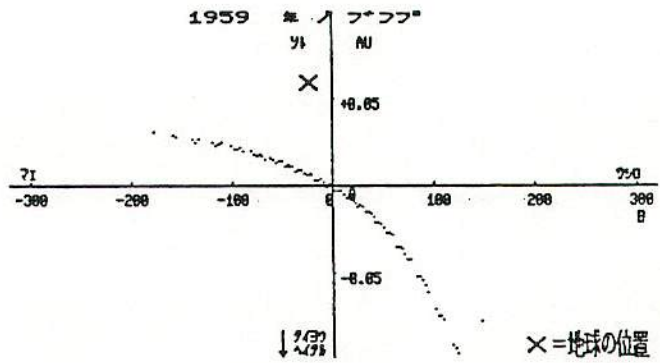
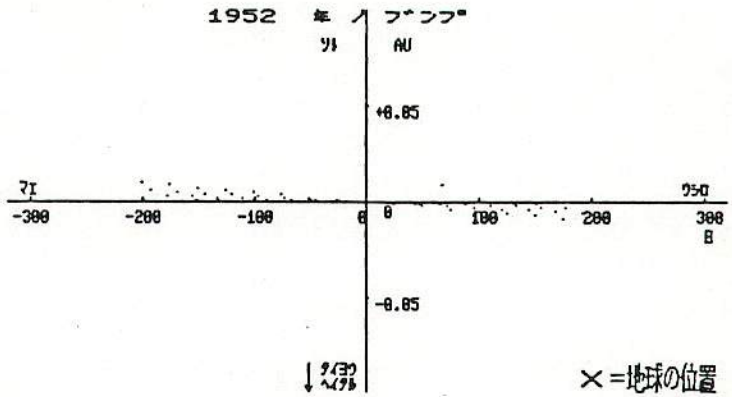
こんかいの結果より、木星の摂動作用が、流星群の複雑な出現パターンの原因のひとつである事が、ほぼ確認できた。従って、今後は、流星群の出現予想をたてる際、上にのべたような事も一応加味してみる必要があるのではなからうか？ まあいままでは、流星物質の軌道を、いちいち彗星からの放出時点にさかのぼって、1個ずつ解いて出現予想をたてる事など、予想される複雑さから考えて誰も試みなかったわけだが、計算機の発達により、将来的には、この方向に進むのではなからうか。推定年令91歳のジャコビニ『1972年不発問題』の次にくるのは、かの11月のLeo群の『1930年代不発問題』、という事になるのかもしれない。(なってほしいものである。)

参考文献

- 天体の位置計算 長沢 工 著 地人書館 1981年 発行
 天体軌道論 長谷川一郎著 恒星社 1983年 発行
 軌道計算テクニック タタースフィールド著 大西洋訳 地人書館
 1988年 発行

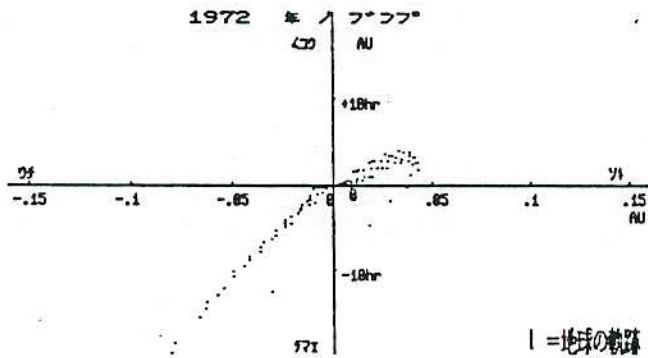
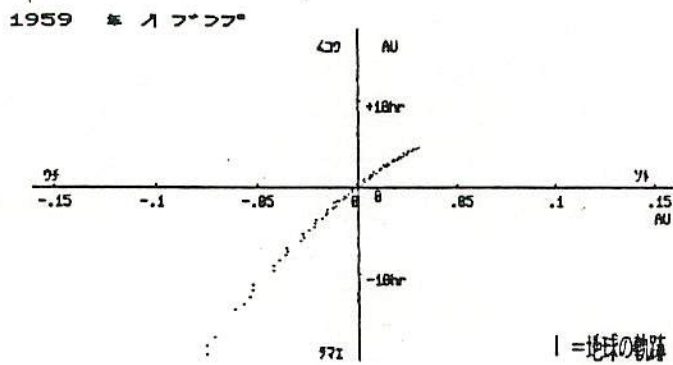
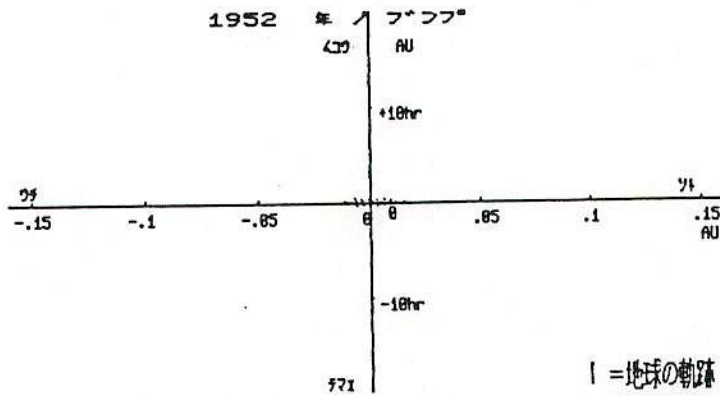
(注：以上3冊だけでも組めました)

以上



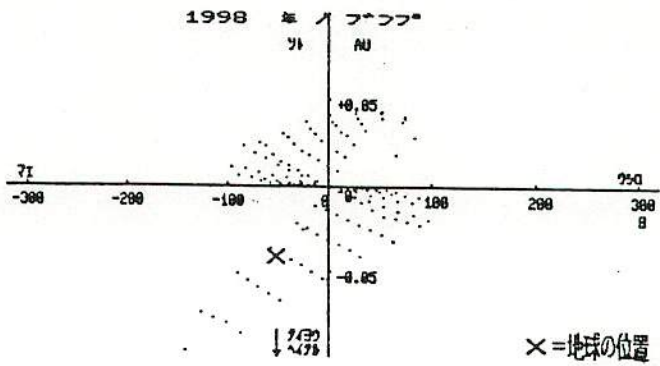
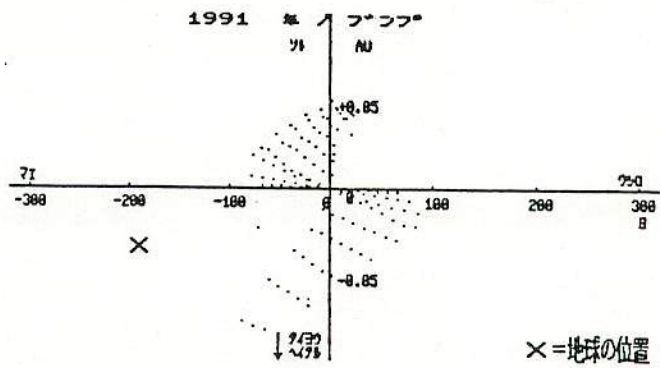
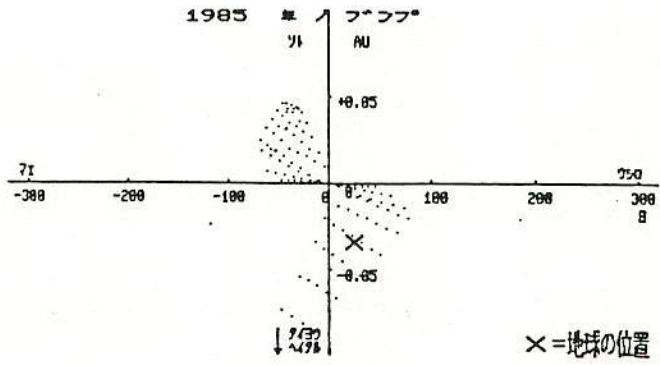
ジャコビニ流星群の分布計算(1) 平面図
 カウエル法によるシミュレーション
 長谷川隆・安田正道(1991)

MSS-059



ジャコビニ流星群の分布計算 (1) 立面図
カウエル法によるシミュレーション
長谷川 隆・柴田正道 (1991)

MSS-059

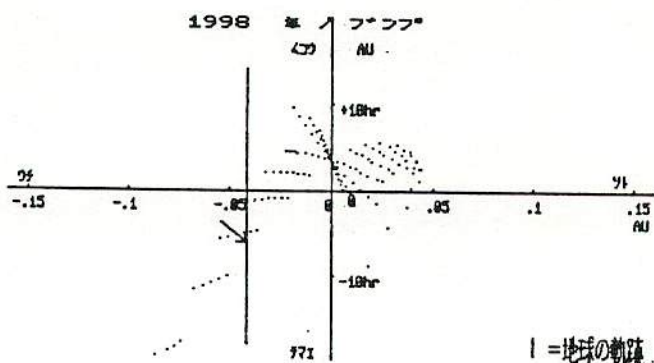
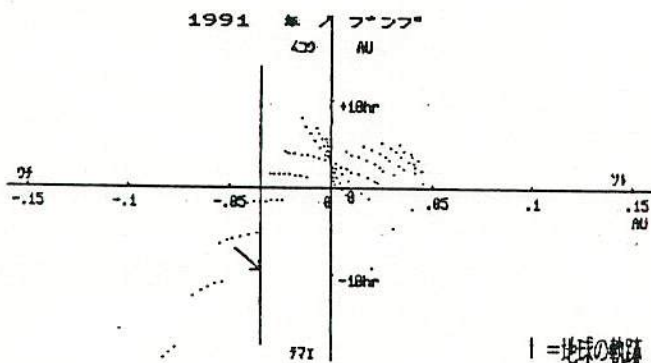
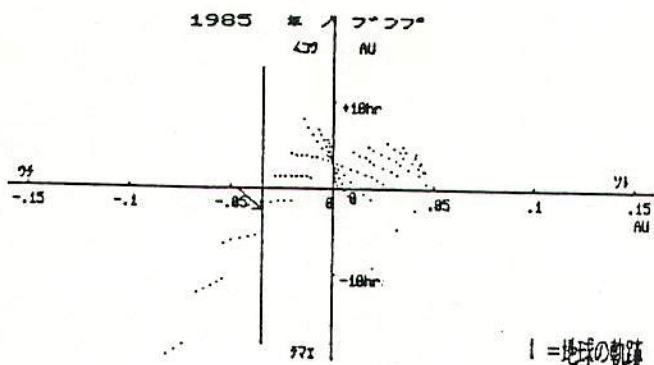


ジャコビニ流星群の分布計算(2) 平面図

カクエル法によるシミュレーション

長谷川 隆・泉田正道(1991)

MSS-059



ジュコビニ流星群の分布計算(2)文面図

カウエル法によるシミュレーション

長谷川 隆・泉田 正道 (1991)

61回 1/15(水)

11/10(日) 21回実験

長谷川 隆

双子座流星群

彗星核の崩壊の結果として、Gem群が形成された事を考えてみよう。その彗星核の残遺天体が、小惑星Phaetonである。Phaetonの永年摂動の計算結果は第1表に示されている。

第1表. 小惑星Phaetonの軌道要素の永年摂動(a=1.271AU)。T=0は1950.0年に相当する。

(表省略)

もし我々が、彗星核の直径を10kmと仮定すると、彗星核から放出された小粒子は、軌道長半径1~1.7AU、離心率0.88~0.92の間の軌道を動く事になるであろう。

第2表は1~1.7AUの軌道長半径を持つ、Gem群の軌道の永年変化を示す。第1表と第2表は、軌道の永年変化が以下の運動の積分を満足すると考えてよい事を表している。

(3) $C_1 = (1 - e^2) \cos^2 i = \text{const.}$

(4) $C_2 = e^2 (0.4 - \sin^2 i \cdot \sin^2 \omega) = \text{const.}$

第1図. Gem群軌道の異なった軌道長半径に対する、近日点引数の永年変化

(図省略)

第2図. 双子座流星群モデルの空間的形狀

(図省略)

第2表. a=1.0AU及びa=1.7AUのGem流星群の軌道の永年変化と数値C₁, C₂。T=0は、1950.0年に相当。

Table 1. Secular perturbations in the orbital elements of the asteroid Phaeton /a=1.271 AU/. T=0 corresponds to 1950.0

T · 10 ⁻³ / yr	e	q / AU	i ^o	Ω ^o	ω ^o	π ^o	C ₁	C ₂	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	.890	.140	22.0	265.0	321.7	227	.18	.27	
-1	.899	.129	16.1	287.0	300.2	227	.18	.28	
-2	.901	.126	14.0	325.3	262.6	228	.18	.28	
-3	.897	.131	18.0	358.7	229.8	228	.18	.28	
-4	.888	.143	24.5	15.8	213.1	229	.18	.27	
-5	.875	.159	30.3	24.7	204.1	229	.18	.27	
-6	.860	.178	35.1	30.1	198.1	228	.17	.27	
-7	.845	.197	38.9	33.7	193.5	227	.17	.27	
-8	.831	.215	41.6	36.3	189.5	226	.17	.27	
-9	.819	.230	43.5	38.3	185.7	224	.17	.27	
-10	.812	.239	44.6	40.1	181.9	222	.17	.26	
-11	.809	.242	45.0	41.8	178.2	220	.17	.26	
-12	.811	.240	44.7	43.7	174.4	218	.17	.26	
-13	.818	.232	43.7	45.4	170.5	216	.17	.26	
-14	.828	.218	42.0	47.6	166.6	214	.17	.26	
-15	.842	.200	39.4	50.5	162.4	213	.17	.26	
-16	.857	.182	35.9	54.4	157.5	212	.17	.26	
-17	.872	.163	31.5	60.3	151.4	212	.18	.26	
-18	.884	.147	26.1	69.2	142.2	211	.18	.26	
-19	.894	.135	20.5	85.2	126.7	212	.18	.26	
-20	.898	.129	16.7	112.7	100.0	213	.18	.26	

Table 2. Secular variations in and the values of C₁

a = 1 AU							
T · 10 ⁻³ / yr	e	q / AU	i ^o	Ω ^o	ω ^o	π ^o	C ₁
-20	.877	.123	16.7	112.7	10		
-19	.875	.125	18.6	94.0	11		
-18	.870	.130	21.7	80.1	13		
-17	.863	.137	25.1	70.4	14		
-16	.854	.146	28.4	63.5	14		
-15	.845	.155	31.4	58.4	15		
-14	.836	.164	33.8	54.4	15		
-13	.827	.173	35.8	51.3	16		
-12	.819	.181	37.6	48.6	16		
-11	.811	.189	39.0	46.4	16		
-10	.805	.195	40.0	44.5	16		
-9	.801	.199	40.7	42.7	17		
-8	.798	.202	41.1	41.1	17		
-7	.797	.203	41.2	39.6	17		
-6	.798	.202	41.0	38.1	18		
-5	.800	.200	40.6	36.5	18		
-4	.805	.195	39.9	34.9	18		
-3	.811	.189	38.9	33.1	18		
-2	.818	.182	37.6	31.2	19		
-1	.826	.174	35.9	29.0	19		
0	.835	.165	33.9	26.3	19		

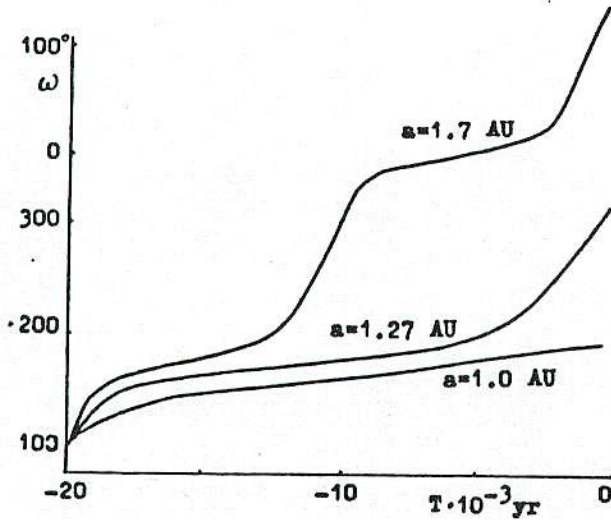


Fig. 1. Secular variations of perihelion arguments for different semimajor axes of the Geminid orbits. $T=0$ corresponds to 1950.0

The Geminid stream orbits with $a=1$ AU and $a=1.7$ AU, and C_2 . $T = 0$ corresponds to 1950.0

$a = 1.7$ AU

	π^0	C_1	C_2	e	q	i^0	Ω^0	ω^0	π^0	C_1	C_2
				AU							
.0	212.7	.21	.25	.926	.125	16.7	112.7	100.0	112.7	.13	.27
.0	212.0	.21	.25	.912	.149	28.5	64.6	146.2	210.9	.13	.27
.3	211.4	.21	.24	.883	.199	40.5	51.4	159.5	210.9	.13	.27
.5	210.9	.21	.24	.850	.256	47.6	46.0	166.9	212.9	.13	.27
.1	210.6	.21	.24	.826	.295	43.0	43.0	173.5	216.5	.13	.27
.2	210.6	.21	.24	.822	.302	51.5	40.7	180.0	220.8	.13	.27
.5	210.9	.21	.24	.839	.274	49.3	38.3	186.5	224.8	.13	.28
.1	211.3	.21	.25	.870	.221	43.9	34.9	192.8	227.7	.13	.28
.3	212.0	.21	.25	.903	.165	33.7	27.8	201.1	228.9	.13	.29
.3	212.7	.21	.25	.926	.127	18.7	4.7	223.7	228.3	.13	.30
.2	213.7	.21	.25	.928	.123	15.2	282.2	304.7	226.9	.13	.30
.9	214.7	.21	.25	.909	.154	29.6	249.1	337.4	226.5	.13	.30
.6	215.8	.21	.25	.880	.204	40.2	240.6	347.1	227.7	.13	.29
.3	216.9	.21	.25	.853	.250	46.0	236.9	353.7	230.6	.13	.29
.0	218.0	.21	.26	.840	.273	48.3	234.4	0.1	234.5	.13	.28
.6	219.2	.21	.26	.846	.262	47.6	232.1	6.6	238.6	.13	.28
.3	220.2	.21	.26	.870	.221	43.7	228.8	13.2	242.0	.13	.28
.1	221.2	.21	.26	.901	.168	35.5	222.5	21.2	243.7	.12	.29
.9	222.1	.21	.26	.927	.125	22.1	204.2	39.4	243.6	.12	.30
.8	222.8	.21	.26	.934	.111	14.7	132.3	109.8	242.1	.12	.30
.1	223.4	.21	.26	.922	.133	28.8	87.9	153.3	241.0	.12	.30

積分(3)はMoiseev(1945)によって見い出され、又(4)はLidov(1961)による。

放出された粒子の近日点黄経とPhaetonのそれとの差は、調査された全期間において平均して $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ である。それ故に我々はこの流星群が、単一構成として変化すると仮定する事が出来る。この事は、惑星摂動に起因するであろう流星群の形態を決定する際に利用出来るだろう。この目的の為に、第一近似において、我々は全流星体の軌道の近日点黄経が一定であると仮定する事にしよう。即ち、

$$(5) \quad C_3 = \pi = \Omega + \omega = \text{const.}$$

第1表、第2表そして第1図から判る様に、流星体の軌道長半径が大きければ大きいほど、軌道の変化が速やかである。

初期の軌道要素の変化の割合の相違によって、時間が経つにつれ、粒子は、関係式(3-5)によって定義される空間を充填するであろう。そしてそれは、永年摂動によるものである。流星群の形態は、例えば、次の方法で決定できるかも知れない。 $C_1=0.13, C_2=0.29$ という値は、 $a=1.7\text{AU}$ の軌道に相当する。近日点引数が、 0° から 360° 迄の値を持つと仮定し、関係式(3-5)を用いて、我々は e, i, Ω に相当する値を導くこうとしている。それらの軌道の多くは、流星群を限定している外側面(太陽に関して)を決める。 $a=1\text{AU}, C_1=0.20, C_2=0.27$ の軌道に対しては、同様な方法で、内側の限界面を得るであろう。それらの面によって限界付られる流星群の形態を推定する為に、ある軌道の速度ベクトルに垂直な横断面を描いた。その軌道は、Phaetonの a, e, π と同じであるとしたが、 i は0とした。それらの横断面によって決定された双子座流星群の形態は、第2図に示されている。その様な形態は、今迄持たれていた流星群の概念とは大いに異なる。今迄は通常は、比較的厚みの薄い楕円のリングの様なものと考えられていた。我々のモデルから生まれた流星群の形態の特徴は、そのとても大きな厚みで、地球、太陽間距離の1AUに等しいことである(Babadzhanov and Obrubov 1986)。

長期間の母天体からの粒子の放出は、同じ軌道長半径を持った軌道に、異なった近日点引数を持たせる事になる。さらに惑星摂動は、軌道要素の分散を増大させ、又、軌道周辺の粒子の位置を分散させる(Jones 1985)。第2表と第1図の結果は、 $a=1.0\text{AU}$ 及び $a=1.7\text{AU}$ の軌道の近日点引数の差が、流星群形成後20000年間に 316° になった事を示している。それ故に、軌道要素の初期の分散によって、そして関係式(3-5)によって、定義される空間における容量は殆ど満たされていると考えられるのである。

MSS-060

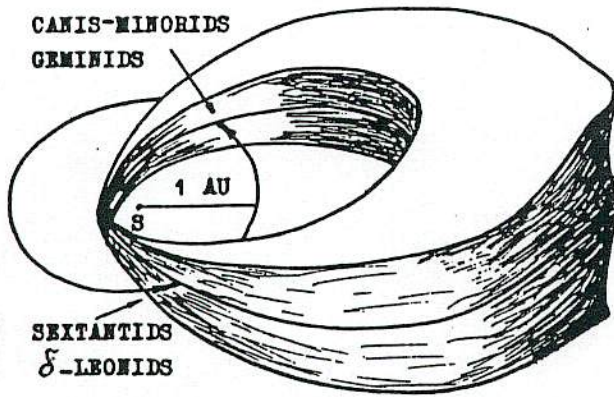


Fig. 2 Spatial shape of the Geminid stream model.

放出速度の仮定値:

$$C = 30 \sqrt{\frac{2}{\xi} - \frac{1}{a}} \quad R \sim 30 \text{ m/sec}$$

$$\xi = 0.14 \quad a_{\max} = 1.7 \quad a_{\min} = 1 \quad \Delta a = 0.7 \text{ AU}$$

$$C_{\max} = 30 \sqrt{\frac{2}{0.14} - \frac{1}{1.7}} = 111.03 \text{ km/sec}$$

14.286 0.588

$$C_{\min} = 30 \sqrt{\frac{2}{0.14} - \frac{1}{1}} = 109.35 \text{ km/sec}$$

$$\therefore \Delta V = 111.03 - 109.35 = 1.68 \text{ km/sec}$$

$$\therefore \text{放出速度} = \frac{\Delta V}{2} = 0.84 \text{ km/sec} = 840 \text{ m/sec}$$

もし関係式(3-5)に条件式(1)を加えると、既知の軌道長半径と定数 C_1, C_2, C_3 を用いて、地球の軌道と交差する粒子の軌道要素を決定する事ができる。これらの要素は以下の公式によって計算されるものである。

$$(6) \quad m e^4 + n e^2 + k = 0$$

$$(7) \quad i = \text{Arccos} \sqrt{C_1 / (1 - e^2)}$$

$$(8) \quad \omega' = \text{Arcsin} \frac{0.4 e^2 - C_2}{e \sin i}$$

$$(9) \quad \omega = \begin{cases} \pm \omega' \\ 180^\circ \pm \omega' \end{cases}$$

$$(10) \quad \Omega = C_3 - \omega$$

ここで、 $m = a^2$; $n = a^2(C_1 - 2) + 2a - 0.6$;

$$k = (a - 1)^2 \cdot (1 - C_1) - C_2$$

もし(6)式が許容できる解を持つならば、(9)式の結果として定められた軌道と地球軌道との交差は、近日点引数の4つの値が満足する事になる。

第3図. 近日点引数に対するPhaetonの軌道の昇降交点の離心率と軌道傾斜角と動径の依存関係。 R_+ と R_- はそれぞれ昇交点と降交点における動径。 $R_+ = R_- = 1\text{AU}$ はPhaetonと地球の軌道の交差を調和している。1- δ Leonids, 2-Canis-Minorids, 3-昼間Sextantids, 4-Geminidsである。

(図省略)

これは定められた軌道が、原則として、2対の流星雨を生じる事を可能としている。それぞれの対の近日点引数と昇交点黄経は 180° 異なるが、軌道傾斜角と軌道離心率は大体一致している(第3図)。

初期の観測以来、幾つかの流星雨の南北分枝が発見された。それらの昇交点黄経と近日点引数は、 180° 異なる。さらに同じ流星群の近日点前後における流星雨が同様に知られている。南北分枝と対比して、それらは一年の異なった時期に活動する。そしてそれらの流星雨の内1つは、夜間及至昼間に活動するものと思われる。その様な流星雨は双生流星雨と呼ばれている。大抵の流星雨分枝と双生流星雨は、小さい軌道傾斜角を持つ流星群として観測されている(Drummond 1980)。小さい軌道傾斜角のものでは、惑星摂動が、迅速に粒子の軌道の近日点引数の分散を高めるという事で説明されている。南北分枝の輻射点と活動日の接近によって、そのような流星雨は、たやすく観測期間中に検出される。比較的大きな軌道傾斜角を有する流星群として、例えば、双子座の場合には、流星雨の分枝の輻射点は本質的に異なる。

式(6-10)及び第3図に従うと、双子座流星群からのたった4つの比較的軌道の狭いグループが、地球の軌道と交差する事が可能である。その様なグループは双子

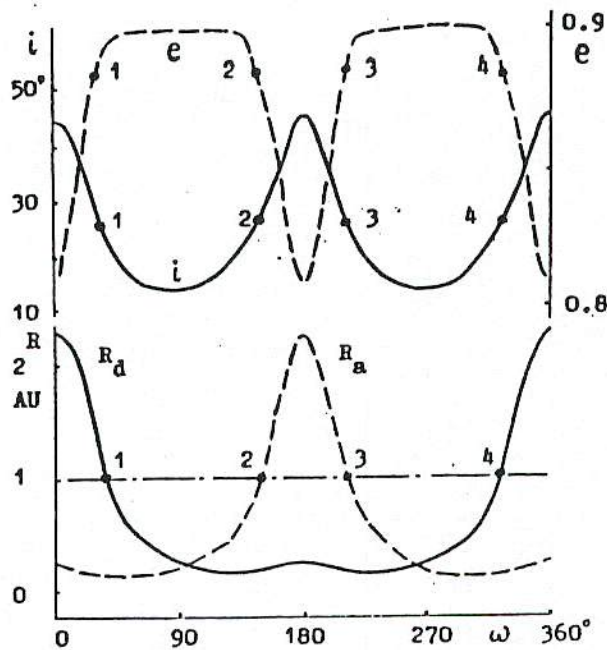


Fig. 3. The dependence of eccentricity, inclination and radii-vectors to orbital nodes of Phaethon orbit on perihelion argument. R_a and R_d radii-vectors to ascending and descending nodes. $R_a = R_d = 1$ AU correspond to intersection of the Phaethon's and Earth's orbits: 1 - δ Leonids, 2 - Canis-Minorids, 3 - Daytime Sextantids, 4 - Geminids.

Table 3. Theoretical and observed radiants of the meteor showers produced by the Geminid meteoroid stream.

	Geminids		Canis-Minorids	
	Theor.	Obs.	Theor.	Obs.
λ_{\odot}	256-263°	261°	256-263°	252-263°
α_R	111-112°	112°	108-110°	105-113°
δ_R	+33-+32°	+32°	+11-+12°	+9-+15°
v_g kms ⁻¹	31- 36	34	31- 36	35- 44
D	0.05-0.04	-	0.05-0.03	-

	Daytime Sextantids		Daytime δ -Leonids	
	Theor.	Obs.	Theor.	Obs.
λ_{\odot}	190-197°	184-195°	190-197°	?
α_R	161-162°	152-157°	168-170°	?
δ_R	+3- -5°	0-8°	17-16°	?
v_g kms ⁻¹	36- 32	32-30	31-36	?
D	0.18-0.13	-	-	-

群、昼間六分儀群、小犬群、昼間 δ Leo群(輻射点の位置に従って名付けられている)の様な流星雨を生じる。

第3表. 双子座流星群によって生成された流星雨の理論的及び観測輻射点
(表省略)

これら全流星雨に対する理論的な座標と太陽黄経は第3表に与えられている。観測データは、これら4流星雨の内、少なくとも3流星雨が活動している事を示している。即ち、双子座群、小犬群、そして六分儀群である。小犬群は、Hindley and Holden(1970)によって発見され、写真と眼視観測の結果から、Lindblad(1971)及びKresakova(1974)によって確定された。Kresakovaは小犬群が、明らかに双子座群に関連する事を考えた、最初の人であった。Nilsson(1963)は双子座群と六分儀群との関連性を想定した。観測された流星雨の対地心輻射点と速度、即ち、双子座群(Cook 1973)、小犬群(Kresakova 1974)、六分儀群(Cook 1973; Sekanina 1976)のデータが、第3表に与えられている。さらに流星雨軌道の理論値と観測値とのSouthworth and Hawkins(1963)のD-判定値も、これに含まれている。これによれば、輻射点の理論値と観測値は、良く一致している。

六分儀群の軌道と地球軌道とが交差する近傍における、双子座群と小犬群の観測から求められた、平均軌道によって定義される流星群の厚さは0.7AUである。地球軌道に沿うモデル化流星群の幅はおよそ0.12AUである。地球がその様な流星群の中を通過するのには、約7日かかるであろう(第3表)。その事は、双子座群や小犬群や六分儀群の活動期間に良く一致している。

双子座群の進化の多数の論文によれば、流星群の昇交点黄経の変化は、100年間にわたり、およそ -1.6° である。これに反して、流星雨の活動の極大日の後退は、観測されてはいない。この観測事実は、幾つかの論文の中で、正しく説明されている(Babadzhanov and Ubrubov 1982, 1983, 1984; Fox et al. 1982; Jones and Hawkes 1986)。この現象の理由は、黄道平面における流星群の断面が近日点黄経の変化の割合で、地球軌道に沿って移動するからである。双子座群の活動日の移動は全流星群の変動によって、定義されるであろう事を結論としたい。そのような変動の速度は、昇交点黄経の平均的な変化の割合によって決定される。この速度(例えば、現在のPhaetonの軌道に対して)は、100年間で約 -0.05° で、大変小さく、観測からこれを検出するのは困難である。Plavec(1950)は双子座群が観測される降交点での、動径の大変速い変化を指摘した。この事から研究を進めて、彼は1862年からの双子座群の観測が、流星群が地球の軌道に接近するようになった為に、可能になったと結論した。降交点の動径に沿った流星群の幅と、地球軌道に沿った幅とが、等しいと仮定して、多くの研究者(Plavec 1950; Babadzhanov

and Oubrov 1980; Hughes et al. 1980; Fox et al. 1983)が双子群が地球上で観測されるのは、200-300年間であろうと結論した。しかしながら、双子群の形成と進化のモデルは昇降交点の動径に沿った流星群の大きさが、地球軌道に沿った流星群の幅よりも、かなり超過している事を示している。それゆえに、双子群を認めることの出来る期間もまた、上記の議論された数値を超えているものと思われる。Jones and Hawkes(1986)は、流星群の進化の年数が 10^3 年を超える事を計算した。彼らの結果によれば、一般的な流星雨の視認期間は1000年を超える。集中部は100年間観測されるであろうとの事である。しかしながら、Jones and Hawkesは観測される流星群の幅の説明もなく、 10^4 年を超える流星群の進化を研究する事は必要であると結論している。

14個の火球の11世紀の観測は、明らかに双子群の観測期間を長いものとするのに適当なものである(Astapovic and Terentjeva 1968)。Fox and Williams (1985)とHunt et al.(1985)は、上述の火球は双子群には属さないであろうと結論した。しかし我々が、正に同時期の、即ち11世紀におけるPhaetonからの流星体の放出の可能性と火球の観測を考えると、彼らの結論が最終的なものでは有り得ない。実際、火球の元となる天体の放出は、数千年前に生じたものである。その様な天体の軌道要素はかなり大きく変化するであろうから、11世紀における地球との接近遭遇は、恐らくあったものと考えてもよいのではないか。

双子座群の進化の論文の論評を締めくくるにあたり、我々のモデルが定性的なものである事を注記する事にしよう。流星群の年齢と原因となる彗星の放射径は、任意にある範囲に選択された。さらに我々は、惑星摂動の影響を見積る為に、定性的な方法を用いた。流星群軌道のより小さい最初の分散とP-R効果の考慮は、流星群の形態を満たすのに必要な時間が、増加する事になるであろう。しかし、双子座群による4流星雨の生成の可能性に関して、我々の主張する結論は変わる事はない(Babadzhanov and Oubrov 1986)。

この論文より判かる事 (長谷川記)

○ 永年摂動 Type の群の場合、分布中(断面中)の増大は、主として個々の流星の $a(Q)$ の差によっておこる。

○ この論文のように、 V_{max} 値が仮りに大きくなるとしたと:

a が、1.7AU に近い場合: Plamec (1950) によれば、最悪 2世紀に Crem 群は消える。

a が、1AU に近い場合: 木星の摂動が 1.7AU の場合より減少する為、見られる期間は少くなる。

○ Crem 群の進化は、いわゆる流星群の進化の「基本型」に近い。

一言余計 → どうして、彗星の軌道のくせに、こんなに安定なんだ?

MSS-061

双子座流星群

Phaetonの摂動計算から...

(3) $C_1 = (1 - e^2) \cos^2 i = \text{const.}$

(4) $C_2 = e(0.4 - \sin^2 i \cdot \sin^2 \omega) = \text{const.}$

(5) $C_3 = \pi = \Omega + \omega = \text{const.}$

(3)~(5), (1)により地球軌道と交わる4個の流星雨の軌道が求まる。

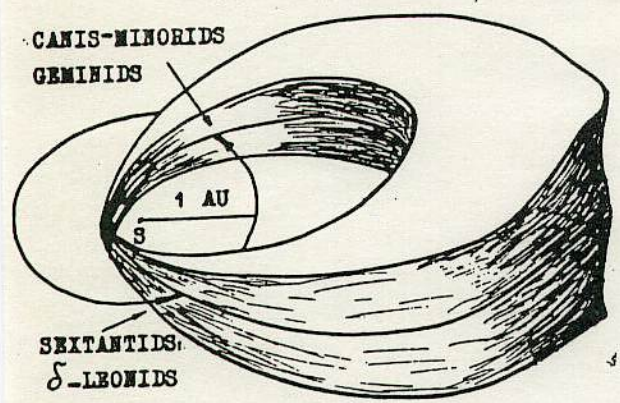


Fig. 2 Spatial shape of the Geminid stream model.

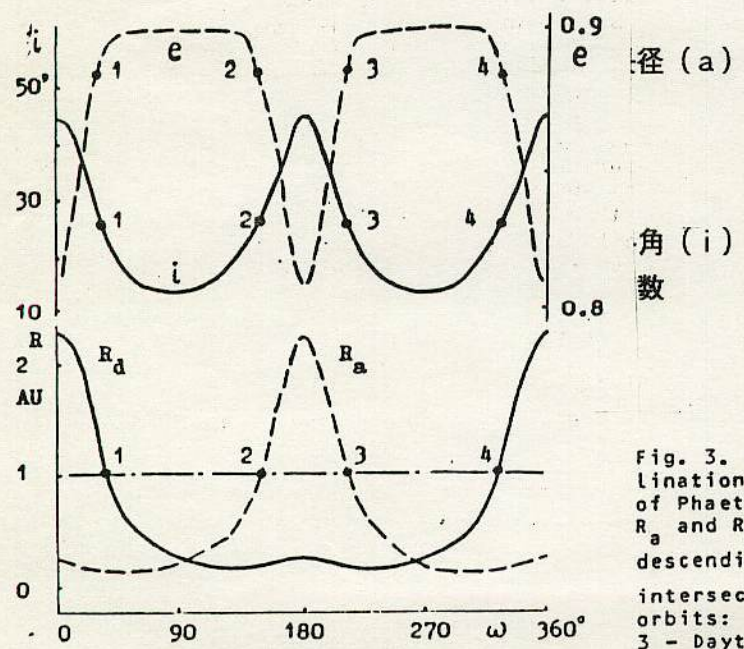


Fig. 3. The dependence of eccentricity, inclination and radii-vectors to orbital nodes of Phaethon orbit on perihelion argument. R_a and R_d radii-vectors to ascending and descending nodes. $R_a = R_d = 1$ AU correspond to intersection of the Phaethon's and Earth's orbits: 1 - δ Leonids, 2 - Canis-Minorids, 3 - Daytime Sextantids, 4 - Geminids.

MSS (1992/04/12)

ペルセウス座流星群の流星物質の受ける木星からの摂動作用について
長谷川 隆

要旨

1991年8月13日01時(JST)の増加を解明する手がかりを得るため、ペルセウス座流星群の流星物質が、1公転時、木星からどんな摂動作用を受けるのか、マイクロコンピュータにより、シミュレーションした。

結果として、別図のように、アルゴル型変光星の、光度曲線を思わせるおもしろい結果が、得られ始めたので報告する。

内容

1991年のPer群の一件にかんしては、前駆現象があったのかどうかについてさえ、いろいろ言われている段階であり、理論を立てるベースさえはっきりしていない段階であるが、ここでは、1991年が、出現的に、以前より飛び抜けていたということは、確かと仮定して出発する。

さて、その原因についてであるが、筆者は、パソコン通信のKPM_BBSを通じて、「木星の摂動作用により、帯の一部が進行方向に対して直角方向に湾曲して、芯により近い、流星密度の濃い部分が、地球に当たるようになった」という説がある、という噂を聞いている。湾曲した部分が近日点通過時間範囲で、1年位であり、1991年は、たまたまそういう部分を通ったとすれば、1991年だけ異常に増加した事実が、説明できるというわけである。

そこで、筆者が以前、ジャコビニ流星群や、しし座流星群の流星物質の受ける木星摂動作用を計算するために用いた、プログラムの、軌道要素の部分を書換え、Per群を、文献値の軌道に沿って、近日点通過日だけ200日間隔で、12年の範囲でばらつかせたときに、1回の公転で、どんな木星摂動作用を受けるか、コンピュータシミュレーションを、テスト的に行ってみた。

なお、ここでは試しに、降交点での動径の摂動量のみを計算した。

結果

流星物質の初期軌道にしても、木星の軌道にしても、近似的な計算であるため、定量的な議論ができるかどうかは不明であるが、木星と接近したと推定される流星物質のみ、近日点通過日範囲で、約1年弱の領域のみ、飛び抜けた、動径長さの変化を示す、おもしろい結果が、別図のように確認された。変光星アルゴルの変光曲線の形に、良くにている、主極小に当たる所で、1991年のような、異常挙動が、予想されるという事であろう。ちなみに、ピークの深さは、約0.015AU、1. 日位で、地球の公転する距離であるから、議論上無視できない距離ではなかろうか？

以上の結果から、次の2点を指摘したい。

1. 上にのべた、1991年の異常出現の理論が、正しいとすると、11ないし、12年の周期で、似たような現象が繰り返されていないと、論理的におかしい。1980年8月12日夜明けに見えた、増加は、

本当に1991年のそれとは無関係で、「単に、母彗星が帰ってきたから増えただけ」だったのだろうか？

2. デニングの言う、「ペルセ群11.7年周期出現説」とは、ひよっとしたら、このことではないのだろうか？ ピークの幅が1年より短い
ため、1968年は、タイミングの問題で、運悪く出なかったか何か
で、1968年の例だけで、この説を、否定してしまったと、流星観
測ガイドブックには、書いてあるが、いささか、はやとちりだったの
ではないか。

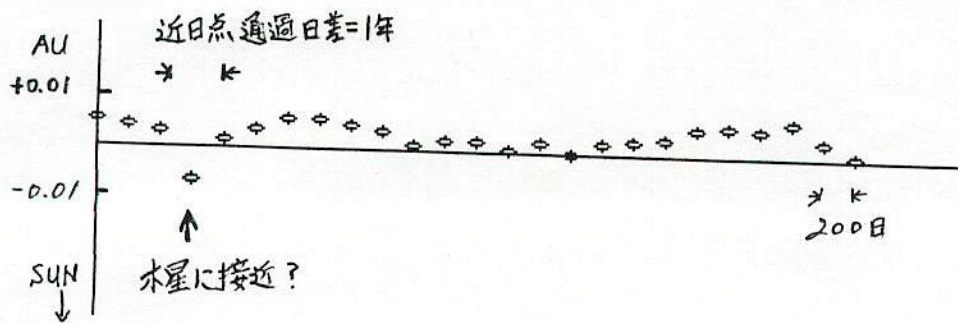
今後の展開

たまたま、初期軌道の選び方のせいで、このような結果がえられたのか
どうか、まず、確かめたい。

また、「ピーク」の部分の、近日点通過時間差のステップを、小さくし
て、ピークのより正確な形を確認する必要があると考える。

なお、この計算は、80387コプロセッサ付き、32ビットパソコン
で、quick-BASIC (コンパイラ) で、約150年演算し、約2時
間だった。パソコンを持っている流星研究者に、ぜひ追試を御願いたし
たい。 以上

HARDC 2a In File In 110
Ready



ペルセウス座 γ 群の一公転時、木星摂動による、
降交点軌径の摂動変化量 (1992.4.9)

MSS発表用 1992.07.05

ペルセウス座流星群の流星物質に働く大惑星の摂動作用(2)

長谷川 隆

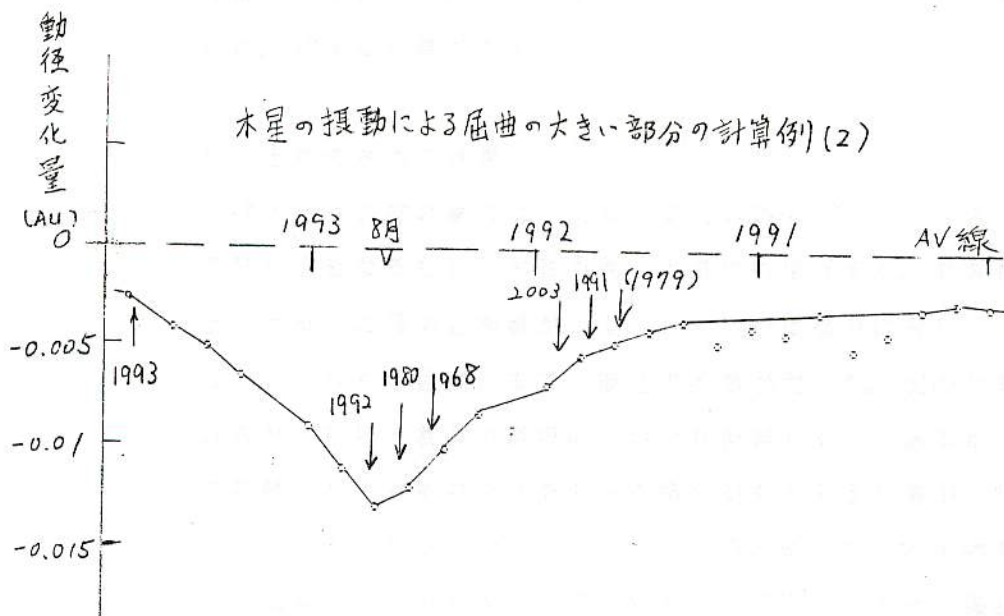
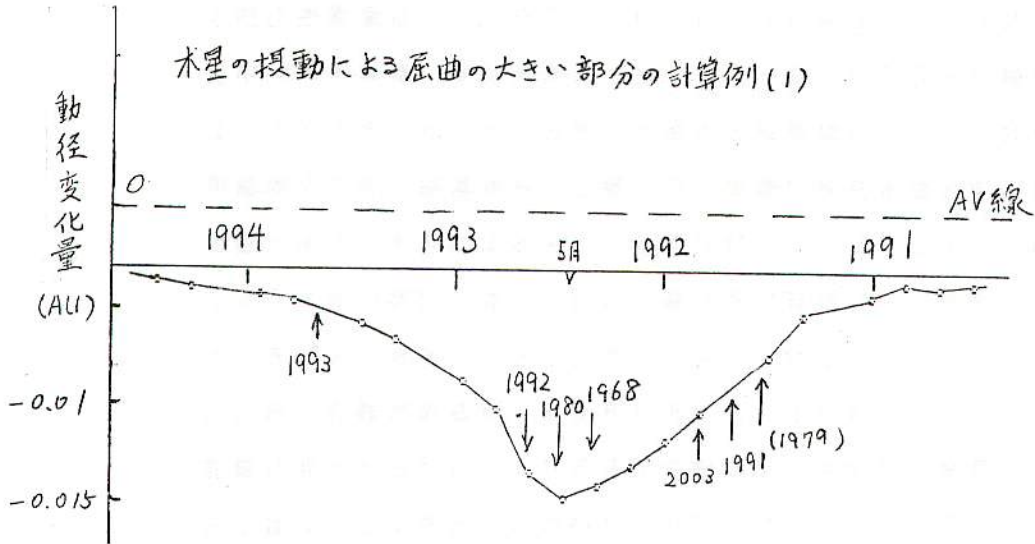
序

ぜんかいの発表にひき続き、ペルセウス群の流星物質が、太陽系空間内において、大惑星の引力を受け、軌道がどう変化するかを、コンピュータを用いて計算した。ただし計算は、前回同様ある初期軌道上に、等近日点通過時間間隔で、25個流星を並べ、1公転する間に、軌道がどう変化するかを計算する、というレベルのものである。

特に、今回は、土星の摂動および、近日点に通過する直前に、木星、土星に接近した流星物質の軌道変化を詳しく調べる作業をおこなった。なお、変化した軌道要素のうち、出現数や、極大時刻に、大きい影響があると考えられる、降交点での、動径長さの変化量、および、降交点の黄経の摂動量に、スポットをあて、それについて、議論した。

1. 木星に回帰直前接近した、1991-1992年出現流星の挙動

大惑星に、3.0AU程度以下にまで接近しない、「通常のペルセ群流星」動径摂動量は、主として木星の引力によるもので、 ± 0.003 AU程度である。(MSS前回発表) それに対しこの群は、近日点直前に、木星に最低1.5AUまで近づき、それにより、最大0.015AUほど、降交点での動径が、減少する。そこで、その「へこみ部分」の詳しい計算を、2通り初期軌動をふっておこなった。ただし、両者は、近日点因数が、数度程度違うだけの、微少な差である。「へこみの幅」は、これにより、1-1.5年程度変化し、極小点も、1992年5月から、同年



れている。ただし、濃密部分を固定するので、この部分が見える時には、いつも、15-6時間極大が早まり、その値が、1時間

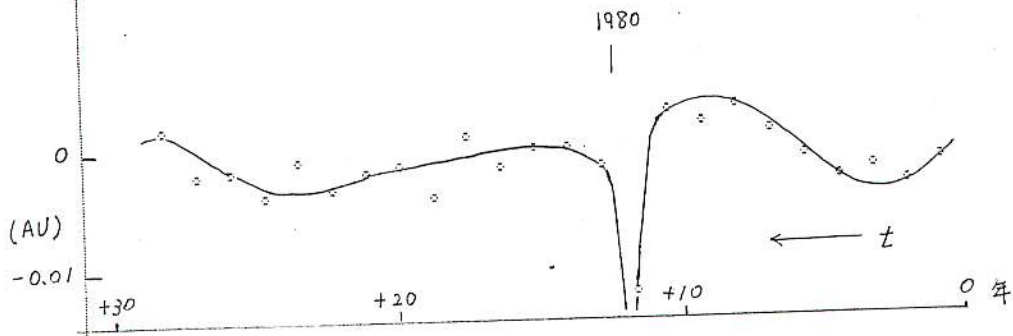
11月程度まで、バラついた。これにより、1991年8月中旬の動径摂動量は、 $0.005 - 0.01$ AU程度、1992年8月中旬のそれは、少し大きく、 $0.01 - 0.015$ AU程度になりそうであった。ところで、木星の公転周期が、11.862年程度のため、結果から、1周及び2周前の状況を推定する事が可能である。それによると、1980年や、1968年の条件と、1992年の状況とは、上記の不確定性の範囲で、一致すると見るべきだと、考えた。ところで、1980年は、12日明け方に大出現の記録があるが、1968年には、さしあたり、そうした記録は見あたらない。1968年の記録が、完全で、現象の見落としてはないとすると、このやり方が正しければ、1992年は大出現したり、しなかったりする、ギリギリの条件なのだ、と、結論するよりなさそうだ。なお、1991年が、むしろ摂動量としては、小さい事から、摂動が強いほど、大出現するとは、いちがいに、言えない事が判る。

2. 土星の重力の効果

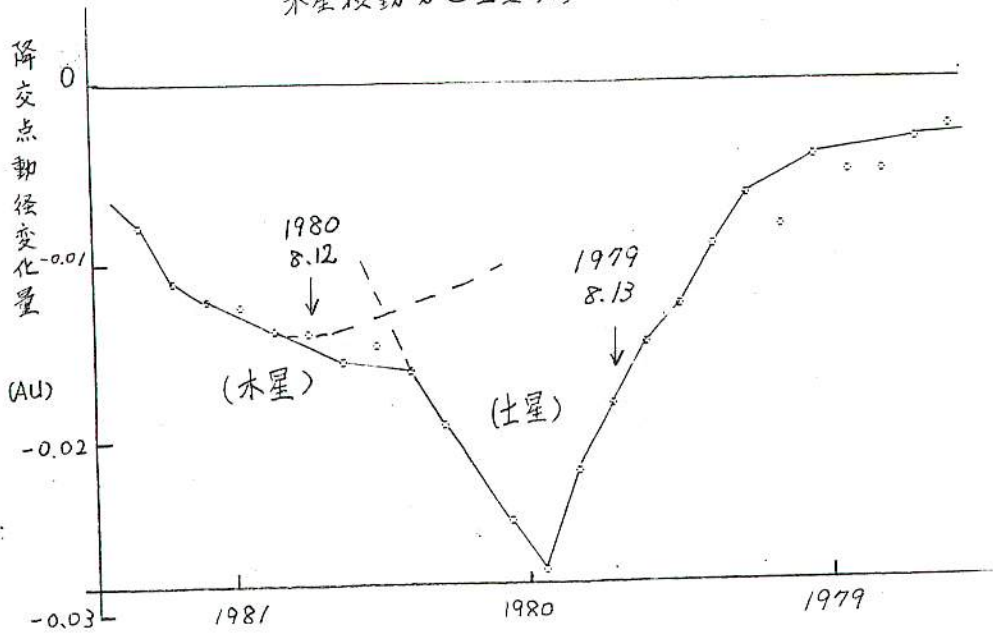
ペルセウス群の軌道は、土星のすこし外側 (12.7 AU) にて昇交点となるため、木星の他、土星にも接近する。計算によると、木星への最接近距離が、 1.5 AU程度なのに対し、土星へは、 0.6 AU程度にまで、接近する事が判った。実際計算してみると、初期の軌道の選択に、かなり影響しそうであるが、土星の摂動力が、木星のそれを上回る場合がありそうな事が、判った。

図は、1979年から1980年ころ回帰した、流星物質の動径変化量で、このとき、軌道への木星の接近と、土星の接近が、偶然、続けて起こるパターンになっていた事が判った。そのため、山が、2つできたのであるが、なんと、この場合は、土星による動径の減少量が、 0.03 AUと、木星のその2倍程度ある、という計算値が出た。この例では、1979年8月に降交点に来る流星物質が、極値付近となるため、木星だけの影響の場合の変

土星の摂動による降交点での動径変化の全体図



木星摂動力と土星摂動力の比較 (1979-80の例)



MSS-063

化量 (0.005 AU 程度) より、ずっと大きくなると予想される。おそらく、軌道を振っても、0.015 AU 程度にはなる事だろう。他方、この年、ペルセ群が、1980 年程度出現したという話も、さしあたり無い。

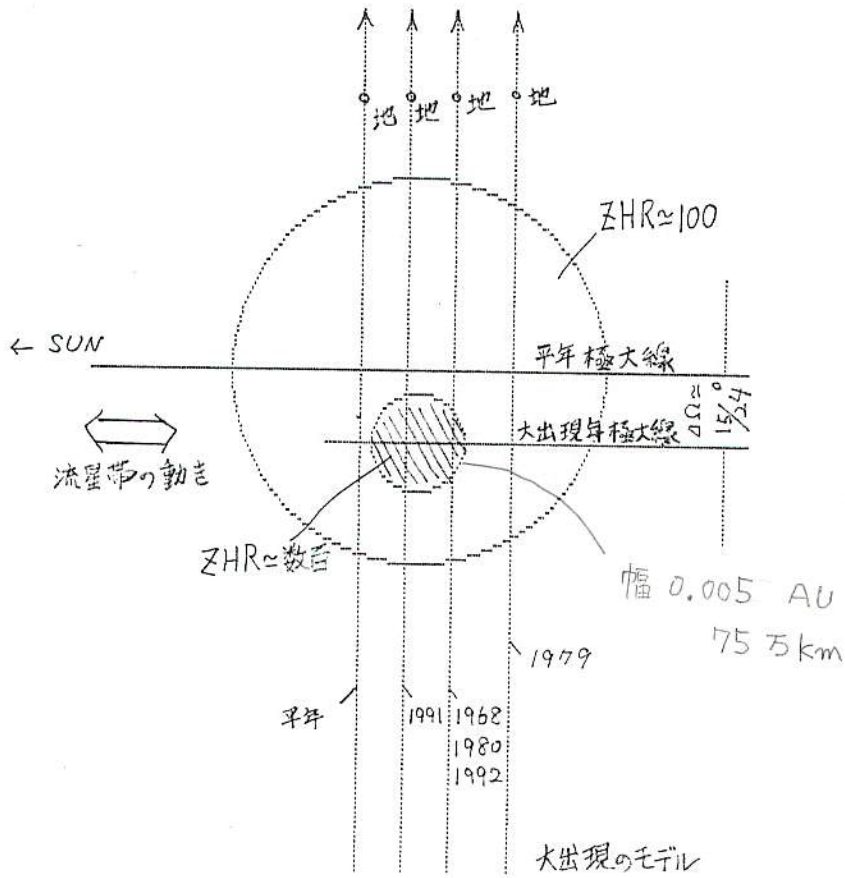
このことから、大出現が、動径の単純な変動と、比例せず、「ちょうど良い変化量」といった値がある事が、予想できる。そこで、ペルセウス群の大出現のモデルとして、次のようなイメージを描いてみた。

3. ペルセ群の大出現のモデル

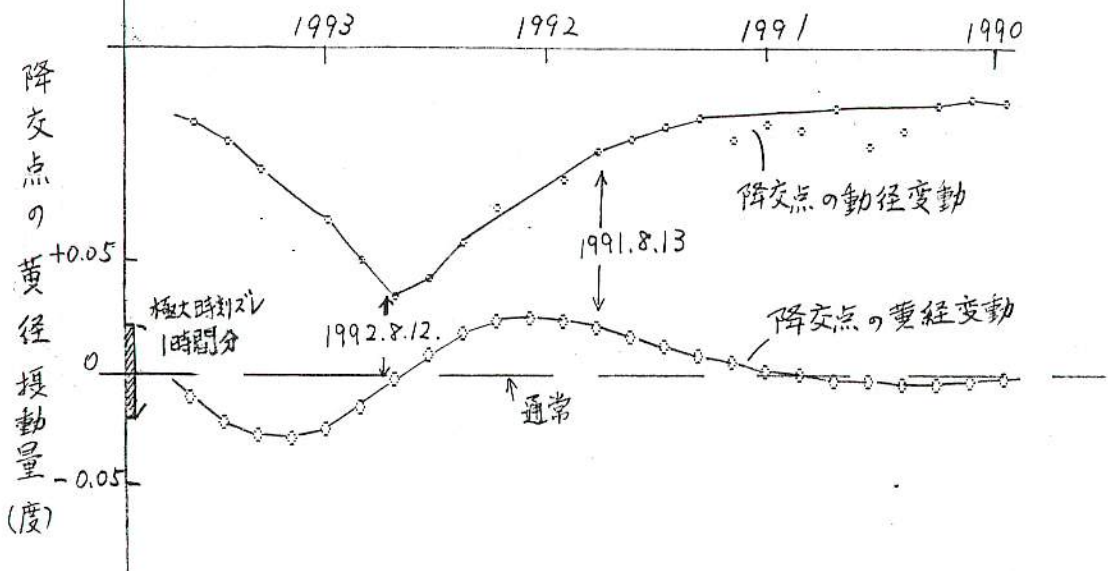
ペルセ群の大出現が、地球付近の流星密度の変化でなく、帯の摂動による「たわみ」により起こる事を示すモデルを、下記に示す。ZHR で、数百出現するゾーンは、ふだん地球の外にいただけでなく、ゾーン自体、かなり細いと予想される。そのため、動径摂動量が、0.010 AU を越えると、地球の内側にきて、かえって飛ばないと考えると、1979 年や、恐らく、1968 年の例が、説明できるのであろう。動径変化のピークの幅が、1 年以上ありそうなので、幅の狭さで、1968 年の挙動を説明するのは、どうも無理のようである。

次に、1992 年付近の場合について、地球の軌道に沿った方向への、「折れ曲がり」を、降交点の黄経の摂動量で、調べてみた。驚いた事に、動径とは直角方向への折れ曲がりには、1/20 度程度、極大時刻の変動になおして、1 時間強程度しかなかった。誤差が大きいかもしれないが、1991 年に、30 分遅くなり、1992 年 30 分早くなる。したがって、このままでは、実際の変動量である、十数時間をまったく説明できない。

ひとつの考えは、もともとふだんの極大より、黄経が、小さい所に、濃密部分があるとする事で、モデル図には、その事も示されている。ただし、濃密部分を固定するので、この部分が見える時には、いつも、15-6 時間極大が早まり、その値が、1 時間



木星の摂動による降交点の黄経の変化量計算例



程度の差で一致と予想される。もしかすると1980、1991年で、極大時刻の太陽黄経が、比較的一致するのは、このためかもしれない。上記差を考慮して、大出現があるとすれば、この考えからは、1992年の極大時刻が、12日06時(JST)と出るが、5時間程度の誤差で一致しないと、上記のモデルは、かなり不利となるだろう。

4. 古文書の記録との比較

古文書に書かれた流星雨の記録のうち、ペルセ群と言われる物と、木星、土星の回帰直前の摂動力による、と考える予想との、合致性を比較してみた。両者の場合とも、動径極小点の±1年以内の出現なら合致とみなした。結果は、木星と合致するもの、4割、土星と合致するもの2割で、計6割程度が、この考えで説明できた。完全とは言えないが、無関係というには、合致の割合が、多いように、思える。また、ペルセ群の場合、ふだんでも、ZHRで、100程度は、出現するから、全部の記録が、異常な増加を記述したものとは、みなせないのかもしれない。

また、近年の記録でいえば、1921年の増加は、1979年の、土星接近流星の、土星2公転前の分の影響と、考える事が、できそうである。(木星の5公転前でもある)

結論

本考察は、言うまでもなく、1992年のペルセ群の動向を占うことを、主眼におこなったものであったが、1968年の動向が、仮説とうまく合致しないため、出現するという、確実な証拠を得る事が、できなかった。

ただ、この説自体は、前回も指摘したように、デニングのペルセ群11.72年周期説を、自然に説明できる点、そして何よりも、1980年と、1991年の動向を一挙に説明できる点で、捨てがたいと、筆者は、感じている。

理論と実際との合致度

年	予想	実際	コメント
1968年	土	-	やや強すぎたか?
1979年	-	-	土星の影響で+が-
1980年	土	+	ぎりぎりか?
1991年	+	+	ちょうど良い曲がり
1992年	土	?	1968例あり不安

No.	YEAR	モクセイ コウテンスウ	ハンテイ カンレン	トセイ コウテンスウ	ハンテイ カンレン
1	36	163.94	モクセイ	66.00	トセイ
2	714	106.78	モクセイ	42.98	トセイ
3	830	97.00	モクセイ	39.05	カンレン
4	833	96.75		38.95	
5	835	96.58		38.88	
6	841	96.07	モクセイ	38.67	カンレン
7	924	89.08	モクセイ	35.86	カンレン
8	925	88.99	モクセイ	35.82	カンレン
9	926	88.91		35.79	
10	933	88.32		35.55	
11	989	83.60		33.65	
12	1007	82.08	モクセイ	33.04	カンレン
13	1042	79.13		31.85	
14	1451	44.65		17.97	トセイ

キシエン 1979-1980 ネン ノ コウテンツウカ(クウセツン ナラ 22.5%)

古文書記録との比較

母彗星から、軌道に沿って一様に広がるまでの、計算が無い点「折れ曲がった帯」が、もう1公転したとき、個々の流星物質の公転周期の差で、ZHR=100領域になってしまうと仮定するものの、それが、実際には確かめられていない点等、まだまだ未熟な理論の感を否定できないが、何か、現状の打つ手の無い状態を突破する、手がかりの断片でも含んでいたらと、祈りたいものである。

なお、シミュレーション作業を手伝ってくれた、筑波、VMテクノロジーの泉田正道氏に、深く感謝いたします。

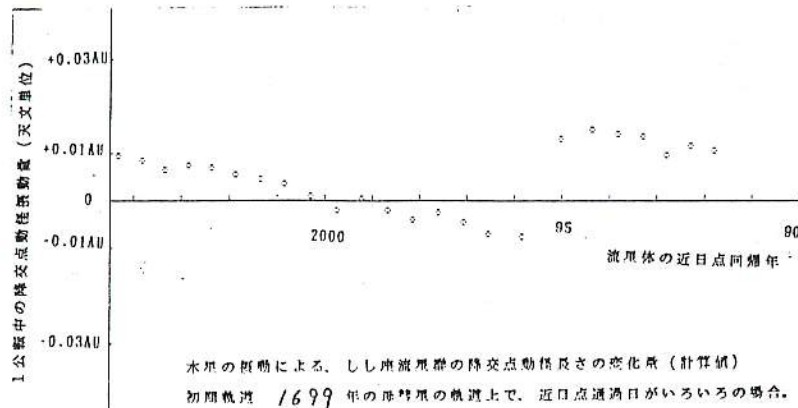
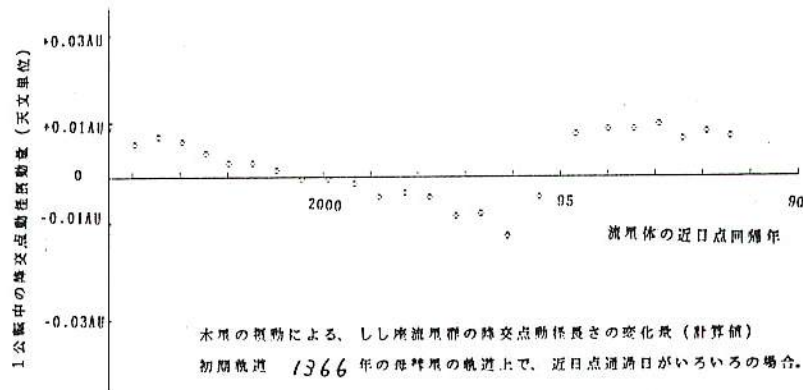
しし座流星群流星物質のシミュレーション (3)

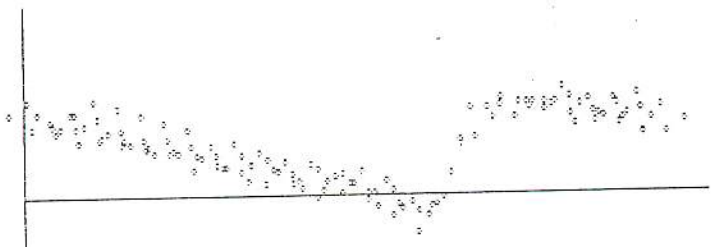
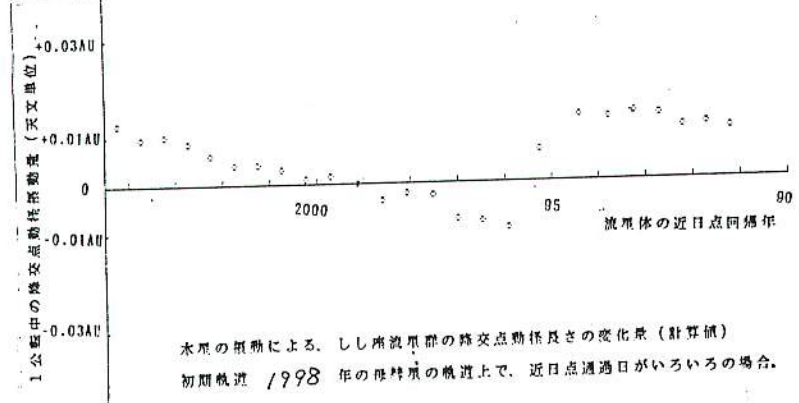
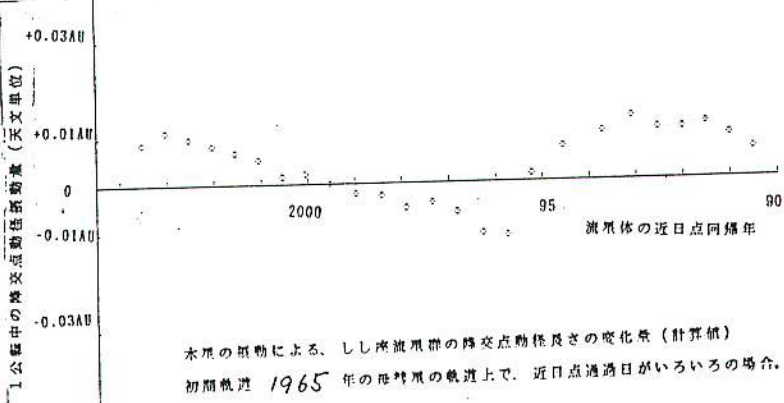
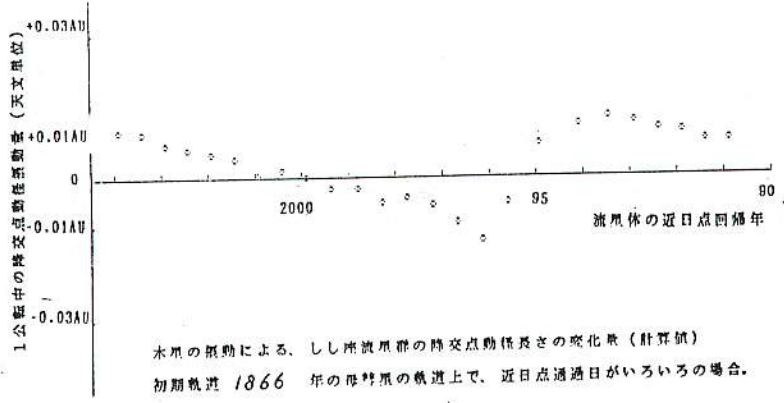
埼玉県 八潮市 長谷川 隆

前回のMSSでの発表要旨に引き続いて、しし群の流星物質の軌道計算を、パソコンにより行った。

まず、木星の摂動による、降交点における、動径変化の計算を、新たに、前回とは別の、3種の軌道（前回発表したとき用いた、母彗星の軌道より以前の母彗星の軌道）について、同様な計算をおこなった。

その結果、前回のべた傾向（波うちパターン）は、概ね、どの場合にも同様に起こる事が判明した。この場合、近日点に回帰する直前に受ける木星からの摂動の効果が大きいため、実際には、ほぼ摂動量の同一な流星が、揃って回帰する事も判った。（グラフ上の段）





また、次に、土星、天王星のしし群に対する影響が、検討された。

その結果、概略的には、次のような知見がえられた。

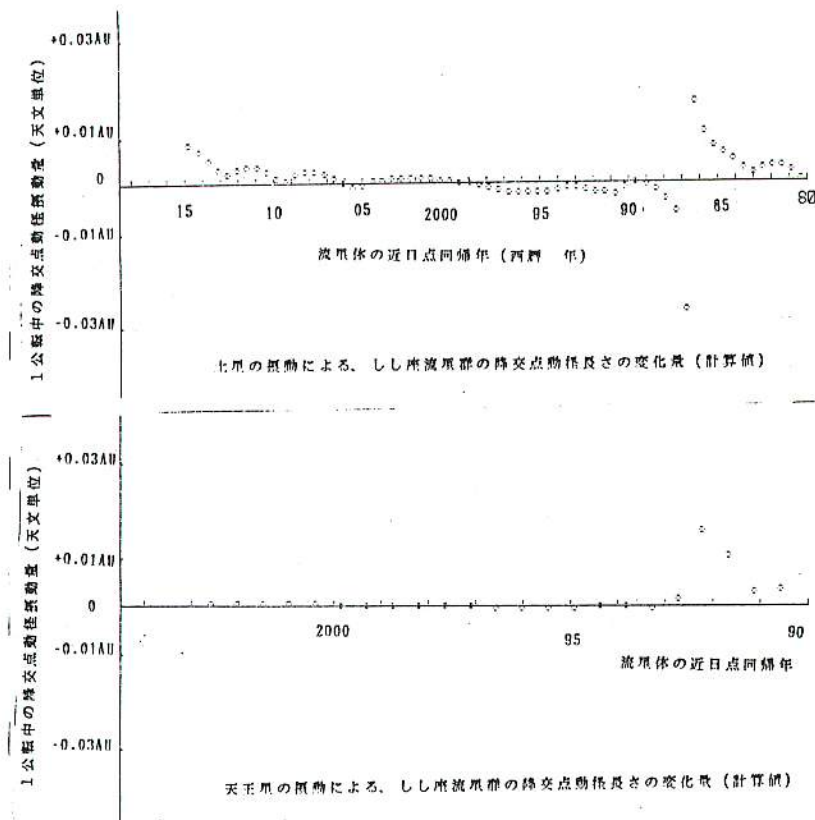
1. 土星の摂動による、降交点での動径変化曲線は、木星によるそれのパターンとは大きく異なり、シャープなカスプ型となる。幅は、1年オーダーとなり、きわめて狭い。その他の領域では、摂動の影響は、たいへん弱い。この結果は、1630年代のP-Eカーブの挙動を大変よく説明する。また、ヨーマンスの母彗星の軌道変化で、西暦1100年付近に見られる突出もこのためと考えられる。
いずれにしても、しし群における土星の影響は、Per群における、木星の摂動のパターンと良く似て、ひどく局所的なのである。
ただ、だからと言って、土星の影響は無視はできないのかもしれない。テンペル=タトル彗星の比較的外で、流星雨が、見えるようになったのは、1630年以來、摂動の為である、という考えも、否定できないように、思われる。
2. 土星の公転周期と、テンペル=タトルのそれとは、4年程度差がある為、最近も、流星の帯の一部に摂動を与えた事が、予想される。
1867年と、1900年の近日点通過のすこし前が、その時期に当たっているが、少し計算すると、前者は、3年後続部分、後者は、約1年先行部分に当り、比較的、密度の低い部分であったことが判った。前回は、うまく、土星の影響を逃れた可能性が、強いようである。
3. 天王星の摂動については、当初、無視し得るか、とも予想していたが、実際計算してみると、軌道が接近している物については、土星程度に強い事が判りおどろいた。しかし、天王星の公転周期

と、テンペル=タトルのそれとの間には、5:2の尺数関係があり、母彗星の回りに、大きな影響を及ぼす事は、最近はなかったようだ。しかしながら、彗星から、7年位先行する部分の流星物質の一部に、定常的に、かなりの量の摂動を与えている可能性がある。

そういえば、最近この群には、奇妙な分岐が見られる事が、長野の下田氏や、長谷川により指摘されており、ひょっとすると、彼らの見ているものは、天王星の引力の影響を受けた、流星物質なのかもしれない。この、考えが、正しければ、2-3年で、変化が見られるはずで、流星写真の絶好の研究材料となるだろう。

母彗星が、回帰したときだけ、写真を取ると言うのではなく、今のうちから、是非ねらっていただきたいものである。

以上



11月16/17日の Leo 流星群 (まとめ)

長谷川 隆

月・日	時刻(JST)	時間	全	Leo	放射点	方向	方法
1991年 11月16/17	02 ^h 30 ^m -03 ^h 00 ^m	30	1	0	6.0	2	Gen 70-/-
	03 ^h 00 ^m -04 ^h 00 ^m	60	4	2+1 ^(注)	6.0	4	Gen-Leo
	04 ^h 00 ^m -05 ^h 00 ^m	60	4	2	6.0	5	Gen-Leo
	05 ^h 00 ^m -05 ^h 15 ^m	15	1	0	5.0	5	Leo

注) Leoの放射点より西方に5°離れた点を通る流星で、

帰属不明。1990年、写真撮影。形状はLeoに似る。

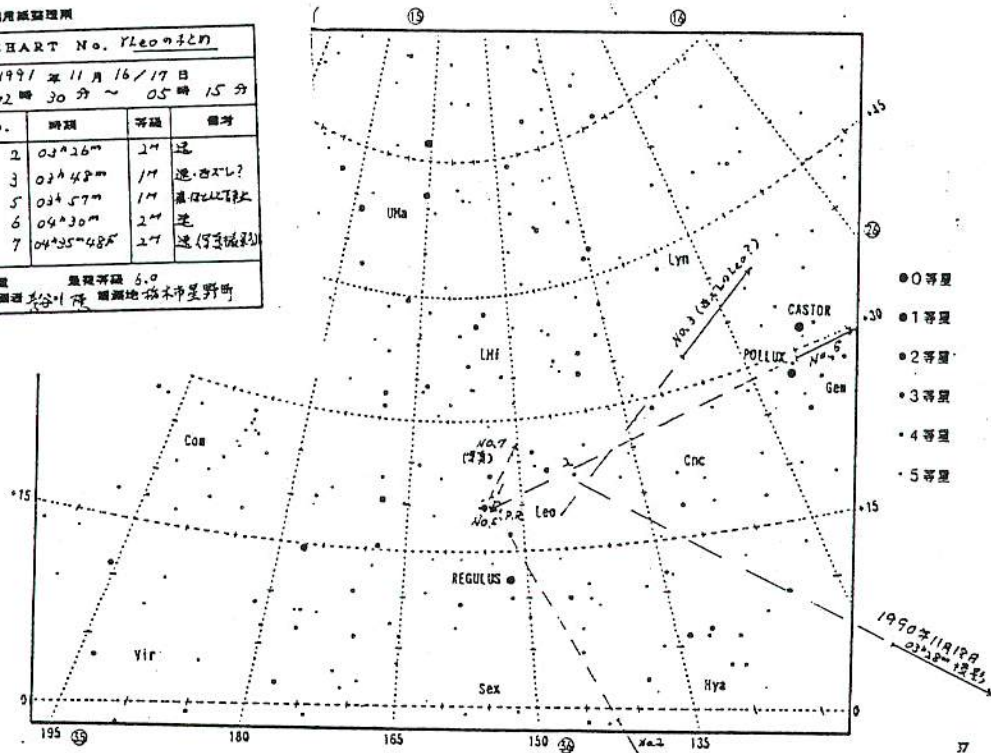
観測地

1) 栃木県栃木市星野町 東経139°37'5" 北緯36°28'

次に、早くも話題のLeo群については、16/17日明方観測できた。しかし、今年も別紙の通り、約3時間で、4個という結果だった。なお、昨年写真撮影された、放射点が西にずれた流星については、ことしも、それらしいのが見え、八王子の橋本氏によれば、長野で観測した下田力氏も、見ているという。

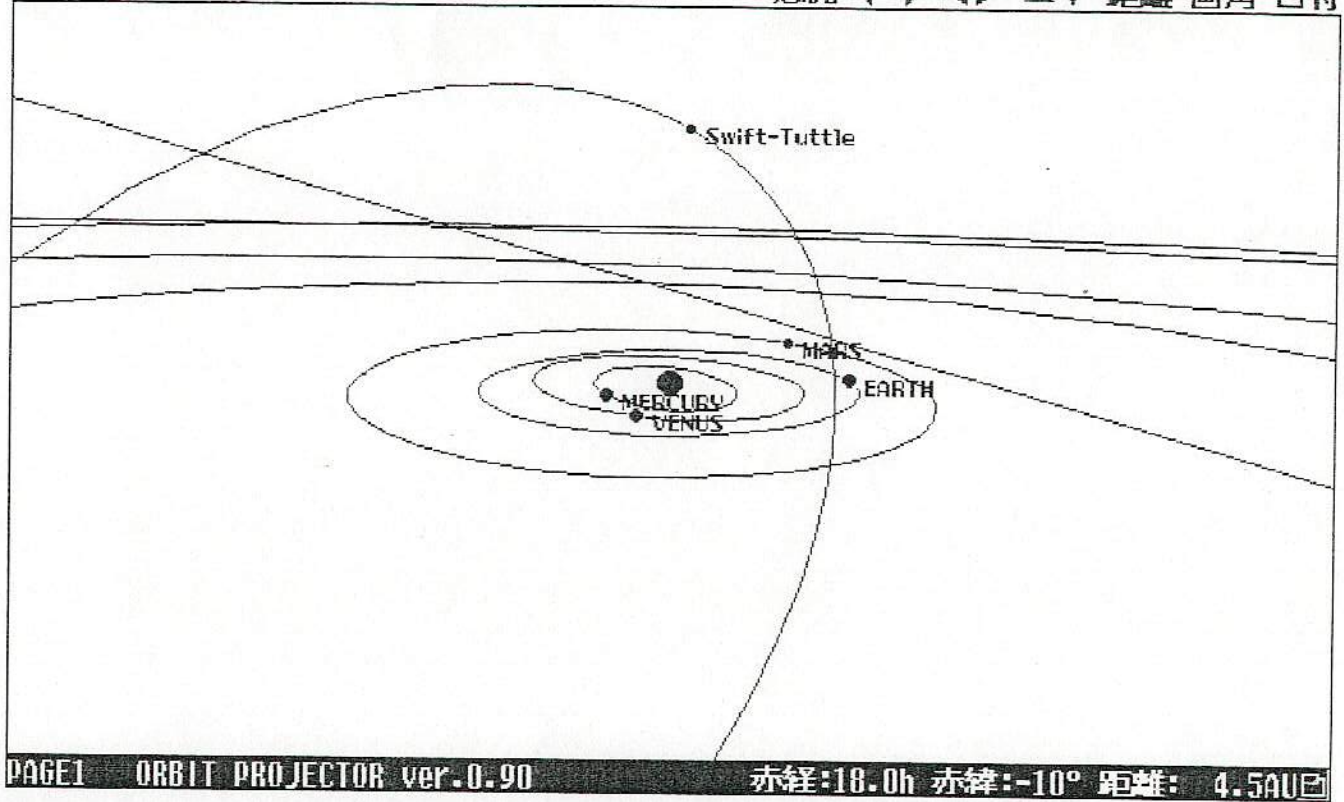
記録用測尺紙型印刷

CHART No. YLeoの記録			
1991年11月16/17日			
02時30分 ~ 05時15分			
No.	時刻	等級	備考
2	02 ^h 26 ^m	2 ⁺	速
3	02 ^h 48 ^m	1 ⁺	速、西ズレ?
5	02 ^h 57 ^m	1 ⁺	速、西ズレ?
6	04 ^h 30 ^m	2 ⁺	速
7	04 ^h 35 ^m ~48 ^m	2 ⁺	速、西ズレ?
雨量 5.0 観測者 長谷川隆 観測地 栃木市星野町			



1992年 9月30日

状態 ◀▶ ▶▶ ▲▼ 距離 画角 日付



MSS-65

1993年1月 MMS発表用

長谷川 隆 (埼玉県 八潮市)

表題 ペルセウス座流星群の流星物質の軌道計算 (3)

序

前々回、前回に引きつづいて、ペルセウス座流星群の、惑星摂動を考慮した、軌道計算を試みた。

前々回の結果から、例えば、ある近日点通過時に、同一軌道に、近日点通過日だけ違う軌道要素で、流星物質が並んでいる状態から出発しても、次の回帰時には、木星に、次の近日点通過直前に接近してから回帰した流星は、降交点での動径が、 $0.015A$ 程度もそこだけ減少するため、アルゴル型変光星の変光曲線を思わせる、奇妙に捻れたカーブになるという結果が得られた。

また、前回は、惑星摂動を大きく受けた部分の計算を重点的に行い、「主極小」に当たる幅が、半値幅で、2年には満たない事、実在のペルセでは、木星の摂動を強く受けた流星が、1992年春頃を中心に、降交点を通過した事、「主極小」の途中で、地球の a に近くなるため、その時だけ流星雨が見えたと考えられる事を指摘した。

さらに、前回は、土星の近くを通過した流星物質についても計算し、木星よりむしろ、降交点における、動径変化量は、 $0.025A$ 程度と大きい事、また、1862年や、1980年付近では、木星、土星ダブルの接近が起こり、軌道の変化量がたいへん大きくなるとともに、現象を複雑化させている事をも示唆した。

ただし、前回までの計算では、「初期条件」として、近日点通過日以外は軌道要素の等しい流星を仮定し、母彗星から放出された時点まで、進化の過程を遡っていない事、また、できた、「アルゴル型の模様」が、もう1公転で、拡散消失しないと話が合わないのだが、証明されていない点等明かな未完結性があった。

その後、よく知られるように、話は急展開し、1992年9月26日にスィフト=タトルと見られる彗星が、検出され、12月には、近日点を通過した。

その結果として、「謎の部分」そのものに、大逆転が起こり、(1)-(2)での時点の、「1991-1992年の出現の謎」が、「謎でなくなる」代わりに、「1980年の回帰によるとみられた大出現」が、「謎」になってしまった。

ともあれ、その結果として、母彗星の軌道が、以前より格段に正確に確定されたため、その結果をも使用し、上記の問題に今回は迫ってみる事にした。

なお、実際した計算は、前回のパターンで、2公転させてみる計算、(ただし、1公転目の摂動は、木星+土星のパターンを想定した) および、文献(1)値程度で、流星物質を核より放出させ、実軌道に近いとみられる条件で、1480年代より、1990年代まで、4公転させてみるという計算の2種類である。

なお、計算はカウエル法をやめ、文献(2)より、「手順が短潔なため精度の見通しがたてやすく、しかも実際良好」と言われる、ナイストレム法を使用し、前回同様、数値演算用のコプロセッサ(I80387)つきの、マイコンで、BASICでプログラムを組み、降交点での、動径長さの変化量を調べてみるという方法によった。なお、スィフト=タトル彗星

が、1737年の回帰時、だいたいケーグラー彗星になるように、初期軌道は、自分で微調整してある。2公転計算の場合は、公転周期の多少の伸び縮み程度の軌道要素の誤差なら、以下の結果には、ほとんど影響ないと考えられるが、4公転計算の場合は、もし、近い将来にスイフト=タトル彗星が、ケーグラー彗星でなく1年程度18世紀の回帰に誤差があると、以下の結果に少しきいてくる可能性があるため、その程度の精度が、実際必要であろうと、結果より、筆者は予想している。

なお、さしもの32ヒットマイコンでも、4公転(20個ずつ放出の、最終公転で80体、惑星、木星と土星)では、17時間もかかり、また、種々の精度から考えると、それ以上の計算をするには、コンピュータ的に、より、速度の速いものが、必要であるばかりでなく、軌道計算の技術的にも、ソフト的にも、一般書籍を参照する程度の今より、裕段に高度化する必要ありとの印象を受け、手持ちの技術の限界に近い計算を今回は行ったのだ、と筆者は確信した。

1. 1737年より、2公転させたときの、軌道の挙動

図1に、1737年に、流星物質を母彗星の(近日点通過時刻差で)前後Max、プラスマイナス2年になるように、他の軌道要素は変えずに、出発し、2公転後の今回の回帰時、どんな分布に変化するのかを計算した結果を示す。流星物質の数は、40個とした。

深い、J時形の、幅7-8年程度の切れ込みは、1862年の回帰の直前、系が、土星、木星にあいついで接近し、2年強のV字形の切れ込みが生じた後、V字の左側の軌道半長径が、同じく摂動により、少し大きくなり、公転周期が長くなる結果として分布が、次の1周で、拡散したものである。他方、1991-2年の切れ込みは、前回発表したように、偶然今回の回帰の際も、近日点通過少し前に、木星に接近したために、できた、新たなへこみである。

「1公転で前の影響がなくなる」かどうかは、不明だが、軌道半長径に対する摂動により、「拡散」は、確かに起こっているようだ。そこで、次に、もう一つの問題「普段の極大時の出現数の数倍の密度の細い帯」の形成について、計算を行った。

2. 1480年代より、近日点通過毎に、MAX、10m/sで、流星物質を放出させたときの分布

上の計算は、初期軌道が、Tを除いて等しい場合の計算であったが、ここでは、近日点通過毎に、20個ずつ、流星物質を核からいろいろな速度で放出させ、分布を調べた。ただし、初速度の上限は、10m/secとし、ベクトルは、進行方向のみ、余分な速度成分が加わる場合のみを考えた。計算は、1480年代より開始し、今回の回帰で、最大4公転まで計算した。初期母彗星軌道は、1737年が近日点通過となり、1992年の回帰時、Tで、2カ月程度の軌道誤差で、実際に一致するように、微調整した。非重力項は、無視した。精度的にこれを考えなければならないほど、完全に調整することは、トライアンドエラーでやったため、できなかった。

計算結果を図2に示す。

「軌道にそっての、濃い長い帯」は、残念ながら再現せず、長く見積って、Tで20年位の範囲でしか、「ZHR数百の帯」は、現れなかった。

なお、この計算では、1862年に、母彗星そのものが、Pが増加する摂動を受けるため、「實際上」今回の回帰では、母彗星の後方にこうした帯はなく、-20年まで、前方に帯が伸びているようであった。

なお、帯の実際の降交点位置動径からみて、土星の摂動も加わり、0.025AU位減少した、1979-1980年の所で、かろうじて、地球と接する程度に、外側にずれているという結果となった。1968年頃「大出現」しなかったのは、ぜんかいの発表のように、1968年の摂動が大きすぎたからでなく、全体として、木星だけの摂動ではとどかなかったからだと思われた。

ちなみに、そうすると、木星の摂動しかない、1991-1992年の場合が説明できないが、結果からみると、つぎのような事が起こっているようである。すなわち、1991-2年の所には、1862年に放出された、流星物質があり、この「別の濃い帯」は、もともと1862年の摂動で、降交点での動径が減少した母彗星から放出されているため、地球軌道と交差する位置にあるのである。1990-3年付近で、帯が、2段になっているのは、そのためである。すなわち、前回のべたモデルは、事実を単純化してのべたものであって、実際には、かなりこれより複雑な事が起こっていることが予想できる。

なお、この、古い方の「1480-1737年の帯」は、1862年直前の摂動でも、かろうじて、地球軌道にとどくまで、降交点における動径が減少する。図3は、図2の計算結果の途中経過を示したもので、1862年の回帰時の分布を示す。地球軌道との交差状態から見て、明かに、1861年と、1862年の「その時限りの」大出現が予想できるが、これは、古記録とよく一致する。また、摂動を受ける前の1737年の回帰時には、図は、省略するが、帯と、地球軌道の一一致は、よくない。ケーグラー彗星が回帰したときには、大出現しなかったと言われるのは、そのためだろう。

ただ、図3は、帯が拡散する前の経過であるため、いっそうはっきりと出ているが、前回までの前提であった、「長い」濃い帯は、再現されない。これは、1公転あたりの、帯の伸張率が、「数年/公転」なのに対し、数公転で、「惑星摂動による、拡散」が完了するため、高々、T差で、30年位までしか、帯ののびないためと解釈できる。従って、今回帰の場合で1980年や、1991-2年の大出現は大部分説明できても、1921年の出現等は、実際には、証明できなかったと解釈すべきであろう。

1980年の部分にしても、結果には1991年等と比して、実際には、数にさほど見劣りしなかったようなので、やや流星の密度が不足の印象がある。

母彗星の近傍の挙動については、かなり事実と合致するように見えるものの、初期コンセプトの当否としては、今回の一連の計算では、結局「再現失敗」と結論づけられたと考える。おそらく、考えなければならない条件がまだ、足りないであろう。

3. 考えられる不足の要因

上にのべたように、今の所問題点は、母彗星の回帰からずと離れた年に、ペルセの場合大出現する場合がある、という点である。例えば、1921年の出現については、母彗星が、遠日点の近くにいるのに、たくさん出たと言われる。この出現については、実際増えたのかどうか、観測者が少ないため、疑問との声もあるが、すべての「回帰以外の大出現」の古記

録を、間違いだとするのも、かなり困難と、筆者は考える。

上の論旨から明かなように、問題は、帯が延びる前に、摂動により、拡散させられてしまう点にある。

だから、これを回避する、一番簡単な方法は、放出速度の推定値が間違いだ、とする事である。実際今回計算した、文献値の4倍程度を仮定し、1公転で、長さ、近日点通過日差で24年程度にすれば、遠日点まで、帯は届くだろう。しかし、数的に、帰帰年並に、1921年に出現するように、できるかどうかは、よく分からない。また、母彗星より近点角位相が、半周以上異なるようになるまでの、時間が短くなるために、大出現成分以外の部分の流星数が、より増加してしまい、ペルセの推定年齢が、異常に短くなる可能性もある。また、文献値が、4倍も違っていなければならない理論的根拠もさじあたりない。

ひょっとすると、スイフト=タトルとペルセの系では、「重力運動をする彗星と、重力運動をする流星の系」と、とりあつかう事、自体がまずいのかもしれない。やっかいな、問題である。

といっても、流星物質の方に、太陽光圧の影響等を仮定しても、うまくいかないだろう。この力は、元々、作用が小さいし、加速的に、流星位置に影響するので、最初のうち、彗星から、大きく離れるような働きをしなければ、摂動の影響は、考感しない場合と似たりよったりになってしまうと、筆者は考える。従って、この場合は、たぶん役不足と思われる。

この問題に関しては、本発表の時点では、どうにも「歯がたたない」とするのが残念ながら正しいと、筆者は考える。

今後の方向性

1993年の出現動向を観測し、たぶん母彗星のそばなら、上の理論と合致するのではないかと期待して、理論をチェックする事が、必要であることはもちろんだろうが、今年のペルセの前に、この問題についての「山」は、もう一つ位は、あるのではないかと、筆者は予感する。

すなわち、今年の3月ごろ、実質1862年10月のケーブタウンでの母彗星の位置観測の、やりなおし観測というべきものが、当然、どこかの南半球の観測施設でおこなわれるであろう。「ケーブタウンの観測に誤差がある」との見方が、現在は有力であるらしいが、あるいは、母彗星の非重力効果についての、新たな発見があるかもしれない。昨9月26日の母彗星の発見が、この問題を飛躍的に進展させたように、このころの彗星の観測が、新たな進展をの引金になることに、期待したいと考える。

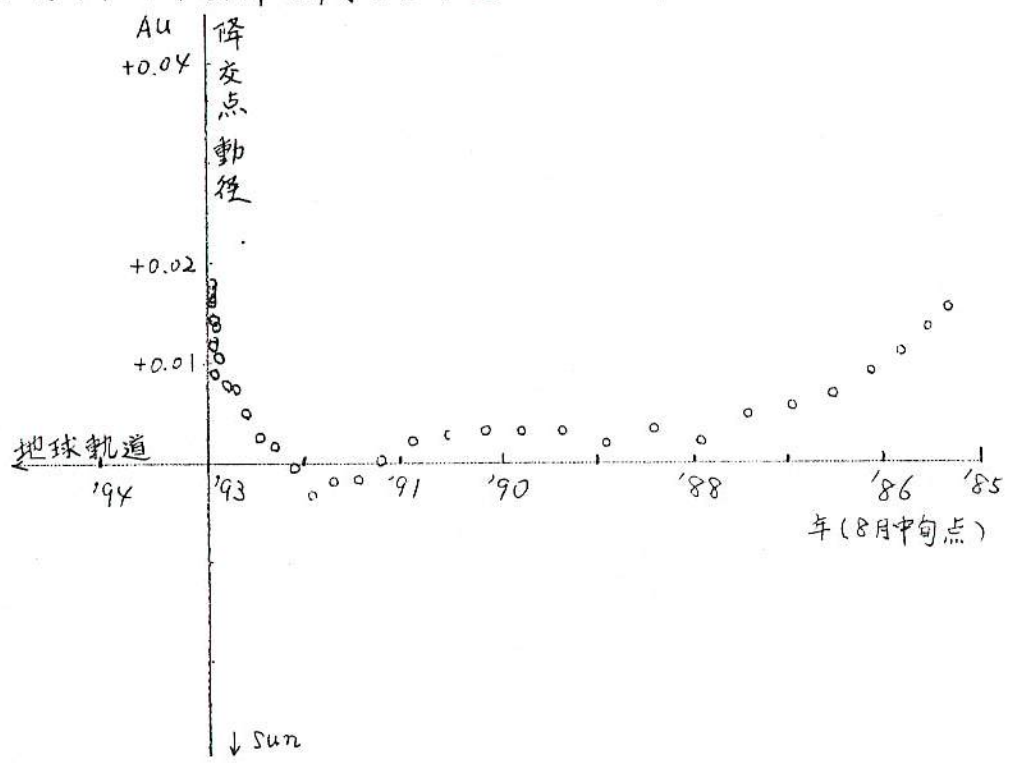
末尾ですが、今回も、計算機を提供し、いろいろと御助力いただきました筑波、VMテクノロジーの泉田正道さんに、深く感謝いたします。

以上

参考文献

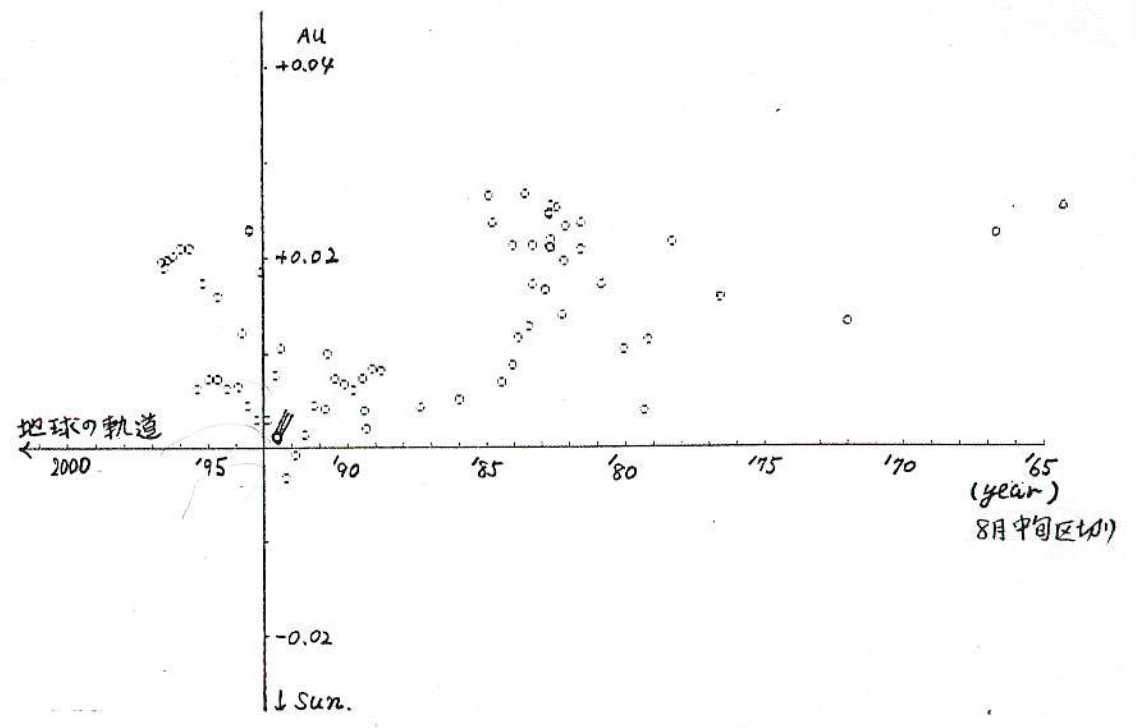
- (1) 流星 2 齊藤馨児、長沢工 編 恒星社
- (2) パソコンで見る天体の動き 長沢工 他 地人書館

図1. 1737年回帰時, 母彗星軌道とに $T = \pm 2$ 年で並んだ流星の2公転後の軌道

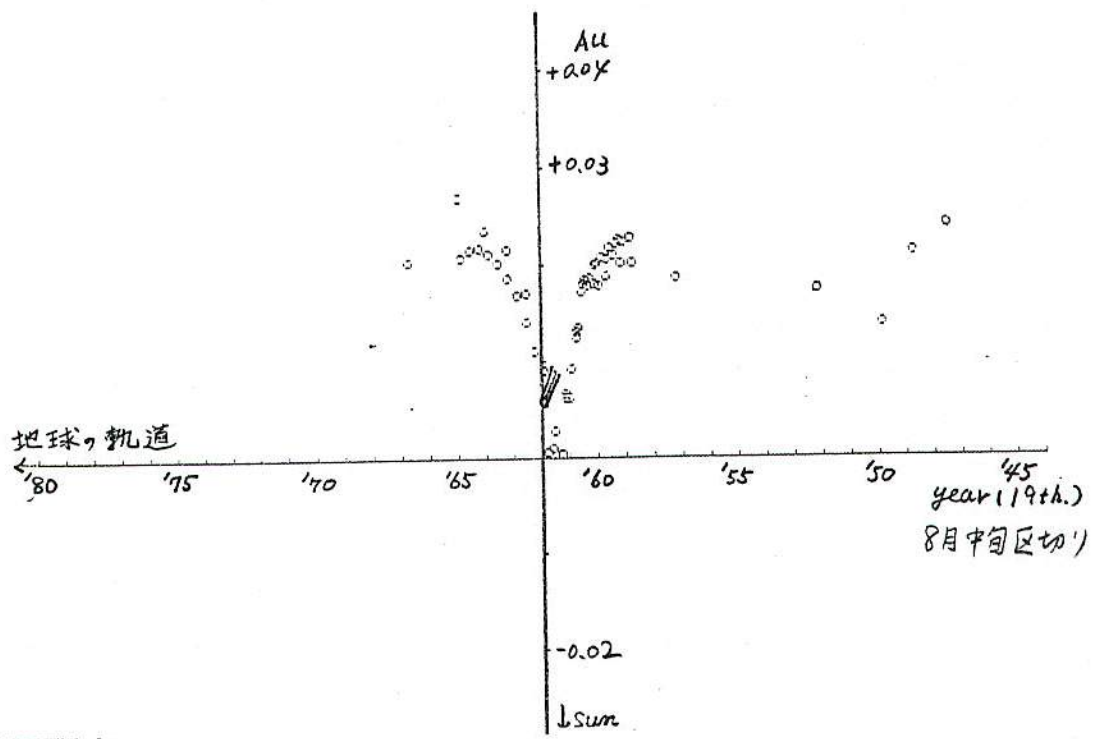


(図2)

Per群 1992年の分布 (1480年よ) 近日点通過毎放出 Max 10m/sec 初速)



(図3) Per群 1862年の分布 (1480年より、近日点通過毎放出 Max. 10m/sec初速)



前七級に 10 m/s 8 m/s 程度出す。

流星物理セミナー 1994年 4/10 発表用

表題：しし座流星群の流星物質の力学計算例

発表者 長谷川 隆 (埼玉県八潮市)

概要：テンペル=タトル彗星1998年回帰時の、しし座流星群の動向を推定するため、1699年より、近日点通過毎に、 10 m/sec 初速度以下で、放出させた、模擬流星物質の軌道計算を9公転分行った。

結果、

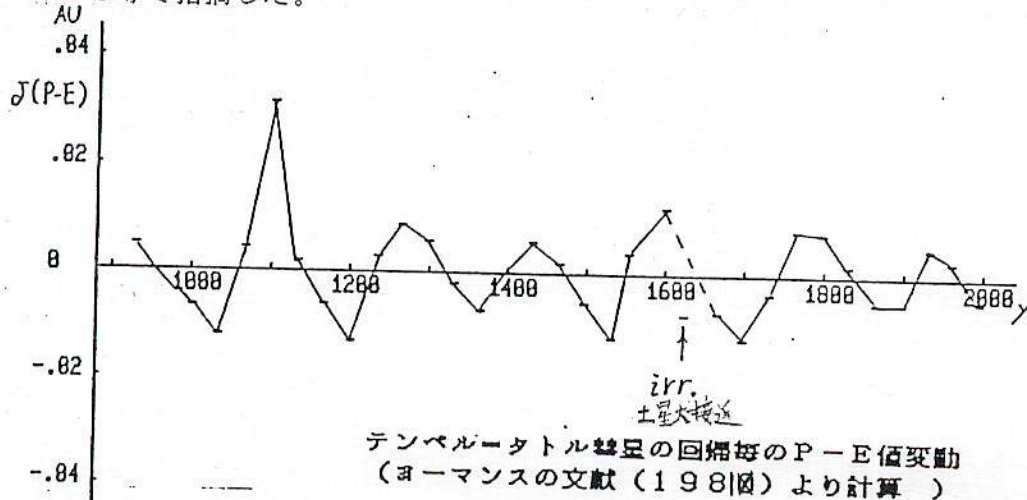
1. テンペル=タトル彗星と、地球軌道の交差の条件が、まあまあ似ていた1866年、1932年、1998年の各回帰の分布を比較したとき1932年の分布が、以前の推定どおり、他の2通りの場合と大いに異なる（内側に折れ曲がり、出現しにくい分布となる）。
2. 一般に、彗星軌道の後方、少し外側で、出現しやすいとされるのは、分布が安定している時期に、後方の流星ほど、降交点通過時における、動径が相対的に大きくなるような、摂動を木星によりあたえられるためであるらしい。

事が、判った。なお、計算は、太陽・木星・土星・流星物質の4体問題を、「パソコンで見る天体の動き」（地人書館・長沢工）のナイスドレム法で、行った。エプソンの中古のノートパソコン、PC-386ノートW（コプロセッサなし）で、クイックBASICのオブジェクトプログラムで、テスト粒子平均45個（10個ずつ増えて、最後の一回りのとき90個になる。）で、約9時間であった。

検討の経過と結果

従来、しし座流星群の出現パターンについては、ヨーマンス等の指摘する、テンペル=タトル彗星軌道と地球軌道との交差条件による、かなり著名な出現パターンの法則があり、それによると、現象的に、彗星の後方軌道上、あるいはその少し（概ね 0.010 AU 以内）外側で、流星雨になりやすいと、一般に言われているようである。しかし、その「法則」には種々の例外があり、特にわが国では、「1933年前後の回帰時の不発」が、その顕著な例として、印象強く伝承されている。（外国まで含めると、それでも、 $200-300\text{ 個/hr}$ 程度見えた所もあるらしい。）

ヨーマンスの論文でも指摘された「法則」の、こうした例外については、「空間流星物質分布の細部における、微妙な分布のむらの考慮不足」を指摘する声もあり、実際そうかもしれないのであるが、筆者らは、もともと回帰毎に、流星物質の分布形態が、惑星摂動が原因で大きく違うための可能性がある事を、以前のMSS等で指摘した。



ヨーマンスの論文にある、彗星軌道の降交点付近での動径の回帰毎の、印象的な周期的変動は、木星と母彗星とが、それらの軌道の交点を通過するタイミングのパターンによると推定され、1回帰で、テンペル=タトル彗星軌道上の小天体が、木星の摂動を受けて公転したとき、個々にどう軌道変化をするのかを検討したシミュレーションでもその解釈が正しい事は、確かめられている。そして、木星の公転周期が11.862年程度であるために、テンペル=タトル上の天体の受けるそれぞれの摂動量は、回帰年が2年も違えば、相当違うというのが、母彗星の軌道だけで見た場合同一条件でも、出現数の大きく異なることのある現象の原因とするのが、この考えの要旨であった。

その後、テンペル=タトル軌道上の天体に対する、土星や天王星の摂動についても調査が行われ、これらの惑星の摂動は、その質量の差のため、木星に比べれば、たまたま接近した天体を除いて、その影響は相対的に小さい事も判った。とくに、母彗星との近日点通過年の差が、5年以内から離れないものについては、天王星の影響は、当分は（永久に、ではない）この議論では無視できるようであった。

しかしながら、前回までの以上の考察では、流星雨の原因となる、2年程度母彗星の後方外側にある、流星物質の密集部分については、なぜそれがあるかはよくは判らず、もっぱら、あるとすれば、母彗星動径変化と同期しない奇妙な動き

をする、という事がわかっただけであった。

そこで、今回、この問題をも解くため、シミュレーションを多公転について行う事にした。パソコンの演算速度から、400-500年で数十個のテスト粒子の計算が限度である事は、ペルセウス座流星群のシミュレーション等で判っており、幸いヨーマンスの文献に、1699年の母彗星の軌道要素のデータがあったため、ここを起点に、西暦2000年までの9公転について計算を行った。

TABLE II
OSCULATING ORBITAL ELEMENTS FOR COMET TEMPEL-TUTTLE

Perihelion passage (ET) ^a	q (AU)	e	Period (yr)	Angular elements ^b			Epoch (ET) ^a
				ω	Ω	i	
1998 Feb. 28.0110	0.976539	0.905509	33.2	172.5238	234.5826	162.4915	1998 Mr. 8.0
1965 Apr. 30.0010	0.981656	0.904433	32.9	172.5795	234.4357	162.7106	1965 Apr. 30.0
1866 Jan. 11.6222	0.976558	0.906069	33.5	170.9179	232.5717	162.6945	1865 Dec. 30.0
* 1699 Oct. 10.9502	0.964017	0.908045	33.9	168.9295	230.0257	162.5574	1699 Oct. 1.0
1366 Oct. 18.5429	0.976232	0.906397	33.7	164.4977	224.7470	162.2429	1366 Oct. 19.0

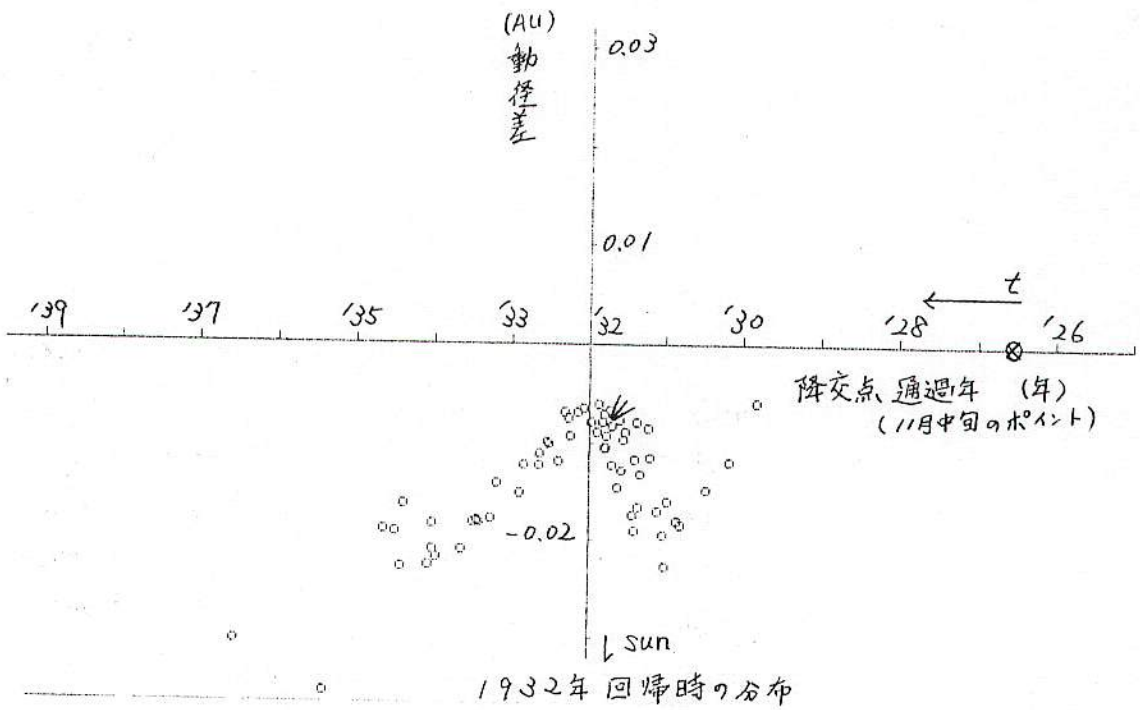
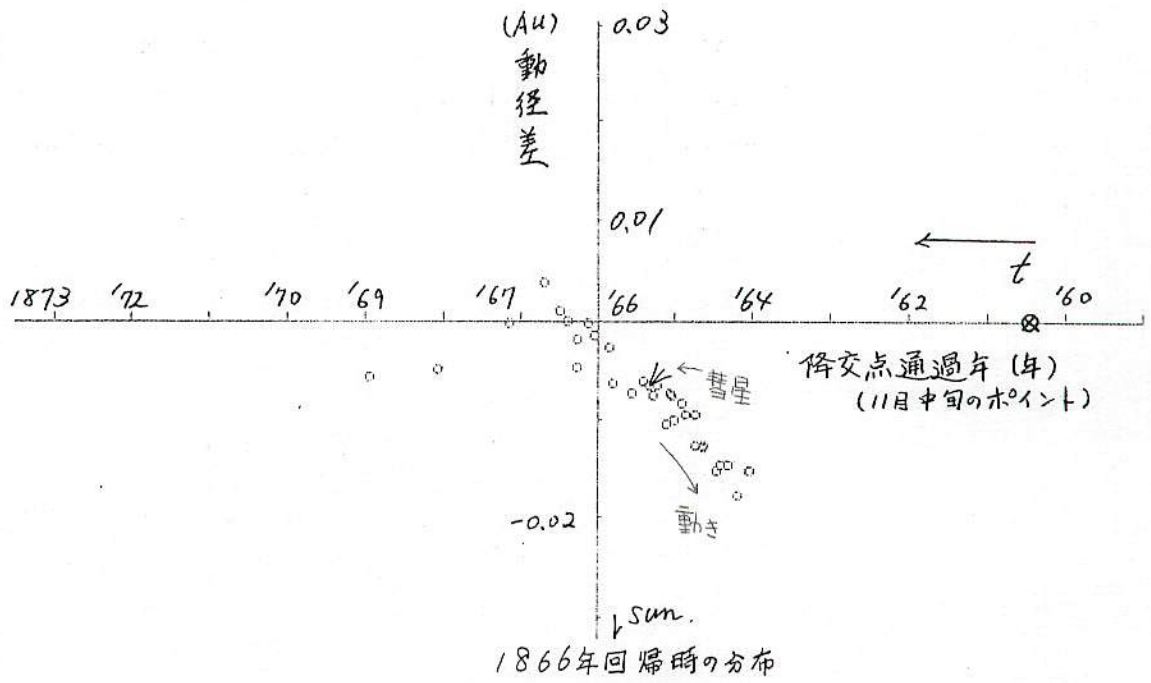
^a Julian calendar for 1366, Gregorian calendar for post-1582 dates.

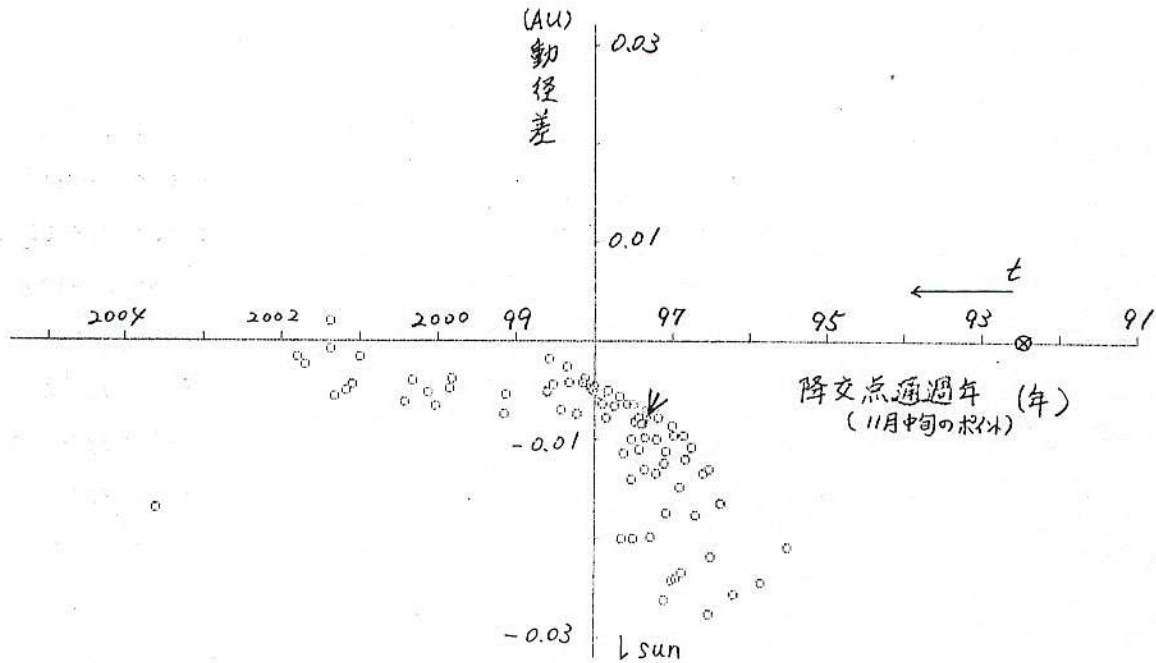
^b Angular elements are referred to the mean ecliptic and equinox of 1950.0.

なお、テスト粒子は、軌道に沿った方向に、ステップで2m/secづつ変えて、前後5個、合計で10個づつ、回帰毎に放出されるものとした。計算には、太陽・木星・土星の重力が考慮された（制限4体問題の集合体）

この条件で計算を行い、回帰時、降交点通過時の、動径と、通過日を、母彗星のそれに対して（前者は縦軸に、後者は横軸に）プロットし、流星物質の母彗星に対する相対分布図を、地球が0.007AU程度外側を通過した、1866、1932、1998年の回帰それぞれについて作製した。（図1参照）

流星物質の初期放出速度を最大10m/secにした点については、これしか計算結果がないため、確定的な事はいえないが、少なくとも、この初期速度の計算条件では、母彗星の後方0.007AU程度外側に、回帰より数公転前以降に





1998年回帰時の分布

放出された流星物質による、濃い密度領域が現れ、しかも、その帯は、回帰毎に、分布の形が著しく変化し、さらには、1933年前後と1866年前後の流星雨出現挙動の差を説明するために、筆者らが以前導入したアイデアと、概念上よく一致することが判った。(前者は、あまり外には張り出さない。)

回帰毎の、流星の帯の成長過程の観察から、帯が後方では外側に延びるのは、木星の摂動が弱い、母彗星が木星にあまり接近しない期間に限られ、かつ、その期間は、彗星軌道の各粒子が、先行するものほど、動径が相対的に小さくなる摂動を与えられつづけるためとみなすのが、妥当のようであった。(計算期間中、1866年から2回帰は、木星に接近する、このような条件を満たさない、カタストロフが起こるパターンだった。) この計算結果からは、分布も、出現するしないも、決めているのは大体木星のようであった。なお、次の回帰については、以前の考察通り、1866年型に似るという結論が得られた。図から察すると、1999年11月のしし座ガンマ群の極大日のころ、1時間に1000個程度の出現は、期待してよいようであるがどうでしょうか？

反省と今後の展開

計算条件が一通りであるし、テスト粒子の数も少ないため、このデータは、まだ、確実な結論を引き出し得るものとはいえない。

しし座流星群の流星雨は、せいぜい続いても数時間と考えられており、一度に見られる地域は、地球上の、数分の1程度に限られるようである。従って、仮に出現する事が判っても、地域が特定できなければ、流星雨をあてにした観測の準備をするのに、数倍の無駄な努力が必要ともいえるであろう。今後は、数の予想の理論を考察する事もさる事ながら、どこで見られるのか、本当に判らないのか？といったような考察へも進んで行きたいと考えます。

参考文献 1. パソコンで見る天体の動き 長沢工他 地人書館 1992年
 2. テンペル=タトル彗星としし群 ヨーマンス イカルス
 47巻, 492-499ページ 1981年

以上

流星物理セミナー 1997年 1/26 発表用

表題：四分儀座流星群の流星物質の力学計算

発表者 長谷川 隆（埼玉県八潮市）

概要：四分儀座流星群軌道上の流星物質が、十数公転で、どのような挙動を示すか軌道計算を試みた。

四分儀座流星群の軌道の挙動については、1987年の写真軌道の挙動との関連で研究例があり、このころ回帰した流星は、直前の木星摂動により、他の回帰年の流星物質のそれとは、違っているとされている。前にMSSでも、日高氏が計算結果を発表され、同様の結論を得ている。特に $P=5$ 年前後と仮定したとき、昇交点黄経が小さくなる等が、印象的であった。

未発表と思われるが、日高氏によれば、公転回数を上げると、一般には、摂動を何回も受けて、単純な挙動で説明できなくなるという。木星だけの制限3体問題での計算でも、一般には摂動を何回も受けて、挙動は、カオス化するためであろう。

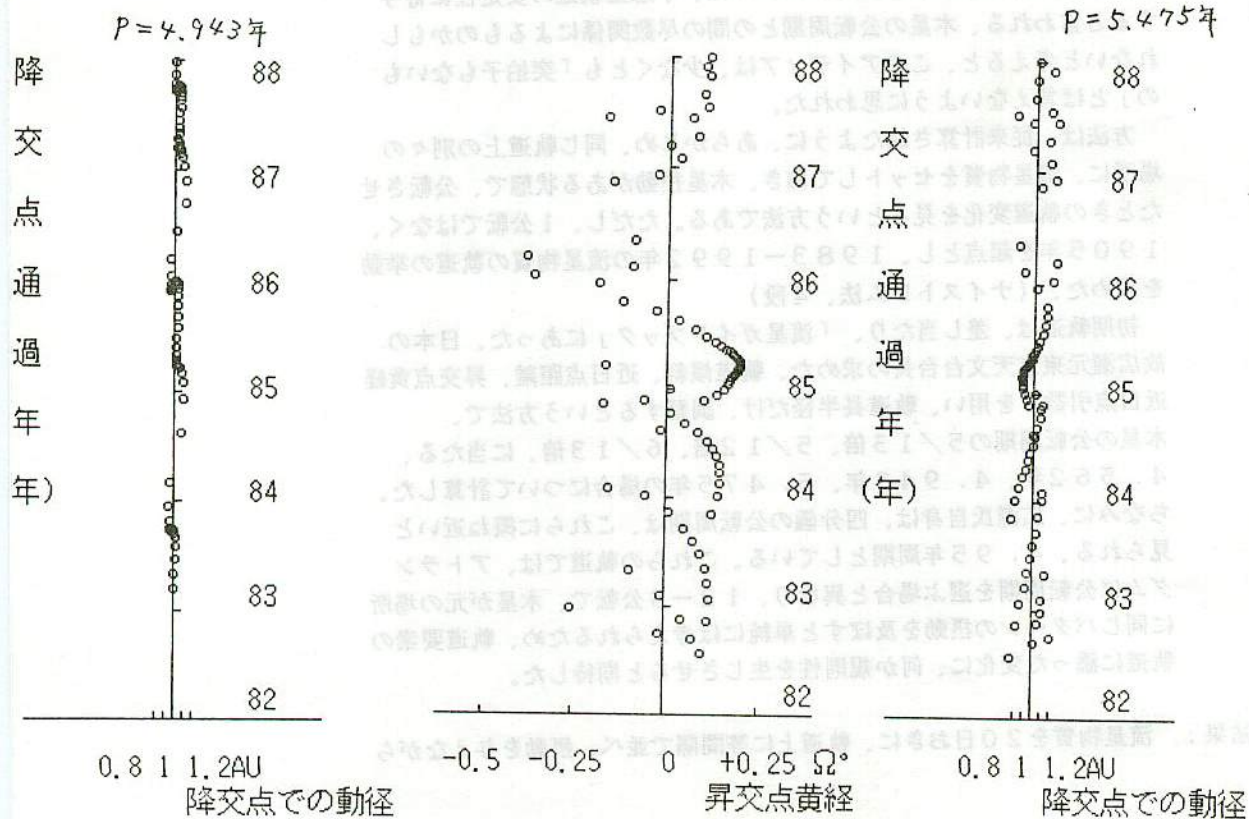
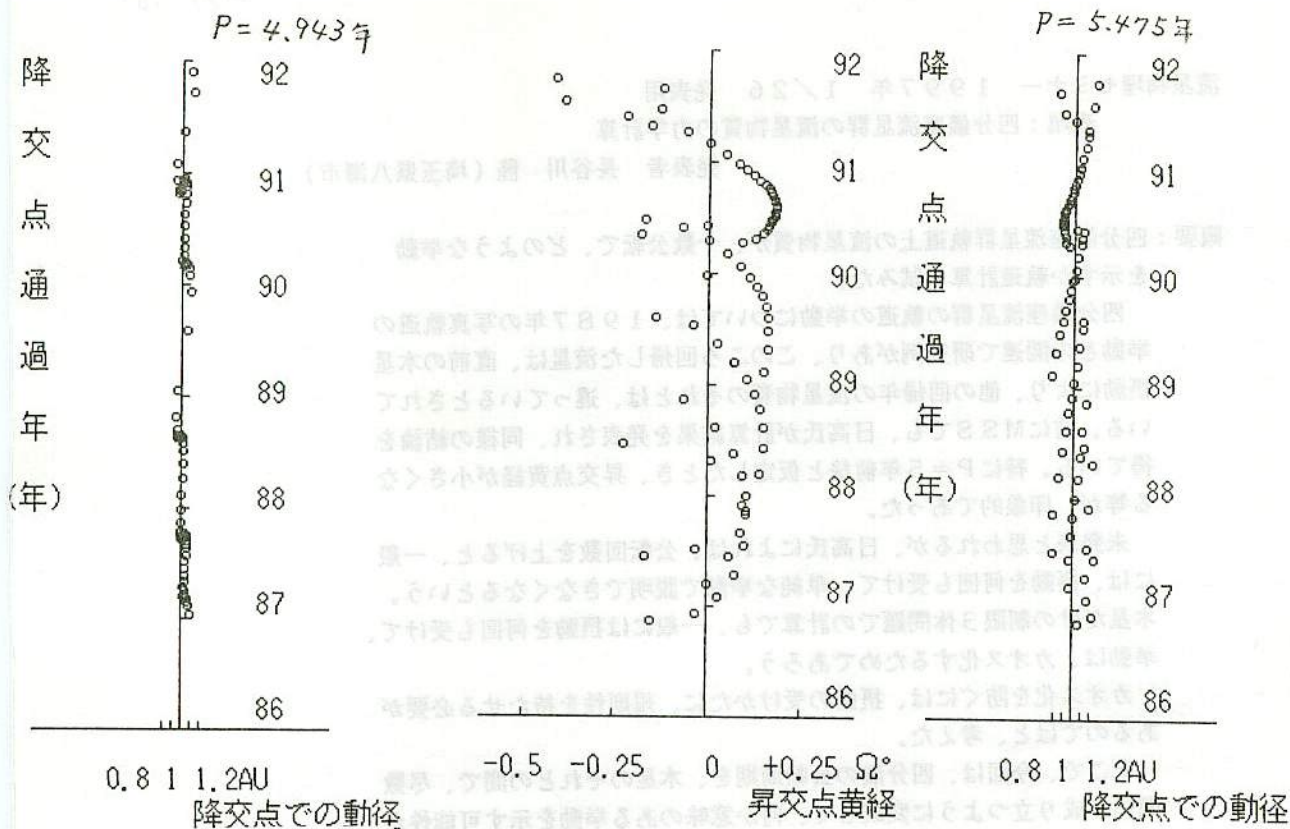
カオス化を防ぐには、摂動の受けかたに、規則性を持たせる必要があるのではと、考えた。

そこで、今回は、四分儀の公転周期を、木星のそれとの間で、尽数関係が成り立つように変成して、何か意味のある挙動を示す可能性がないかどうかを確かめる事にした。傾斜が大きいものの木星族の四分儀が、安定して180年見えているのは、小惑星軌道の安定性に寄与すると言われる、木星の公転周期との間の尽数関係によるものかもしれないと考えると、このアイディアは、少なくとも「突拍子もないもの」とは言えないように思われた。

方法は、従来計算されたように、あらかじめ、同じ軌道上の別々の場所に、流星物質をセットしておき、木星摂動がある状態で、公転させたときの軌道変化を見るという方法である。ただし、1公転ではなく、1905年を起点とし、1983-1992年の流星物質の軌道の挙動を求めた。（ナイストレム法、4段）

初期軌道は、差し当たり、「流星ガイドブック」にあった、日本の故広瀬元東京天文台台長の求めた、軌道傾斜、近日点距離、昇交点黄経近日点引数、を用い、軌道長半径だけ、調整するという方法で、木星の公転周期の $5/13$ 倍、 $5/12$ 倍、 $6/13$ 倍、に当たる、4.562年、4.943年、5.475年の場合について計算した。ちなみに、広瀬氏自身は、四分儀の公転周期は、これらに概ね近いと見られる、4.95年周期としている。これらの軌道では、アトランダムに公転周期を選ぶ場合と異なり、12-3公転で、木星が元の場所と同じパターンの摂動を及ぼすと単純には考えられるため、軌道要素の軌道に添った変化に、何か規則性を生じさせると期待した。

結果： 流星物質を20日おきに、軌道上に等間隔で並べ、摂動を与えながら



公転運動をさせた場合の軌道要素の挙動のうち、流星の出現時刻と、出現するかどうかを決める、「昇交点黄経」・「降交点における、動径」の挙動に注目した。表示は、1983年から1992年の間に帰ってくる流星のうち、動径が0.8-1.2AUのものについて行っている。

結果より、公転周期が5年以下の二つの場合と、5.47年の場合とで挙動に大きな差があり、木星にあまり近づかない前2者では、摂動による軌道変化量は比較的小さい。木星に回帰直前で近づく流星でも、 Ω の変化は、最高で極大時間の後退で数時間分程度である。また、数回公転すると、摂動の合計で相殺され、極大時刻早まりを引き起こすピーク構造は消失する。そのため、同時に軌道内には、極大の早まりの山が、2個程度できる。これらの挙動は、 $P=4.56$ 年でも、 $P=4.94$ 年でも同じだが、後者では、 P が軌道内で僅かに変化する事によると思われる、分布の「節」のような構造が現れた。

それについて、 $P=5.47$ 年の場合、回帰のタイミングによっては、木星に極めて接近するため、その場合の摂動が大きく、公転周期のばらつきがたいへん大きくなる。 Ω の変動は、それに比較すれば小さく、最大12時間程度である。そしてこの場合、降交点での動径は、0.4AU以上バラツキ、また場合によっては、群から離脱する流星物質さえあった。

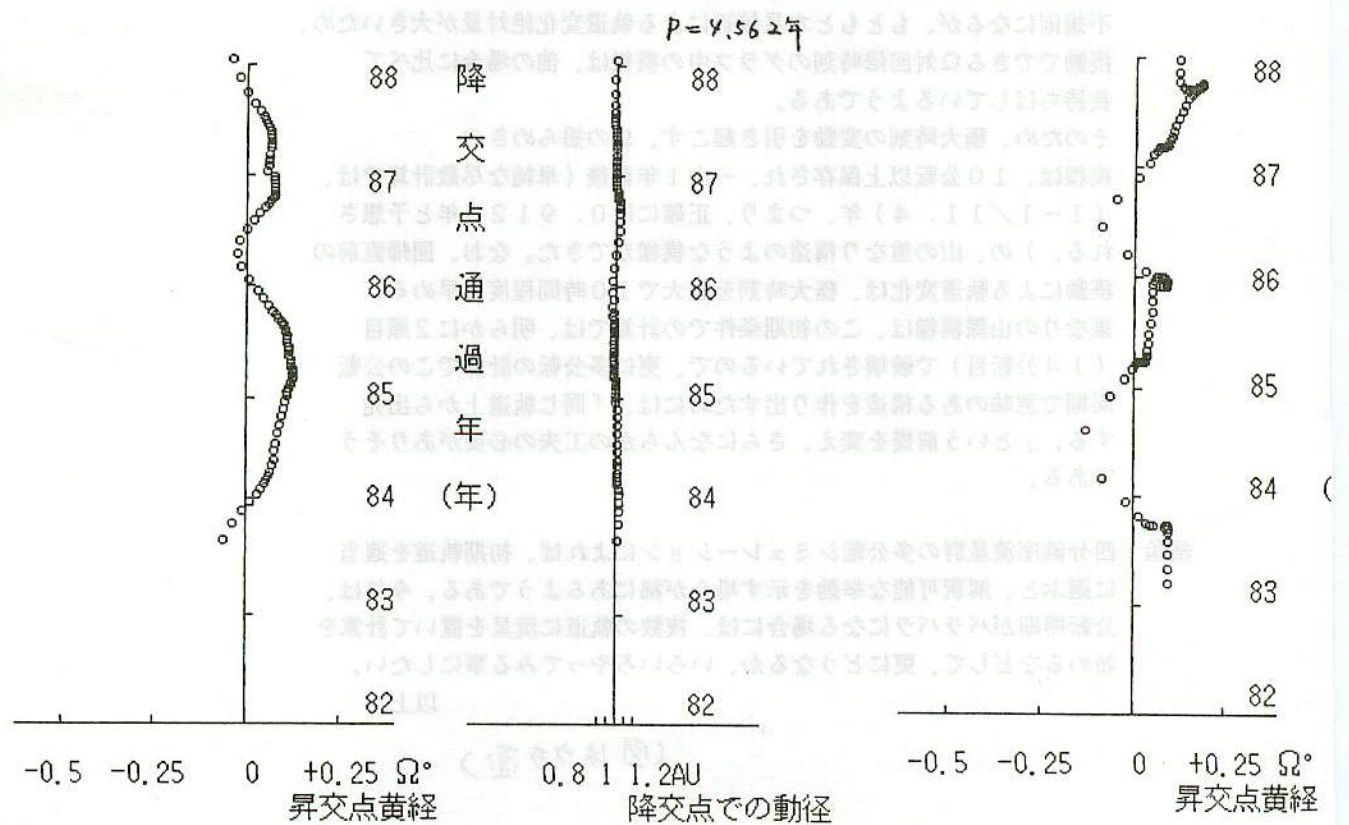
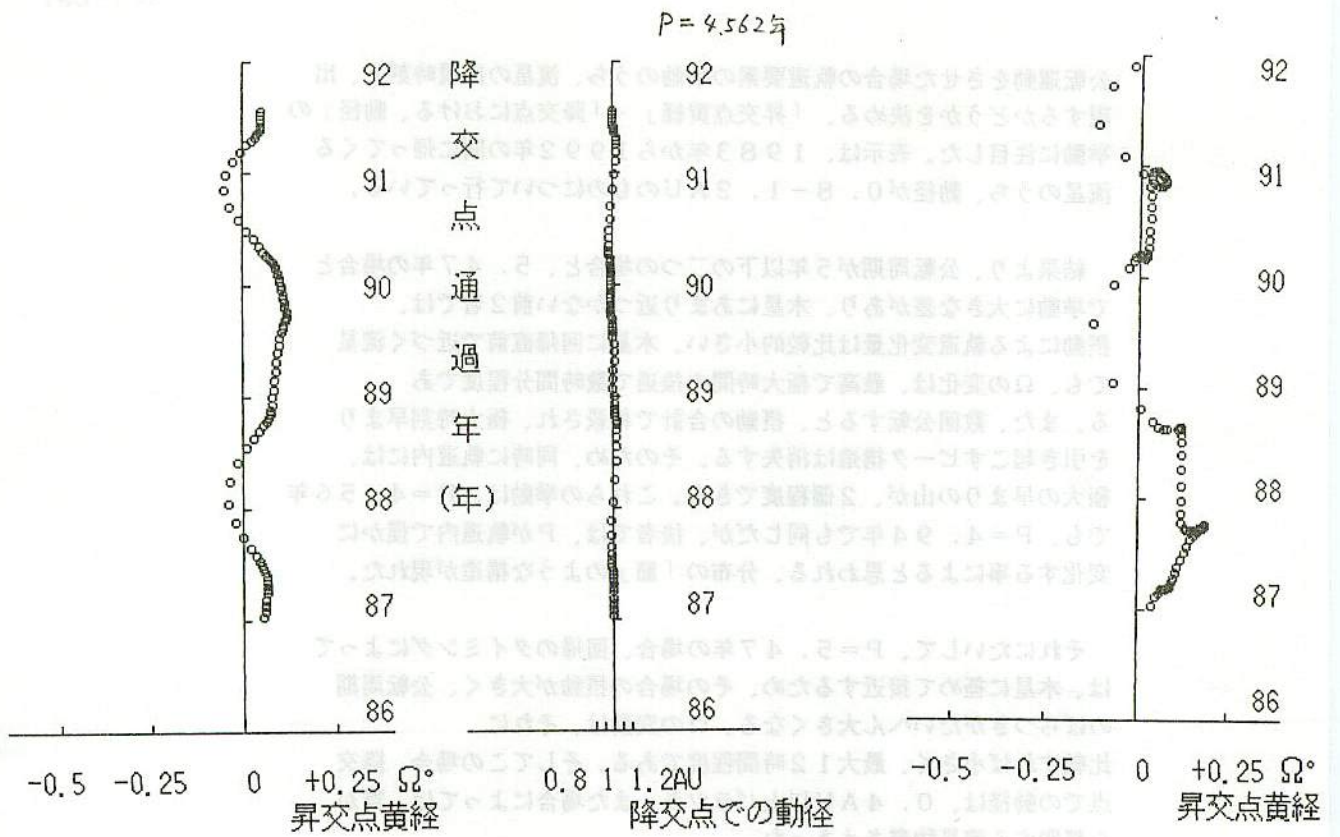
Ω のグラフの規則模様は、この場合は、公転周期の変動により不規則になるが、もともと木星接近による軌道変化絶対量が大きいため、摂動でできる Ω 対回帰時刻のグラフ中の模様は、他の場合に比べて長持ちはしているようである。

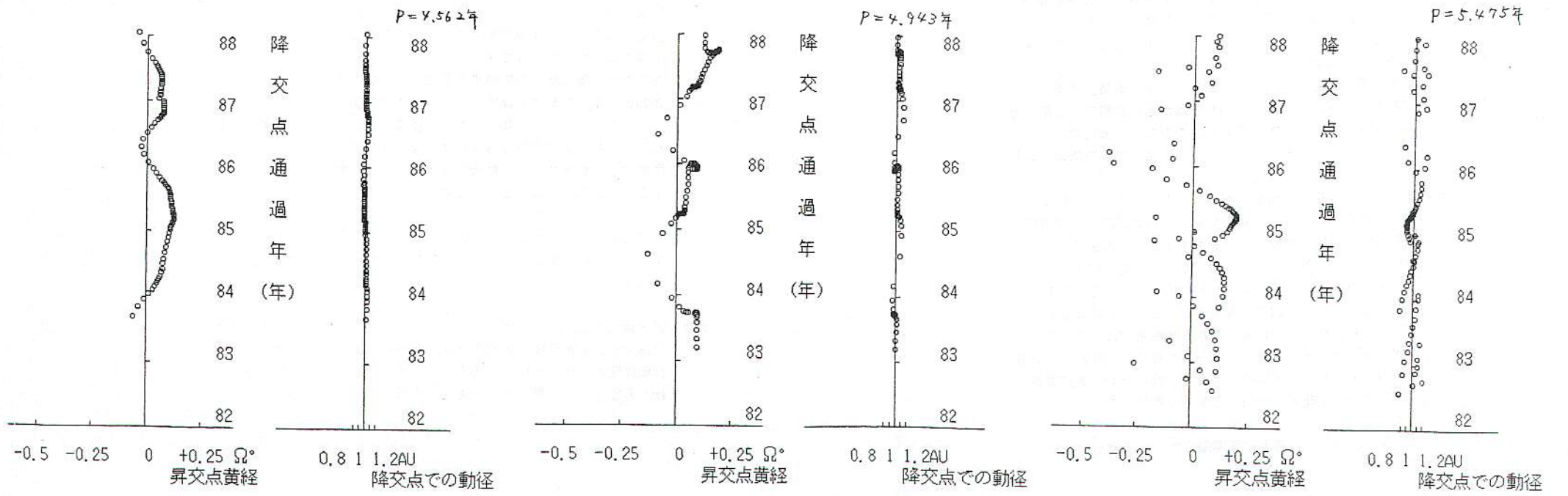
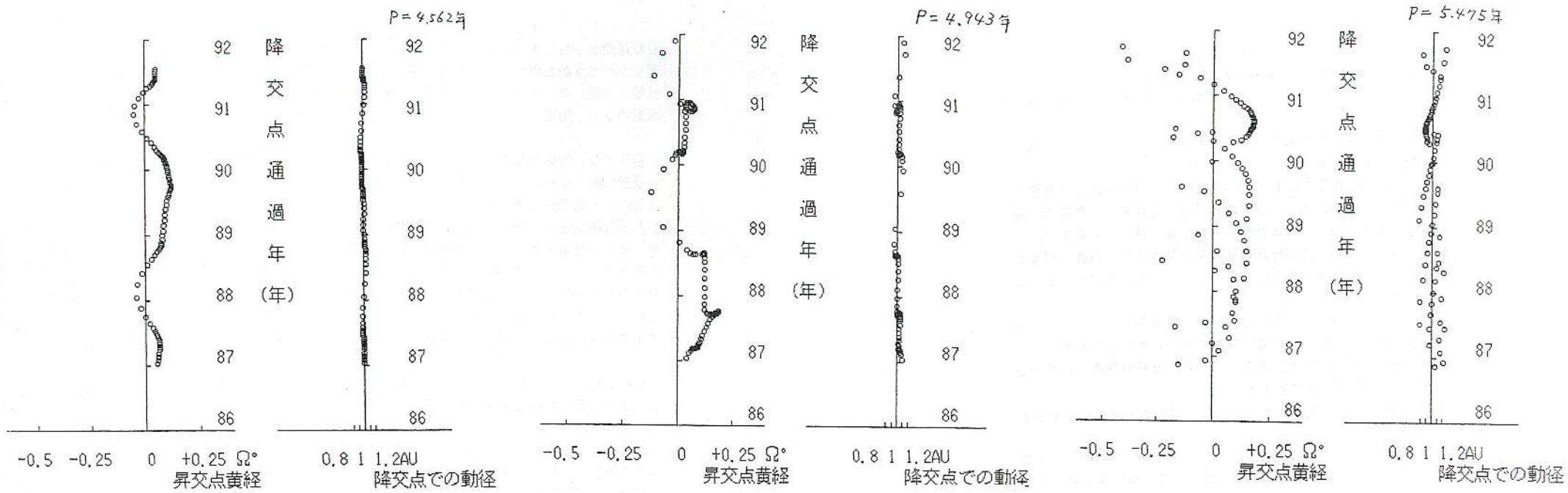
そのため、極大時刻の変動を引き起こす、 Ω の揺らめきの模様は、10公転以上保存され、一山1年前後(単純な整数計算では、 $(1-1/11.4)$ 年、つまり、正確には0.9123年と予想される。)の、山の重なり構造のような模様ができただけでなく、なお、回帰直前の摂動による軌道変化は、極大時刻を最大で10時間程度も早める。重なりのある山脈模様は、この初期条件での計算では、明らかに2順目(14公転目)で破壊されているので、更に多公転の計算でこの公転周期で意味のある構造を作り出すためには、「同じ軌道上から出発する。」という前提を変え、さらになんらかの工夫の必要がありそうである。

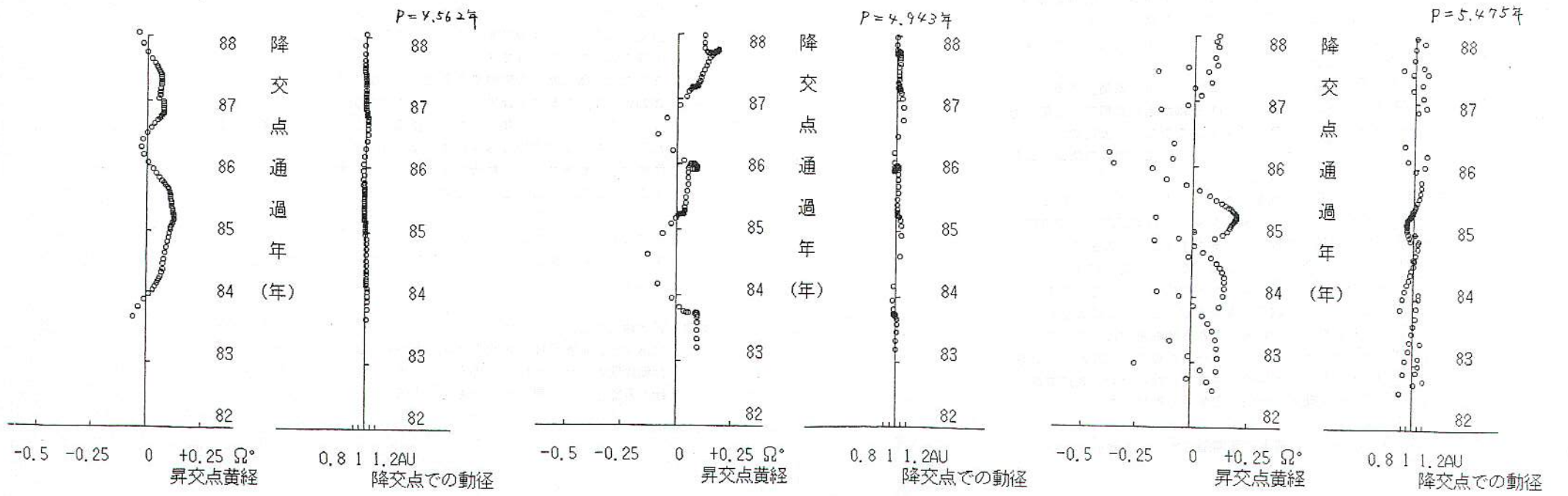
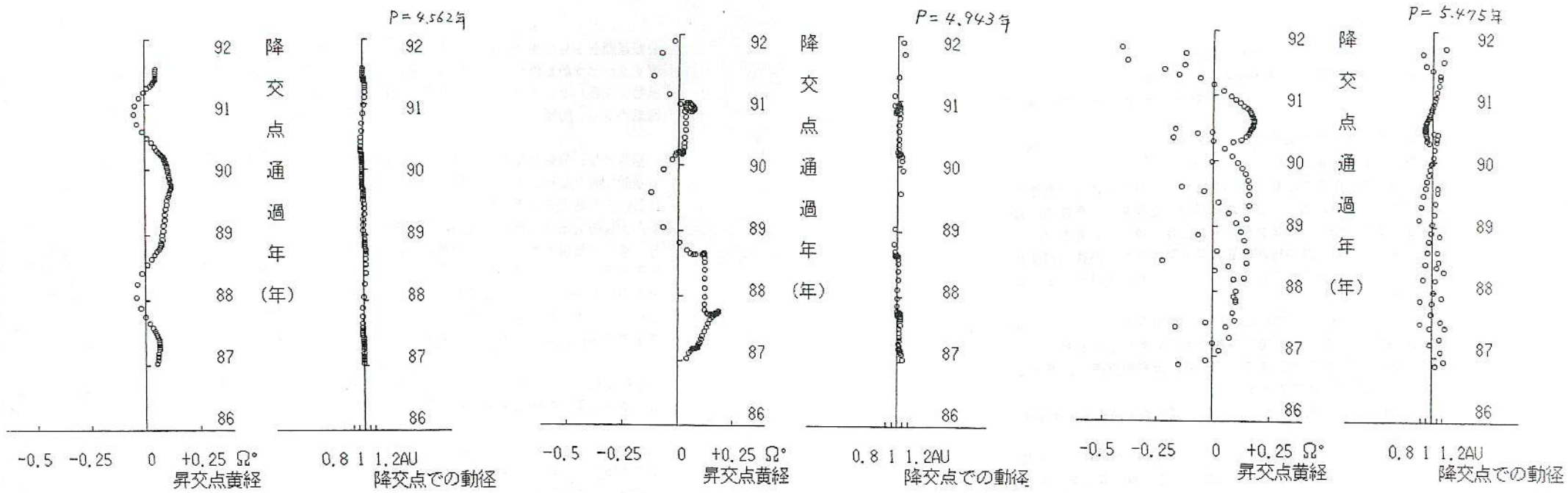
結論：四分儀座流星群の多公転シミュレーションによれば、初期軌道を適切に選ぶと、解釈可能な挙動を示す場合が稀にあるようである。今後は、公転周期がバラバラになる場合には、複数の軌道に流星を置いて計算を始めるなどして、更にどうなるか、いろいろやってみる事にしたい。

以上

(図はウラヌ)







MSS1997.04.12

四分儀座流星群の流星物質の軌道計算(2)

長谷川 隆

〒340 埼玉県八潮市伊勢野根通り

114-5

概要

以前MSSにて日高英治氏は、1987年の四分儀座流星群の流星軌道を考察し、「木星へ回帰直前に接近した流星物質が、軌道の別の近点角の部分とは系統的に異なる軌道を取るため、軌道の年次変化が見られた」と結論された。この研究には、従来の軌道の永年変化で四分儀の構造を説明した説とは対照的な新鮮さを感じられたため、さらに長い時間の軌道進化をおう事にした。ただし、任意の軌道から出発しては、従来の結果に帰着するだけとなるため、初期軌道を、ここでは工夫し、木星の公転周期と尽数関係になるように初期軌道をきめ、これより出発した、短期間の四分儀座流星群の軌道進化の考察を試みた。

前回、四分儀座流星群の流星物質が15公転程度した場合の計算結果を示したが、5.47年や、4.94年といった公転周期から出発した例では、「構造」は、一時的で、意味のある結論は得られなかった。今回その原因を追求するとともに、30公転以上へても、流星群の帯の中に意味のある模様が残る場合がある事を発見したので、その例について報告する。

経過

四分儀座流星群の軌道や、年次出現数の変動等を解明する一助とすべく、前回に引続き、木星と公転周期が尽数関係になるような、四分儀類似軌道における、流星物質の軌道変化の挙動について考察した。

四分儀の軌道として、任意の一つをとり、100から200程度の数のテスト粒子を等間隔に並べて、太陽と木星の引力を受けながら、流星物質が軌道運動するという計算を行う。

出発する軌道は、この場合、遠日点付近の位置精度が、写真観測の精度でゆるされる程度の不確定性の範囲で選ばれる、四分儀の推定真軌道の一つとする。具体的には、公転周期で4-6年の間、近日点引数で、167度から175度程度の間であろうという程度の不確定さは複数の研究により予想されたため、これは是認する事にし、他の軌道要素は、1950年代に、現国立天文台の広瀬元天文台台長が測定した結果を、さしあたり採用した。

(故) 広瀬秀雄元東京天文台台長の求めた、四分儀の軌道、

ω	Ω	i	q	a	P
171.1	282.6	71.0	0.978	2.90	4.95 (1950分点)

アトランダムに、この範囲で初期軌道を選択し、この上に流星物質を並べて軌道計算すると、木星が軌道の遠日点付近に接近する度に、付近の流星物質に比較的大きな摂動を与え、一時的な「模様」を作る。じかしながら、これを多数回、くりかえす事により、大接近する部分はならされて、模様は不規則になりながら消滅し、1000年以上のオーダーでは、永年的な摂動の効果が現れるという見方が従来されてきた。

しかし、30公転のシミュレーション結果はつきりと、模様が上の考え方では、消失しない場合が少なくともある事が、今回確認できた。それは、右図のように、軌道の長軸の方向を変えないで、公転周期が、木星のちょうど1/2になるよう調整した場合である。

すると、生じているものかもしれないとも思われた。なお、この「葉模様へのひっかき」のピークは、たとえばこの場合には、

$$1.078 = 1 + 1 / (13.76 - 1)$$

となるから、現れる時期と現れない時期とが14年程度の周期で繰り返すと予想される。

なお、計算起点は1810年、1987年付近の軌道を問題にした場合、この間、流星物質は33公転程度している。模様は、だんだん不明瞭になる傾向はあるものの、この例では1950年から2020年程度の間は、ほぼ同じ形態で保存されているようであった。

ただし、この葉構造は、木星へ流星物質がより接近する近日点引数が大きいほど、摂動が大きすぎて、流星物質のちらばりが大きくなりすぎて、はっきりしなくなり、171.1度という、文献値の場合には、この場合には、現れるかどうかのちょうど境目であるらしいとの、興味深い事実が発見された。以下に、近日点引数を変えた場合の、計算結果を示す。前の例のように、167.1度の場合を見ると、これが、たった4度も減少するとはっきり模様が現れる事から、近日点引数に流星物質間で、数度ほどのばらつきさえあれば、明確でなくても存在はしえる模様がありえろと考えられた。

なお、この他に、木星に一番最近に接近した部分の昇交点黄経が、極小となるような、昇交点黄経の流星帯全体としての、「波動」が多くの場合に見られ、「1987年の四分儀は、最も最近に木星の摂動を受けて、軌道の大きく変化した部分だ。」という説が、公転周期が5.2年程度以上であるならば正しいようであった。ただし、公転周期がこれより短いと、1987年1月4日には、地球軌道を、昇交点黄経が減少する部分を通り過ぎていて、「昇交点黄経のちいさい、軌道要素の大きく変動した部分が現れる。」とは必ずしも言えなくなるようだった。

まとめ

四分儀群には、観測的事実として、流星物質の軌道の系統的な年次変動、極大時刻の、ピーク位置の変動の指摘がある。

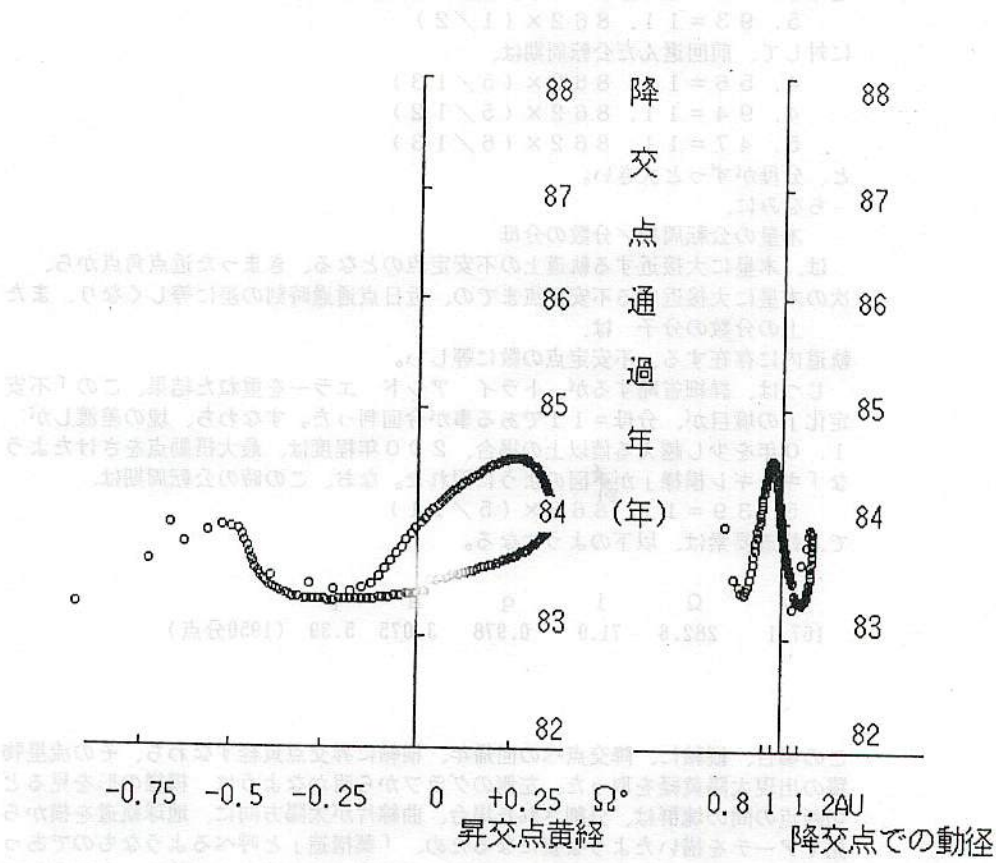
原因として、木星の公転周期と尽数関係にある流星物質の軌道シミュレーションにより、

1. 木星から強い摂動を、地球接近のすぐ直前（半公転前）に受けた部分と、しばらく受けなかった部分とが共存する事により生じる、分布のよじれの影響。
2. 公転周期が、木星のそれと尽数関係になっている事から生じる、群内の半永続的規則模様（軌道要素の規則的変動もありえよう）。

の可能性があるらしいと確認された。今後は、年次変化の点で俗に「不思議な群」と言われる四分儀の軌道の特性についても、観測・理論両面からのアプローチをつづけていきたいものと考えます。

以上

木星の軌道は、太陽から約7.8AUの距離を、約12年の周期で公転する。この軌道は、木星の重力によってわずかに歪められている。この歪みは、木星の赤道面と太陽の赤道面との傾きによって生じる。この傾きは、約3.1度の角度を占める。このため、木星の軌道は、太陽の赤道面に対して、わずかに傾いている。この傾きによって、木星の軌道は、太陽の赤道面に対して、わずかに傾いている。この傾きによって、木星の軌道は、太陽の赤道面に対して、わずかに傾いている。



公転周期が木星の1/2の軌道から出発した、33公転後の四分儀の軌道

$$p = 5.93 \quad \omega = 171.1$$

図は前回説明したように、摂動を受けながら公転する四分儀の流星物質の作る流星帯の分布が判るように、左が、縦軸に、降交点への回帰年、横軸に昇交点黄経すなわち、その流星物質の出現太陽黄経を取ったもの、右は縦軸に降交点回帰年、横軸に、降交点での動径をグラフにしたものである。

木星の公転周期の1/2の軌道の場合、木星と大接近しない離角の部分に、流星物質がほとんど偏り、5.93年周期で、出現したり、しなかったりする、流星帯が、定状的に軌道の半分程度の部分にしか分布しない、「仮想の四分儀群」が形成された。前回の15公転程度の計算で、この例と同じ原理で模様ができる事を期待したにもかかわらず、実際にはできなかったのは、このことから、アイディアが悪かったのではなくて、公転周期を選ぶ際、木星の公転周期に掛ける、分数倍の一定値の選択で、分数の分母の値を大きくしすぎたため、模様が安定でなかっただけではないかと、推測された。すなわち、

$$5.93 = 11.862 \times (1/2)$$

に対して、前回選んだ公転周期は、

$$4.56 = 11.862 \times (5/13)$$

$$4.94 = 11.862 \times (5/12)$$

$$5.47 = 11.862 \times (6/13)$$

と、分母がずっと大きい。

ちなみに、

木星の公転周期/分数の分母

は、木星に大接近する軌道上の不安定点のとなる、きまった近点角点から、次の木星に大接近する不安定点までの、近日点通過時刻の差に等しくなり、また上の分数の分子は、

軌道内に存在する、不安定点の数に等しい。

じつは、詳細省略するが、トライ アンド エラーを重ねた結果、この「不安定化」の境目が、分母=11である事が今回判った。すなわち、塊の差渡しは1.0年を少し越える値以上の場合、200年程度は、最大摂動点をさけたような「キレグレ模様」が図のように現れた。なお、この時の公転周期は、

$$5.39 = 11.862 \times (5/11)$$

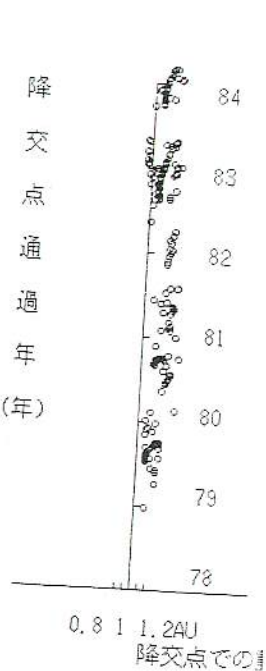
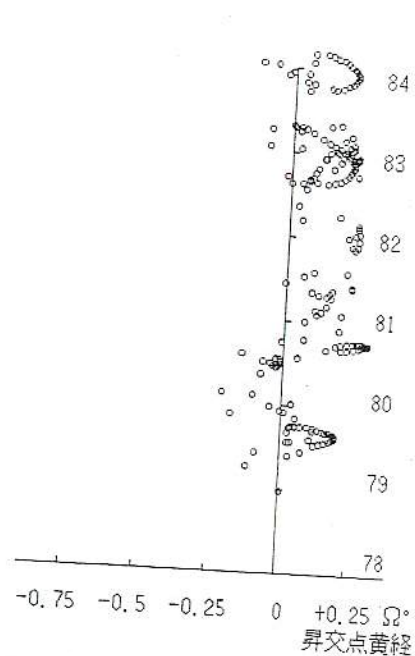
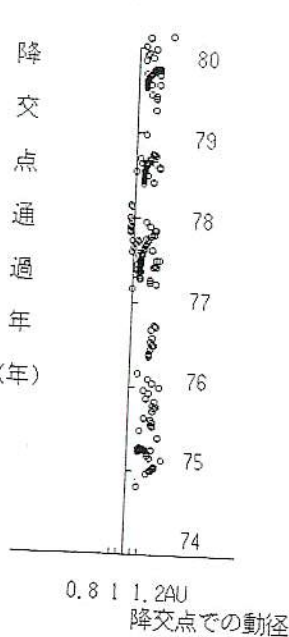
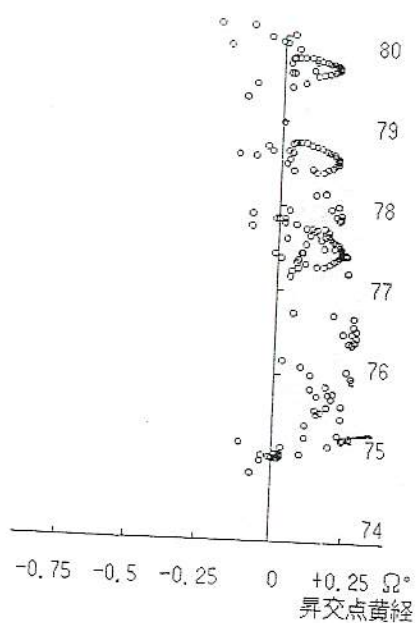
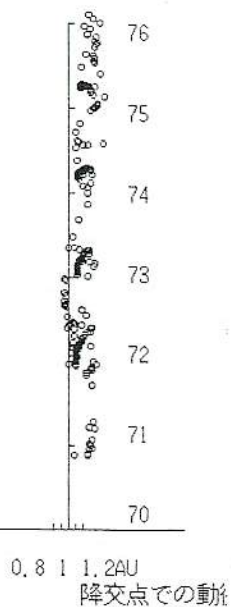
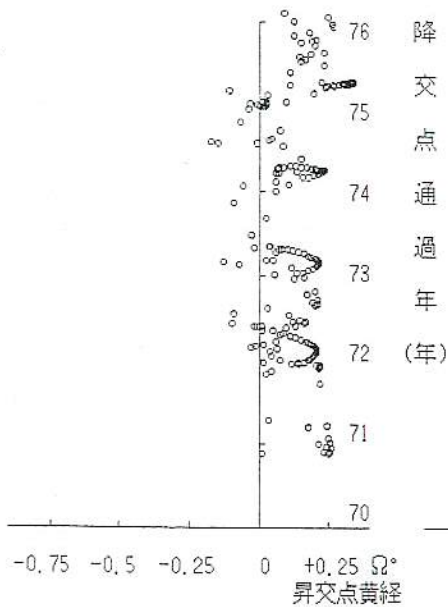
で、軌道要素は、以下ようになる。

ω	Ω	i	q	a	p
167.1	282.6	71.0	0.978	3.075	5.39 (1950分点)

この場合、縦軸に、降交点への回帰年、横軸に昇交点黄経すなわち、その流星物質の出現太陽黄経を取った、左側のグラフから明かなように、模様の形を見ると切断点の間の塊群は、分割された場合、曲線片が太陽方向に、地球軌道を横から見てアーチを描いたような姿になるため、「葉構造」と呼べるようなものであった。このとき、葉の差渡しは、木星の公転周期の11分の1の約1.078年で、5枚の葉ないしは、その一部が現れた。この葉が引っかかる、太陽黄経の比較的大きい所で、年によって、弱いピークが現れるようなことが仮にあれば、実際にこのような、公転周期の木星のそれとのじん数関係にもとづく、模様が、もしか

1.101-00 EP.2-9

公転周期が木星の5/11の軌道から出発した四分儀群の軌道分布 (その1)



何かキーを押してください

$p = 5.392$ $\omega = 167.1$

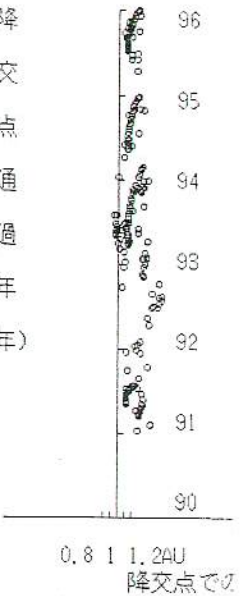
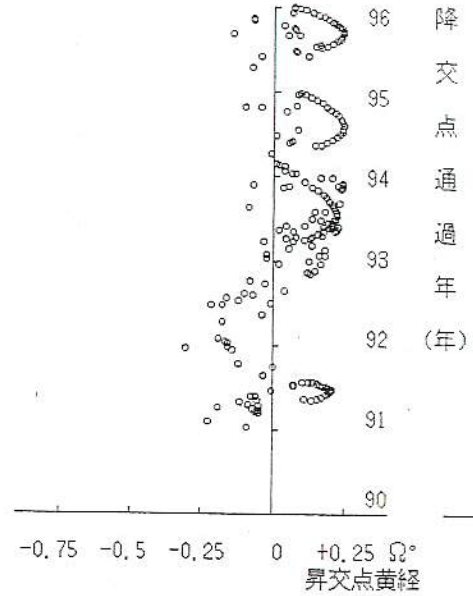
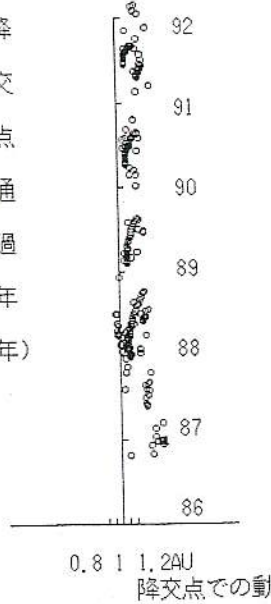
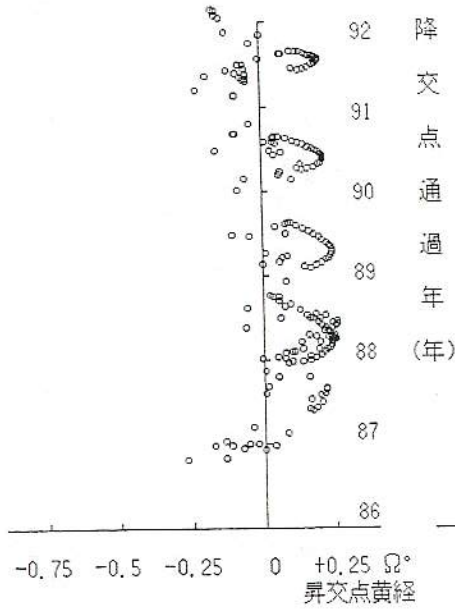
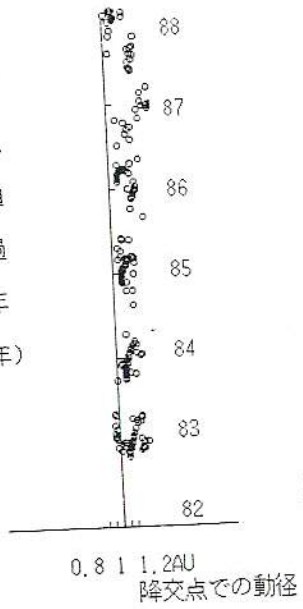
何かキーを押してください

$p = 5.392$ $\omega = 167.1$ 計 4. rose
(17.1-4)

何かキーを押してください

$p = 5.392$ $\omega = 167.1$ 計 4. Hirose
(17.1-4)

公転周期が木星の5/11の軌道から出発した四分儀群の軌道分布 (その2)



何かキーを押してください

360-14.5

$P = 5.39_y$ $\Omega = 167.1$ 残 Hirose
(171.1-4.0)

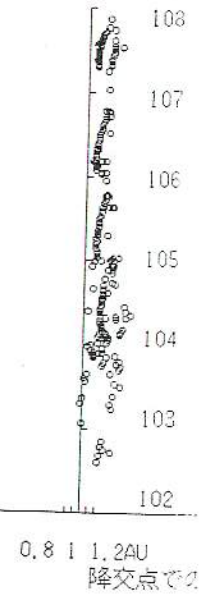
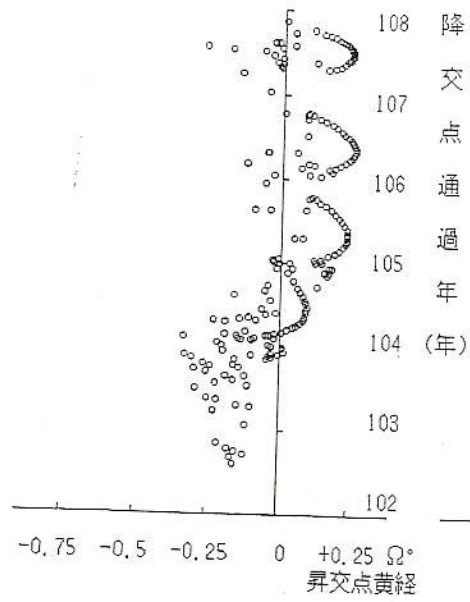
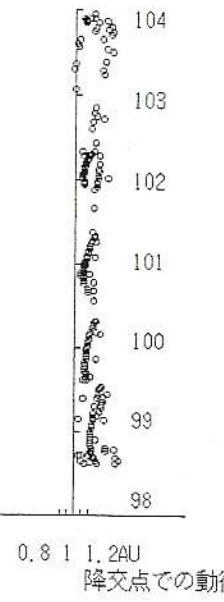
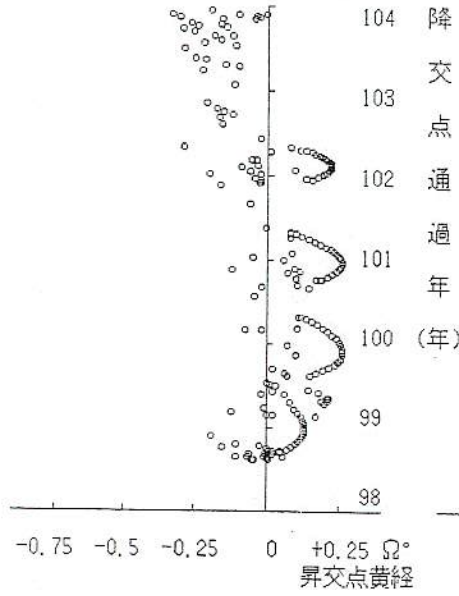
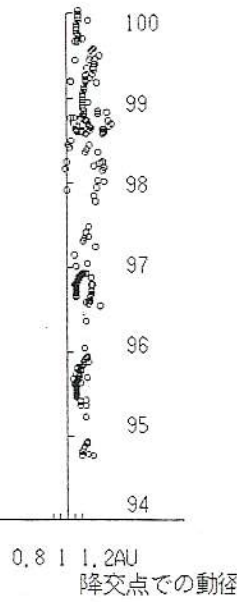
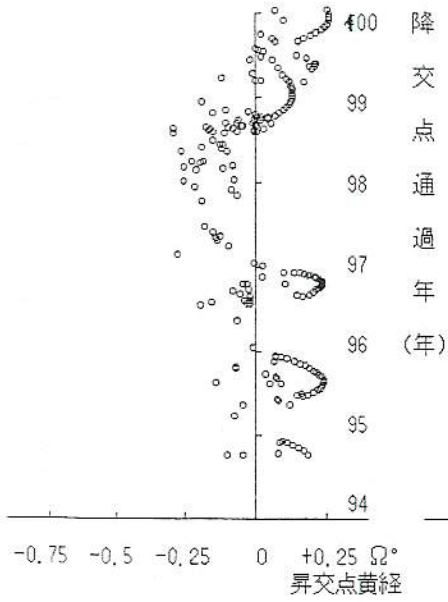
何かキーを押してください

$\theta = 5.39_y$ $\omega = 167.1$

何かキーを押してください

$p = 5.392$ $\omega = 167.1$
(171.1-4)

公転周期が木星の5/1の軌道から出発した四分儀群の軌道分布 (その3)



何かキーを押してください

$$p = 5.392 \quad \omega = 167.1$$

何かキーを押してください

$$p = 5.392 \quad \omega = 167.1$$

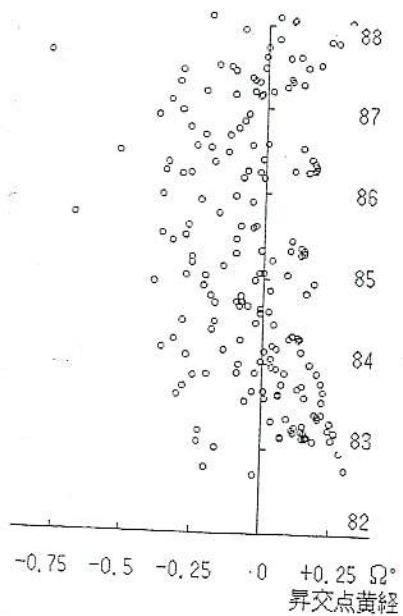
何かキーを押してください

$$p = 5.392 \quad \omega = 167.1$$

MSS-082
7/8

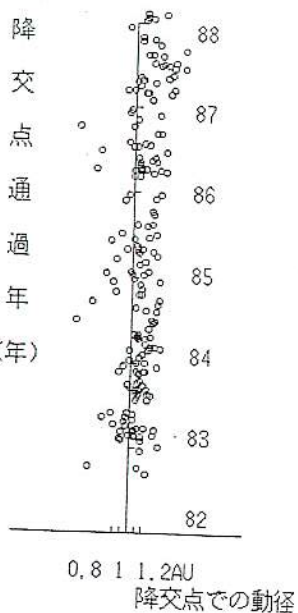
50/6

近日点引数が4度づつ違う、3つの軌道から出発した四分儀の33公転後の分布の比較



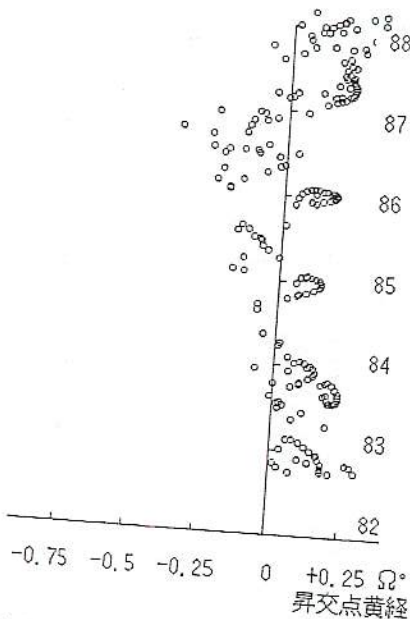
何かキーを押してください

$p = 5.43y$
 $(5.39 + 5.47/2)$



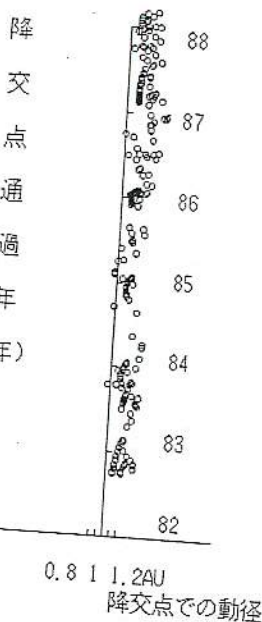
$\omega = 171.1$

$\omega = 171.1$ 残 Hirose



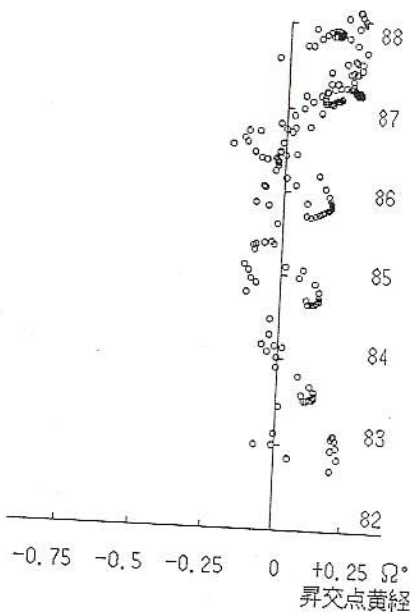
何かキーを押してください

$p = 5.43y$
 $(5.39 + 5.47/2)$
 $\omega = 167.1$
 $(171.1 - 4)$



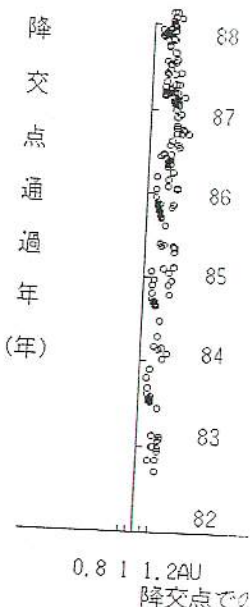
$\omega = 167.1$

$\omega = 167.1$ 残 Hirose



何かキーを押してください

$p = 5.43$
 $(5.39 + 5.47/2)$
 $\omega = 163.1$
 $(171.1 - 8)$



$\omega = 163.1$

$\omega = 163.1$ 残 Hirose

MSS 1997/07/13

表題 2001年1月1日人類は何を発見するのか？

長谷川 隆

説話によれば、19世紀の第1日、すなわち1801年1月1日、イタリア・パレルモ天文台のG. ピアッチは、小惑星第1号「ケレス(Ceres)」を発見したと言われている。ピアッチの発見が、社会にどの程度のインパクトを与えたかは、私にはさだかではないが、その後起こった産業革命の進展等を考えると、その世紀の社会変動の序幕と捉えられたであろう事は、想像に難くない。

他方、21世紀まで現在4年弱になっており、来世紀の天文の動きを予想する事も現在意味のないとは言えない時期に入ったのではないかと考えられよう。

さて、それではピアッチの小惑星発見の右へ習えではあるが、「21世紀初頭に発見されると期待される天体」は存在するのであろうか？

ここでは、考えればたぶん多数指摘できると思われる候補の中で、流星の立場からお奨めの物として、「四分儀の母天体発見」の可能性について、指摘したい。

四分儀の母天体については、軌道進化の研究から、マックホルツ第1彗星が候補としてあげられている。現在の軌道要素は違うが、惑星摂動の影響を加味すると、起源が一緒との事だ。

他方、四分儀群は、群活動の上では、「定常群」に分類される。良く知られるように、定常群では、進化の過程で流星物質が軌道上に均質に分散され、年による、出現の起伏があまり見られなくなっている。

四分儀が定常群であるという事は、母彗星の軌道と群のそれとが、ある程度分離しているという考えを裏付けるともとれるが、ペルセウス群のように、かならずしもそうともいえない場合もあり、複雑だ。

ペルセウスの場合、しばしば、HR=60前後と言われる通常の出現の他、HRで倍を越える「突発」あるいは「大出現」と言われる出現が見られ、その際、母彗星スィフト=タトルが回帰する場合がある。ただし、「大出現」には、これより規模の大きな「流星雨」同様、群自体の出現期間「1月」より、ずっと短い「1時間程度」という特徴がある。なお、スィフト=タトル彗星と、ペルセウス座流星群の軌道は、よくにている。

つまり、四分儀の場合も、ペルセに似た出現ピークのするどい「大出現」が過去に

あれば、上の事から、母天体とは必ずしも言えないが、その破片程度のものなら、特異小惑星の形で、その期間地球の近傍に回帰していないとも限らないのではないかと考えられる。

四分儀の場 痰真の極大に当たった1月4日の朝は、大概一晩中出現が続くが、個人的に、筆者はかつて次のような事例に当たった事があるので、報告しておきたい。

1974年1月4日朝 (JST) ……出現：◎

我が上野高校地学部が、いつごろからこの群を観測しはじめたのか……？ はっきりしたことを筆者は知らない。ただ'70年、かの白尾元理氏を含む23期～24期が、とうじ埼玉県朝霞にあった上野高校のグラウンド（通称「体育園」）で、この流星群の観測をおこなったことだけは確かである。ただ、このときの記録は見あたらない。気象庁が出している、「天気図集成」1970年版によると、この日、東京付近はあまり天気が良くなかったらしい。

翌1971年は、筆者が高1の年で、同じ所で1月4日朝と5日朝の2晩、観測がおこなわれている。ただし、この年の1月3日は雪、1月4日は曇りで夕方晴れたものの、5日朝はミソレーという天気だった。1月4日夜中まで流星は1個も出ずーという記憶が、筆者の頭に残っているのみである。

翌1972年は、体育園がクジで敗けて使えず、そのため観測会はおこなわれず、翌々1973年も、天候不良か何かで中止になった。そして、その翌年が、いよいよ大宮での「1974年観測会」ということになるわけである。

とうじは、我々もまだ、現行の多重計数・天頂ラムカ法による観

測をおこなっておらず、 35° より上の全天を4方向に分け、2重計数法にて観測をおこなっていた。（図1～3）は、その年得られ

た生データである。データのように、4時半いこうは観測がおこなわれていない。とうじは何も判っていなかったので、観測時間が早すぎたのだ…。それで一応、3時半から4時半までの群流星をひろってみると、1等までが10個、2等までが21個となる。

大ざっぱに言って、今のラムカとの数比は3:1位だろう。3時半から4時半までの、1.8等以上、OBラムカ(60°×73°)になおした数は、3~7個位になるように思われる。(ただ、部分的に雲が出た所があるので、実際にはもう少し多いかもしれない)このころの大宮の空は大へん暗かったので、図のように観測数ははかに多いが、さほどの大出現というわけでもなかった事が判る。

しかし、実はこの年、皆が観測を終了し、大半シュラフに入っ
てしまったころ、大へんな出現をみせることになる。恐らく、今の単位で4時半から5時半までの、この群の流星数は20個位、しかも大半が、2~3個かたまって出現する、今でいう「流星アソシエーション(または「豆まき現象」)」だった。「4連発流星」な
ど、そのご、筆者はついぞ御目にかかったことはないが、このとき
は、何度も見られた。ちなみに、最高は、6時少し前に出た、「5
連発」だったと記憶する。この観測会いご、地学部の四分儀観測は
1度も中断することなく、現在まで続くことになる。

1975年/月4日朝(JST).....出現:◎

翌1975年は、28~29期(とうじ現役)を中心に、再び大宮にて満月の中、この群の観測会がおこなわれた。雑誌などの情報では、極大が4日おひるすぎになるため「出現しない」とみられていた。ところが、さにあらず。データの通り、この年も四分儀群は大へんな出現を見せた。

ちなみにこの年は、我々上野高校地学部において、始めて3重計数いじょうの多重計数法がとられた、記念すべき年である。ただ、

1974年1月4日は、筆者が四分儀座流星群の流星を見た、恐らく最初の晩で、上のような「異常な豆まき出現」を伴う活発な出方は、その後この群については、現在まで1度も見た事はなかった。出現全体では、確かに1975年や、1987年は活発であったが、短い時間の出現数では、1974年1月4日朝4.5-6時の出現の方が、上で特異的との印象を持つ。この現象は、見方によっては、1991年8月12/13日のベルセに、よくにっていたともいえなくもないと、今にして思えば思い起こされる。ひょっとしたら、今では盛んに指摘されるようになった、仮想の四分儀の母特異小惑星の接近による現象だったのではないかと、思うのである。

さて、前回MSSで、筆者は、四分儀にみられる、通常極大(わが国では、西暦を4で割り2余る年には、ずっと四分儀の盛んな出現が見られ、それが、通常極大に対応しているようである。)から数時間オーダーでずれた、ピークに見える現象を解明するため、パソコンを用いた、流星物質の木星摂動を加味したシミュレーション計算を発表させていただいた。

その中に、公転周期が木星の5/11倍となる、 $p = 5.392$ 年というモデルがあり、群内に、12年周期の極大時刻の変動や、14年弱の極大時刻よりも数時間遅れた部分のピークを作り出すムラができていた。後者は、藪保夫氏が1975年の四分儀の盛んな出現を総括されるときに、雑誌等で指摘された、「1973年1月4日明け方の弱い立ち上がり」との関連で、筆者には注意すべきものがあると感じられている。

さて、四分儀の公転周期と母天体があり、かつその公転周期が等しいとすれば、 $p = 5.392$ 年なら、地球へは、その5倍の27年周期でニアミスする事になる。

この公転周期

なら次回は、

$$1974 + 27 = 2001 \text{ (年)}$$

となる。不確定要素があり、当りの可能性はごくわずかだが、やみくもに、特異小惑星を探索するよりは、幾らかましてはと思う。発見場所は、1月1日なら、ほぼ、地球向点と、四分儀の輻射点を結んだ大円上の付近どこかであろう。

それと共に、かつ、それを記念するように、2001年1月4日、日本の四分儀は02時±3時間程度のところで、盛んな「罫一ピーク」が又見られるかもしれない。2001年1月1日が、18世紀の初日同様、「太陽系小天体発見の日」になる事を、祈りたいものである。

以上

ジャコビニ流星群の軌道計算結果

長谷川 隆

〒340 埼玉県八潮市伊勢野根通り114-5

TEL 0489(97)1504

e-mail lfe24018@biglobe.ne.jp

要旨説明

ジャコビニ群については、以前カウエル法での1900年以降放出流星の軌道計算結果をした事があり、1959年以降2度の木星接近による流星帯の変化で、1972年の不発や、1985年の突発が説明できる可能性がある事を指摘した。今回、ナイストレム法(4段)により、それを確かめるとともに、1998年地球が、ジャコビニ=チンナー彗星の軌道面を通過する約7時間前に、流星帯と交差するという結論を得たので報告する。

計算とその結果

太陽・木星・土星・天王星が存在する条件で、ジャコビニ=チンナー彗星から近日点で、軌道接線方向に20m/sec以下で放出された流星物質がどのような運動をするかを、市販のPCを用いて考察した。計算プログラムは、長沢・檜山の「パソコンで見る天体の動き」や、大西訳の「軌道計算テクニック」等によった。

下図は、1900年の回帰から、近日点通過毎に流星物質が放出されたとした場合の、流星物質の軌道特性の計算結果である。

なお、初期彗星軌道は次の通り。

T	ω	Ω	i	q	e	周期	計算者
1900 11/28.494	171.0509	197.4325	29.8366	0.931521	0.731568	6.46	ヨーマス

「平面図」と書かれた図では、横軸に時間が増加する方向を右に、降交点通過時刻を、縦軸に降交点における動径を増加が上になる向きにとってある。原点を母彗星として、降交点通過時刻や動径は、その差分がプロットされている。又ある回帰での、彗星軌道の降交点黄経と同じ値点を地球が通過して行く時刻と彗星が降交点を通過してゆく時刻の差と、地球の彗星降交点黄経での動径と彗星の降交点における動径の差は、Xで示されている。X印の点に流星があれば、概ね衝突するはずだから、平面図でX印の近くに点がたくさんある場合は、突発が予想されると考えた。

また「断面図」と書かれた図では、横軸に流星物質の昇交点黄経を右側増加の向きに、縦軸に平面図とは反対に、増加を下向きに、降交点での動径をプロットした。ただしここでは、原点を彗星の降交点を通過する瞬間の地球の動径と彗星軌道の昇交点黄経の値に対応する点にとってある。平面図でXの位置にある流星物質は、断面図でX軸上のどこかに必ずあり、かつそのX座標値のほぼ2.4倍が、「極大時刻の彗星降交点地球通過時刻とのずれ」に対応すると考えた。(マイナスのとき早まる。)

結果を見ると、1933年では、地球の通過点が流星物質の濃密度部の中にあり、ヨーロッパで観測された「流星雨」に対応していると考えられる。なお、断面図より、この流星雨が彗星軌道と地球軌道とがほぼ最接近となる、彗星降交点の黄経点を地球が通過する1-1.5時間後に出現するとなり、現実とよく合う。

また、1972年では、以前カウエル法で試した計算と同じく、地球軌道の通過点に流星はなく、空振りと予想できる。

更に1985年では、地球軌道と彗星軌道の交差は悪いが、地球通過点近傍に流星があり、突発が予言でき、かつ断面図より、その突発が「軌道間最接近予想」の約4時間前となり、現実と良く合致した。

ついでに1998年では、また、地球通過点に流星物質があり、突発ありと予想でき、かつ今度は、「最接近予想」の7時間程度前に出現と出た。従って、計算から、1998年10月8/9日に、ジャコビニは突発し、その予想極大時刻は、2.3時頃と推定された。JST6時が母彗星と地球の太陽黄経が同一にある

最後に、上の計算では考慮されなかった。19世紀放出の流星物質の分布を調べるため、1880年より流星物質を放出し、1933年の分布を、

1880年・87年・94年の放出分は考慮されなかった、前の結果と比較した。なお、1880年の母彗星軌道は、1894年の母彗星の軌道が以下になるよう逆行させてきめた。

T	ω	Ω	i	q	e	周期	計算者
1894 02/06	167.0	199.0	33.3	1.226	0.664	6.97	デイビス・ツルネ

19世紀の流星物質は、1933年の時点で、20世紀の帯に比して、目だって拡散が進んでおり、彗星や20世紀の帯を取り巻くように薄く分布しているような計算結果であった。全体としては、彗星を中心に、この時点で「つ」をひっくり返した形になっていたようである。

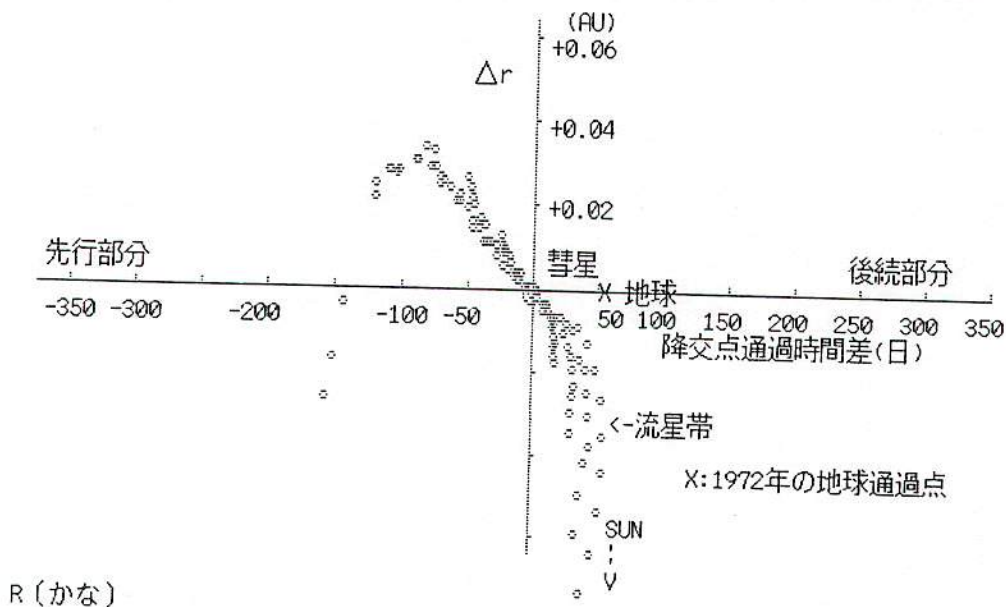
従って、流星の初期放出速度を2桁小さくしても、特にこの分布から、彗星に先行する、1926年や52年の突発出現を説明するのは困難と感ぜられた。また、1933年の断面図から、この「古い帯」の流星雨予想時刻は、1900年以降の帯しか流星雨を降らせていないとする仮定での場合に比べて、「早い時刻の出現」を予想するため、現実との合致は、よくなるまいと考えた。

結論

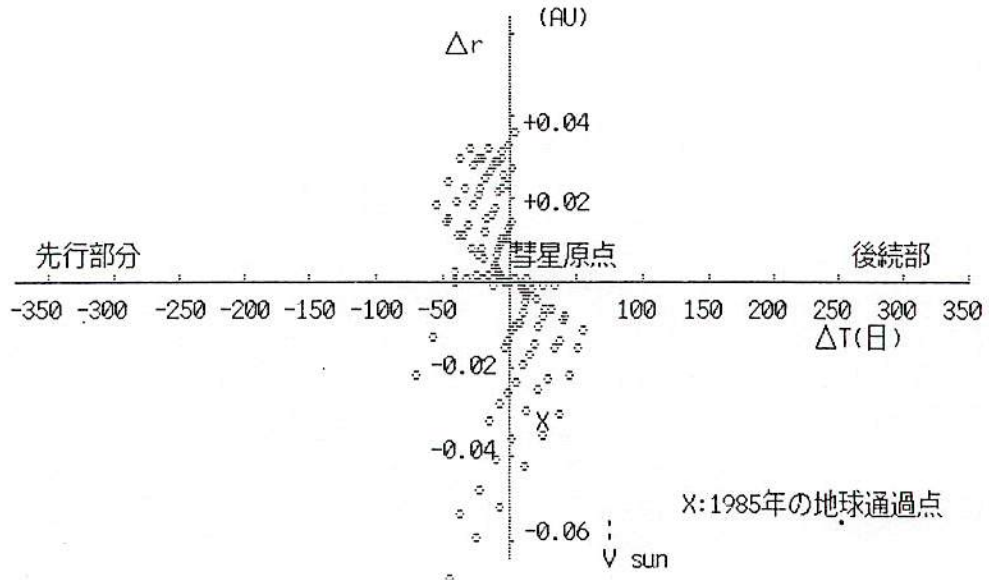
1998年のジャコビニの動向を観測し、更に結果より、流星分布に関する理論の精密度を向上させたいと考えます。

以上

軌道の交差が良くて流星帯から外れる場合。ジャコビニ群1972年の分布(平面)

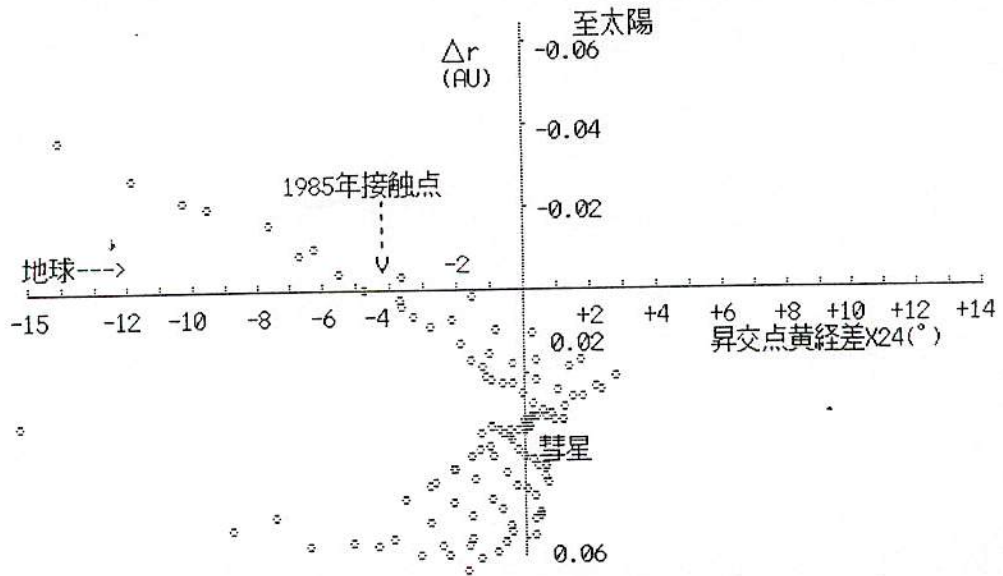


R(かな)



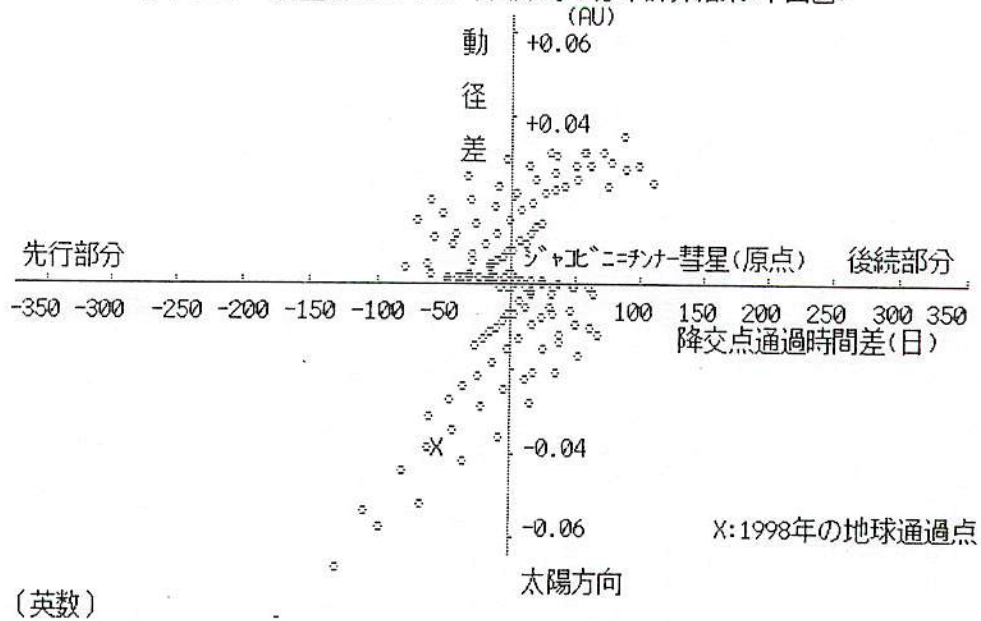
(かな)

軌道計算チェック用 ジャコビニ流星群1985年回帰時の分布(断面図)

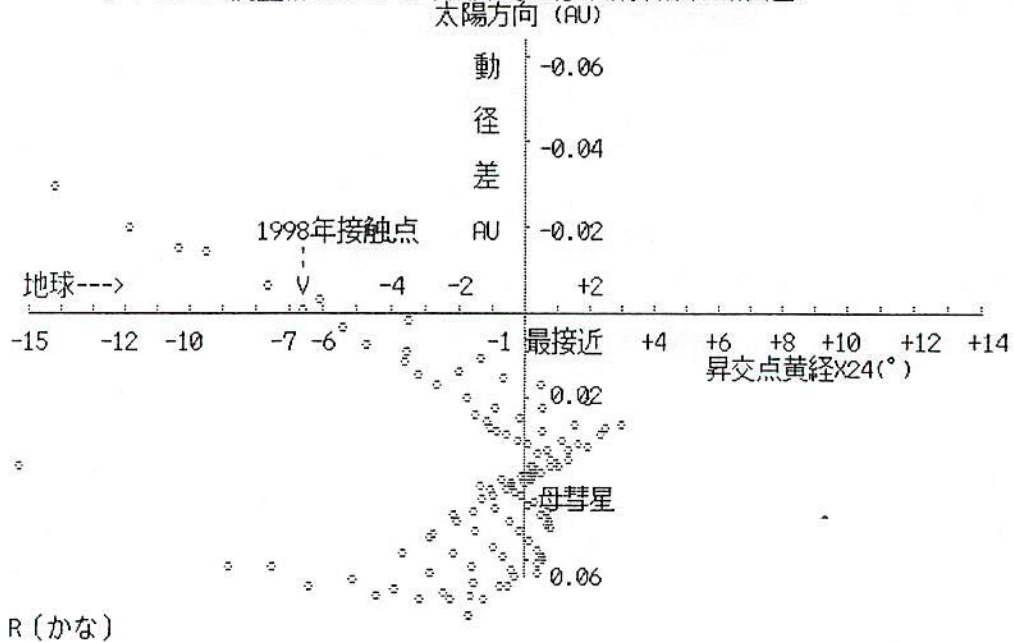


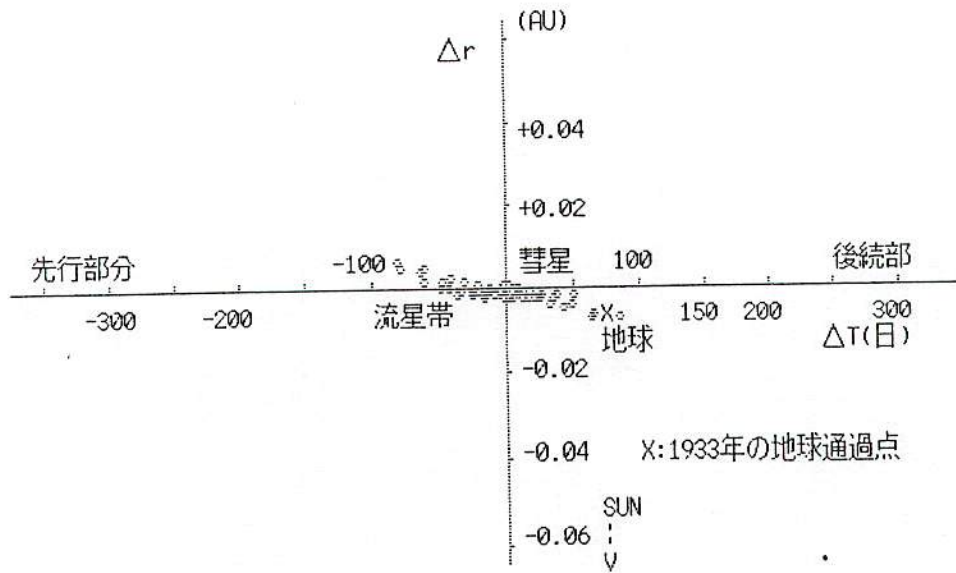
R(かな)

ジャコビニ流星群1998年回帰時の分布計算結果(平面図)



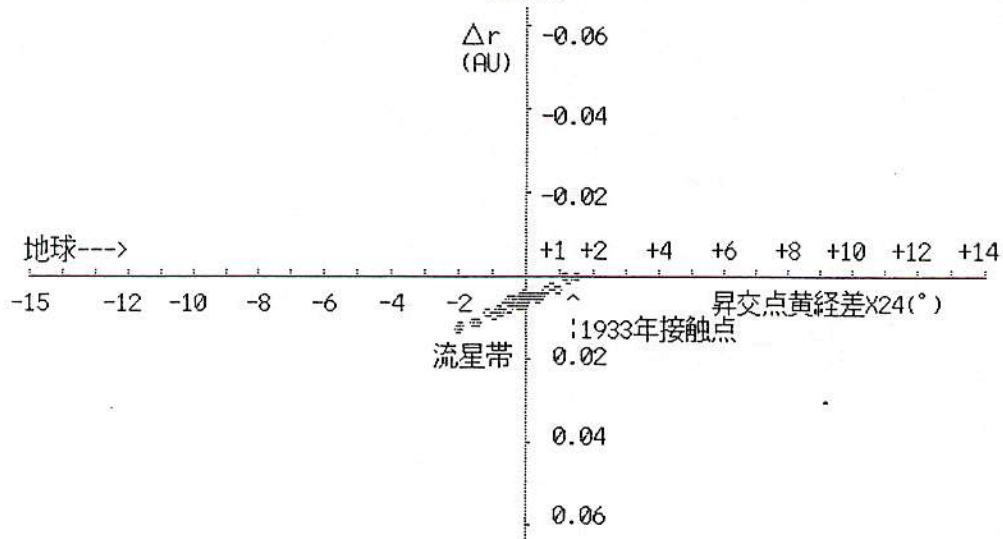
ジャコビニ流星群1998年回帰時の分布計算結果(断面図)





(英数)

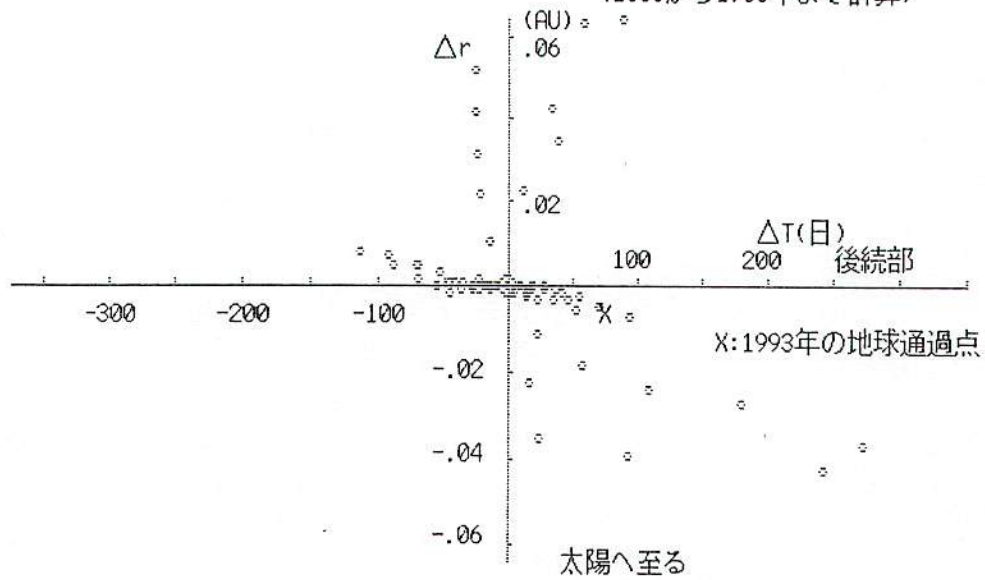
中野ダイアグラムが成立していたころのジャコビニ群(1933年の分布:断面)
至太陽



(かな)

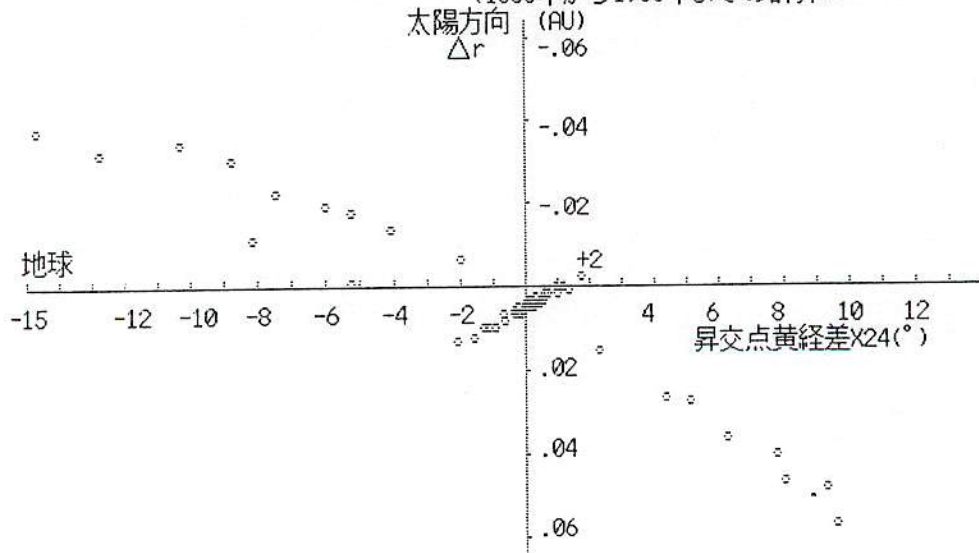
19世紀の放出も考慮した、ジャコビニ流星群の分布(1933年の分布:平面)
 (1880年から1933年まで計算)

MSS-084



R(かな)

19世紀の放出も考慮した、ジャコビニ流星群の分布(1933年の分布:断面)
 (1880年から1933年までの計算)



R(かな)

表題：しし座流星群1998年の極大時刻後退の1シミュレーション

概要 しし座流星群は、1998年、1時間あたり百のオーダーの出現で終わった。これは以前MSS等で発表したように、流星帯と地球軌道が完全な交差ではないとして説明できる。

しかしながら、1時間あたり100以上はまがりなりにも飛んだ流星群の極大時刻の挙動については、筆者の以前の発表では、何も説明していない。

1998年出現した流星は、流星帯の主要な部分から離れた、視覚的に仮に見えたとするならハローのような部分なのであろう。ここでは、1998年11月17日UT02時を中心に、地球に到達するハロー成分をコンピュータシミュレーションしてみたので紹介する。

ウーとウィリアムスが以前にペルセウス座流星群の母彗星回帰時の挙動を説明したのと同じ、軌道に対して垂直方向に、近日点から少し離れた所で核から放出される成分があると、ハローの存在は説明でき、かつ、軌道面に垂直方向にも異方成分があると、極大時刻は後退する。後者は、核の自転によって形成されるジェットが原因という事であり、つまり、これは反動で核を動かす、「非重力ジェット」と言う名称で知られた現象の、別の作用としても、説明できるのかもしれない。

結果概要

1699年から回帰毎に

1. 近日点のみで、
2. $r_{0.1} < 5m$ 以下で、
3. 等方に。

流星物質をテンペル=タトル彗星から放出し、1998年降交点回帰時の

図1：降交点通過時刻（増加方向左に注意。横軸） 対 降交点での動径

図2：降交点通過時の黄経（横軸） 対 降交点での動径（上下逆）

をナイストレム法で、木星・土星・天王星の重力を考慮し軌道計算した。

図1のパターンでは、一般に流星帯の展開図ダイヤグラムに、図2のパターンでは、流星帯のチューブの断面図型を表し、後者は極大時刻の母彗星の降交点を地球が通過する時間からのずれの情報を含んでいると期待される。（しし座流星群は、地球軌道平面内に軌道がある特殊な流星群ではないので。）

図より、1999年には地球軌道に交わる流星があるが、1998年にはない。計算数を100個から250個に増やした限りでは、初期放出条件の選択の偶然の問題ではなさそうだった。1999年の流星雨は、母彗星の降交点を地球が通過する時間から、ほとんどずれずに起こると予想すべきである、事の二点がわかる。

1998年にも、まがりなりにも時間あたり200以上の流星が降る原因としては、

1. 1699年以前に核から放出された流星が考慮されていない。
2. ウー・ウィリアムスのペルセウス座流星群の計算のように、近日点から100日位離れた所で、軌道に垂直、太陽方向に吹き出す流星物質の存在が考慮されていなかったため。

の2通りが、ざっとだが考えられた。極大時刻がずれたのについて、

1. では、数百年間の摂動でそうなった・・・可能性がある。

ここでは、2の線に沿ってのみ説明を試みた。

母彗星よりも、動径で0.008AU程度大きいところで降交点通過する流星があるのは、ウーとウィリアムス流の計算に沿って考えれば、次のよう

になる。

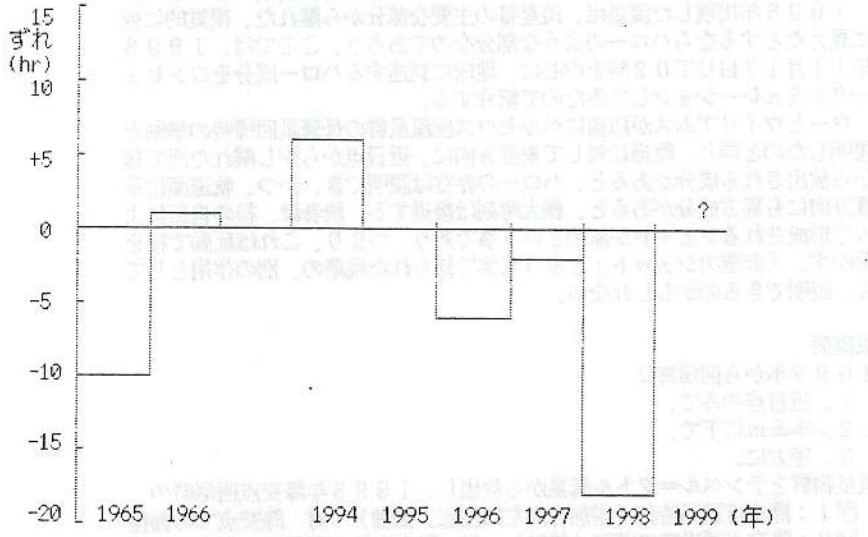
流星が核から放出される様子については、一般に不明な点が多いとされるが、彗星核表面の日当たりの良い所からしか流星は出ないとすれば、論理的に次の6パターンに分類して考えれば充分だろうと思える。

観測者氏名
東京都立大学理学部

観測日時
1994年10月22日 22時

観測地点
東京都立大学理学部

観測対象
MSS-089



しし座流星群極大時刻の地球が母彗星の降交点を通過時刻からのずれ

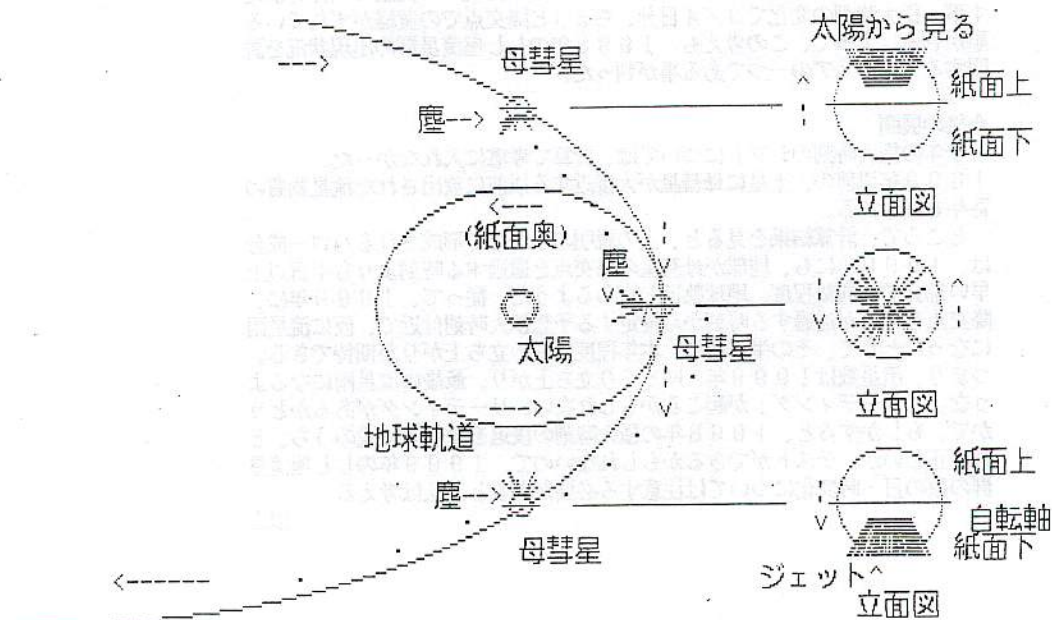
しし座流星群の極大時刻は、母彗星の降交点を通過時刻からのずれとして表され、その値は年々変動する。これは、地球の公転軌道と母彗星の降交点との相対的な位置関係が年々変化するためである。図に示すように、1965年から1999年までの間に、ずれの値は-10から15まで変動している。これは、地球が母彗星の降交点を通過する時刻が、極大時刻からずれていくことを示している。このずれは、地球の公転軌道の傾斜や母彗星の降交点の位置の変化によって生じる。図のデータは、1965年から1999年までのずれを示している。このずれは、地球が母彗星の降交点を通過する時刻が、極大時刻からずれていくことを示している。このずれは、地球の公転軌道の傾斜や母彗星の降交点の位置の変化によって生じる。図のデータは、1965年から1999年までのずれを示している。

テンペル=タトル彗星から出る塵の、放出場所・初期速度と、分布位置・太陽黄経後退（極大時刻の早まり）の有無

自転軸の軌道面に対する角度が小さく（自転軸が寝ている）かつ、近日点に於いて、自転軸の北極と太陽方向とのなす角が絶対値で90度よりずっと小さく、0度に近いとする場合。

放出位置	初期速度	帯中心に対する動径	太陽黄経後退	地球と衝突する場合内訳
近日点通過 数日前	大きい	小さい	後退	帯より動径小
	小さい	近い	なし	帯中心と交差
近日点通過 日頃	大きい	近い	なし	帯中心と交差
	小さい	近い	なし	帯中心と交差
近日点通過 数日後	大きい	大きい	後退	帯より動径大
	小さい	近い	なし	帯中心と交差

ただし、初期速度ベクトルの動径方向成分の大きさと、軌道垂直方向成分の大きさの比は、いつもほぼ一定（10：1程度になる場合が多いとされる。）と仮定する。



1998年のしし座流星群、極大時刻シフトの原因説明図

そのうち、流星帯タイグラムで「主要帯の外側」を形成するのは、「近日点通過後しばらくたってから、速い初速度で太陽方向に放出するパターン」の一通りに限られる。

近日点通過後100日程度で、平均よりやや大きめの放出速度、すなわち数十メートル毎秒で核から、軌道方向垂直で太陽に向いた方向へ流星物質が、主流に比べて数は少ないが幾らかは放出されるとすれば、1998年に出現する「ハロー成分」は形成される。なお、100日というのは任意であり、もっと離れても流星が出れば、初期速度は数十メートルも無くてもよい。

ただし、「日の当たる部分で、長い期間放出するこのモデル」では、極大時刻のシフトは、原則として説明できない。軌道面をはさんで、均等に流星が出たのでは、極大時刻は、近日点のみで等方に流星物質を放出するモデルと大差が出ない。(幅は増大するが・・・)

近日点通過後100日たった所で、流星物質はテンペル=タトル彗星の軌道面から、天の南極のある象限に偏って(角度で平均50度前後もずれて)出るとすれば、近日点で、軌道面の北極のある象限にその流星は偏って分布するので、極大時刻が後退するだろう。よって、この線に沿い、次の軌道計算を行った。

1699年から回帰毎に

1. 近日点通過後100日後のみで、
2. 約70m/secで
3. 進行方向軌道に沿った方向から垂直で、かつ太陽のある側向きに
4. 母彗星の軌道面よりも天の南極のある象限に平均数十度程度振って。

流星物質をテンペル=タトル彗星から放出し、1998年降交点回帰時の
図3: 降交点通過時刻(増加方向左に注意。横軸) 対 降交点での動径

図4: 降交点通過時の黄経(横軸) 対 降交点での動径(上下逆)
をナイストレム法で、木星・土星・天王星の重力を考慮し軌道計算した。

図より、この放出条件のものが、1998年に出現する流星の条件を満たす事、極大時刻の変化で3/4日分、ちょうど降交点での黄経がずれている事が判る。よって、この考えも、1998年のしし座流星群の出現状況を説明するアイデアの一つである事が判った。

今後の展開

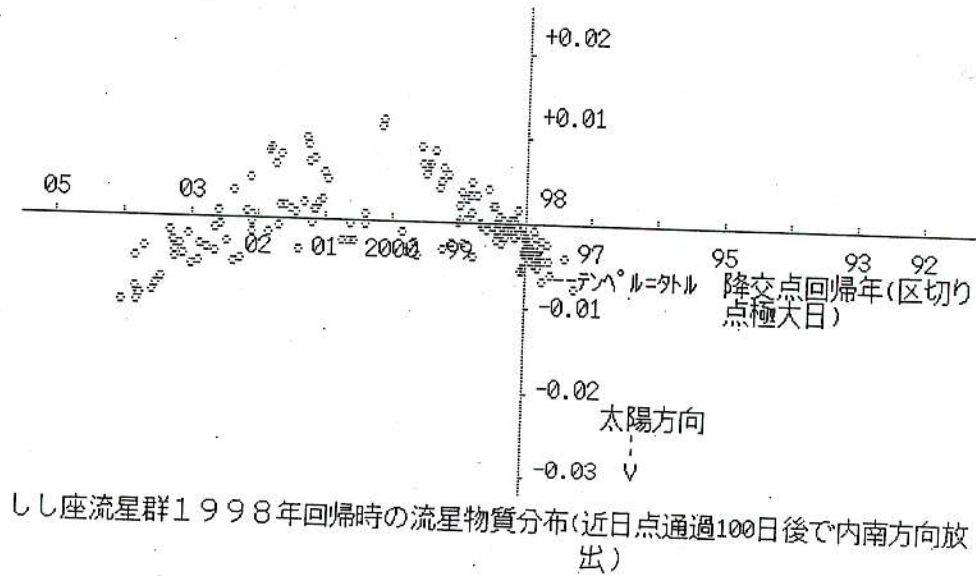
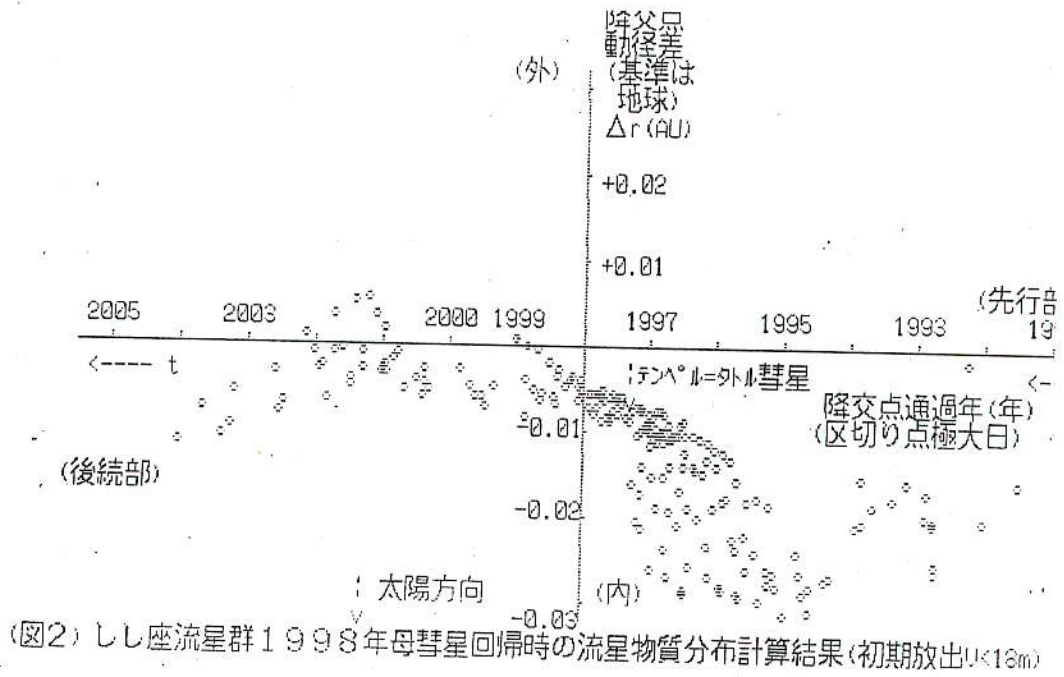
今年の極大時刻のシフトについては、計算で考慮に入れなかった、1699年以前の、土星に母彗星が大接近する以前に放出された流星物質の寄与も疑われる。

ところで、計算結果を見ると、上の説明のしかたで形成されるハロー成分は、1999年にも、地球が母彗星の降交点を通過する時刻よりも半日以上早い部分で、同数程度、地球軌道と交わるようだ。従って、1999年に、降交点を地球が通過する時刻から推定する予想極大時刻付近で、仮に流星雨になったとして、その半日前に、本年度の数の立ち上がり期待できる。つまり、流星数は1999年、ゆっくり立ち上がり、最後に流星雨になるような、「リーディング」が起こるかもしれない。リーディングがあるかどうかで、もしかすると、1998年の極大時刻の後退を説明する説のうち、どれが正しいか、テストができるかもしれないので、1999年のしし座流星群の数の日・時変化については注意する必要があると、私は考える。

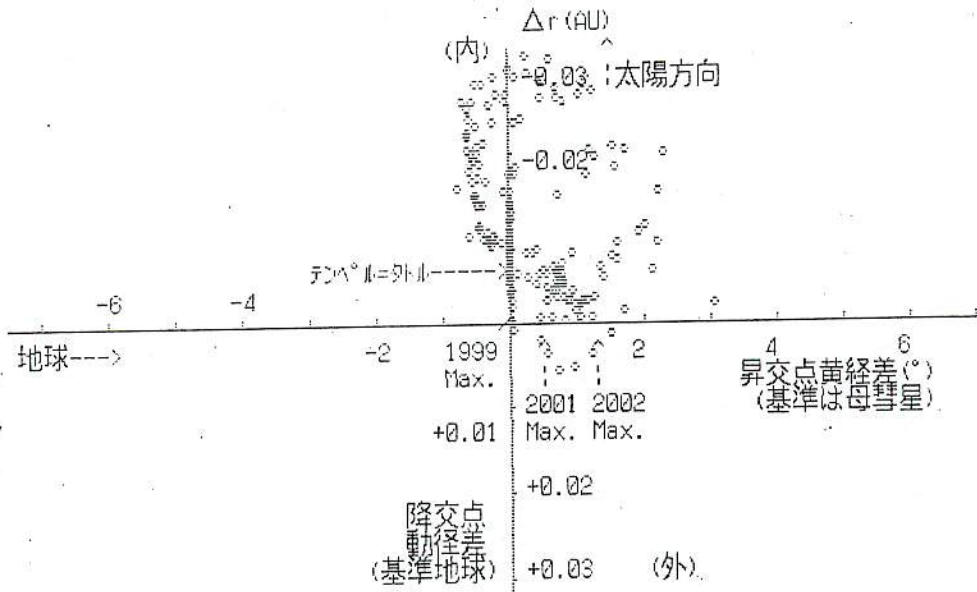
以上

1998は流星物質はおれたい

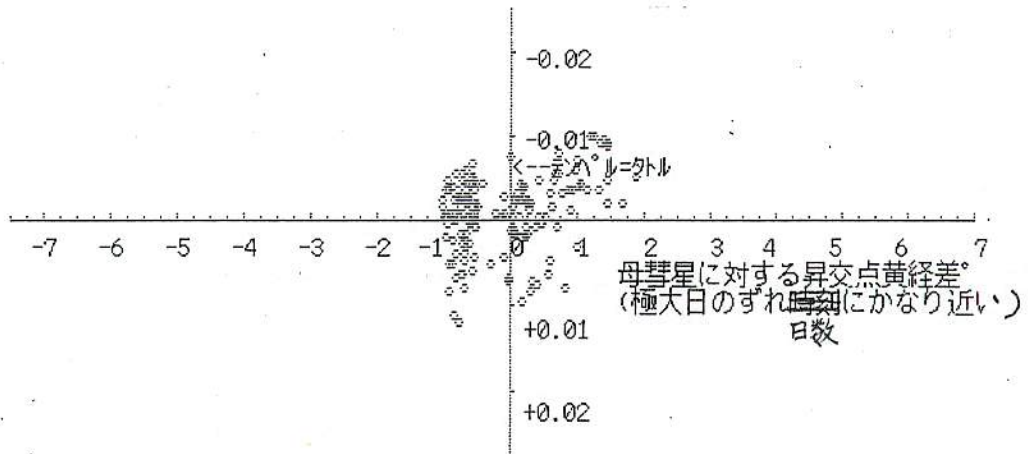
1999は母彗星の降交点と流星極大はほぼ一致



MSS-089



(図3) しし座流星群1998年の回帰時の降交点動径と昇交点黄経(極大時刻のシフト)



しし座流星群1998年回帰時の流星物質分布(近日点通過100日後で内南方向放出)
 --地球軌道面を通過する流星物質の接点--

MSS-089

(例会発表表題)

☆ポン=ウイネッケ彗星関連流星群(6月のうしかい座流星群)
の「1998年6月の突発」問題は、天体力学的に説明可能?

会員No. 305

長谷川 隆(埼玉県越谷市)

(概要)

ポン=ウイネッケ彗星関連流星群との意見もある1998年6月27/28日の流星突発問題について検討しました。この問題は、もしかすると、天体力学で説明可能な現象の可能性があると思います。

(内容)

ポン=ウイネッケ彗星の1858年の近日点回帰より、近日点通過毎に、母彗星より15m/sec以下という、ジャコビニ流星群の突発等を説明するのにちょうどよいスピードで、流星物質を放出させると、1998年6月の地球の彗星降交点通過時だけ、流星雨が見られるような、計算分布になりました。ポン=ウイネッケ彗星の回りの流星物質の分布は1996年の今回の回帰時、ちょうど彗星を節足動物の「蜘蛛」の胴体の位置に持って来た時、流星物質全体の太陽系空間における分布の形が、「蜘蛛」が細い糸を1本放出している図のような形をしています。

なお、「蜘蛛の胴体」自体は、降交点での位置が0.25天文単位も地球軌道の外側にあり、地球軌道とは現在全く交差しません。これが、「ポン=ウイネッケ彗星関連流星群は期待薄」とされた理由です。そこから、彗星の近日点通過時刻差で2.5年後、0.25天文単位内側の、「彗星後方、軌道内側の点」に向かって、細い糸のような流星物質の分布があります。そして放出している糸の先が、地球軌道と接しており、1998年6月28日に地球がその点にあります。

所で、この「糸」ですが、計算過程を追うと、約3年前に形成された事が判かりました。それ以前は、ほぼ彗星の「後方で軌道上に糸があった。」と、理解してください。木星の摂動で、彗星軌道上に並んだ流星物質の帯の一部の軌道が、木星に接近した部分だけ、大きく軌道要素が変化したために、降交点における動径(太陽からの距離)が、0.25天文単程度減少した部分が、地球軌道と接触するようになった。」のです。

つまり、今年の6月末にちょうど、直前に木星に大接近した流星物質の帯が、地球軌道に回帰したため、軌道要素が、帯の別の部分とかなり違う特別な部分が見えた、と考える事ができます。

軌道要素が違おうと「降交点における太陽からの距離」も、母彗星とほとんど同じ他の部分とはかなり違い、地球と接触するはずもないと予想された流星帯が実際には接近する事も起こり得ます。近日点付近で内側に帯が折れ曲がるというのは、ジャコビニ=チンナー彗星で1956年ころ起こる現象と、原因が同じなために、よく似ています。従って、母天体が降交点で、地球軌道のはるか外側を通るのに流星が見えた、というのは、今回のポン=ウイネッケと、1985年10月8/9日のジャコビニの突発の場合で同じ理屈によるものではないかと考えています。

なお、この現象は、木星が、流星帯に11.86年周期で接近する事で起こります。0.86年という端数のため、間が数十年飛ぶ事が起こり得るの

です。1986年には、地球が折れ曲がった流星帯のわずかに前を通過してしまいました。たぶんそれから12年、24年前にも、地球の交点通過のタイミングがかわずに、流星雨は無かったのだと思います。ただし、次回2010年6月27/28日には、また流星の突発が見られるかもしれないと思います。

なお、木星の摂動前、「シャープな、軌道に沿って母彗星の後ろに長く伸びる流星帯がそもそも存在する」のは、母彗星の軌道の特性に原因があります。この彗星は、今でこそ、公転周期が6,38年と、木星の公転周期、11,862年と無関係ですが、木星に接近するためかなり変化し、200-300年の公転周期の平均をとると、木星の公転周期の $1/2$ の5,931年に近いのです。

1858年から現在までの母彗星の動きは、大雑把に言って、最初木星との交差点において、彗星が通過してから木星が直後に通過するパターンで出発し、母彗星の公転周期が当時は5,5年程度と短いために、何回かで、木星が通過した直後に彗星が通過するパターンに転換し、これが原因で、彗星の公転周期が長くなり、木星の交点周期の半分より長くなった時点で、元の道筋に戻って、彗星が通過した直後に木星が通過するというパターンに戻りました。なお、今後は、彗星が通過した直後に木星が通過する事が原因で、再び公転周期が短くなり、木星の公転周期の $1/2$ よりも短くなると、同じパターンの繰り返しとなります。このようにして、一般に、大惑星の公転周期と簡単な整数比にある太陽系内小天体は、その関係が継続化される場合が多いでしょう。

ところで、彗星の直後に木星が通過→木星の直後に彗星が通過→彗星の直後に木星が通過という振動位相にある時代には、彗星とその後方に分布する流星帯には、その間、木星とあまり接近しない、摂動が弱い時代が長く続く領域ができます。このような領域では、彗星の軌道に沿って、特別に密度が高く、細長い流星の帯状分布が、150年余りで形成され、彗星の後方近日点通過時間差で2年半以上遠にまで破格の長さで伸びました。これが、「蜘蛛の糸状模様」の原形です。そして「彗星の直後に交点を木星が通過」した時、急に降交点での動径（太陽からの距離）が、極端に減少するように軌道要素を変えて降交点に回帰し、たまたまそこに地球が来ると、母彗星の回帰と離れていても流星の大出現になった、という事なのではないかと思えます。

つまり、今回の「母彗星回帰2年以上後の時期はずれの大出現」には、木星のような大惑星と、太陽系小天体の、公転周期が簡単な整数比になったとき、木星と彗星の相互接近の仕方が特別になるという事で発生する、流星群の帯にできる微細構造が根本原因となっており、天体力学の深い問題が係わっていると思われまます。

以上の意味で、今回の6月うしかい群らしき突発現象の様々な目撃情報は、今後、より貴重なものと見なされる時代があるいは来るかもしれません。

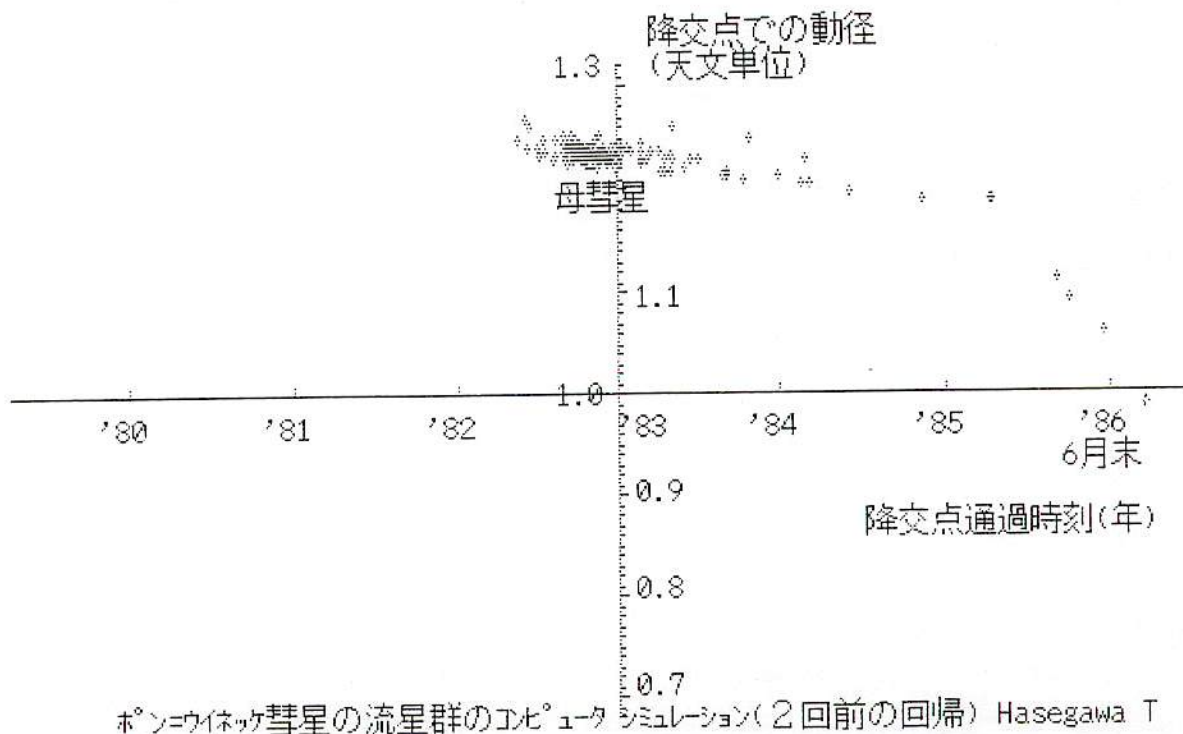
(以上)

MSS-089

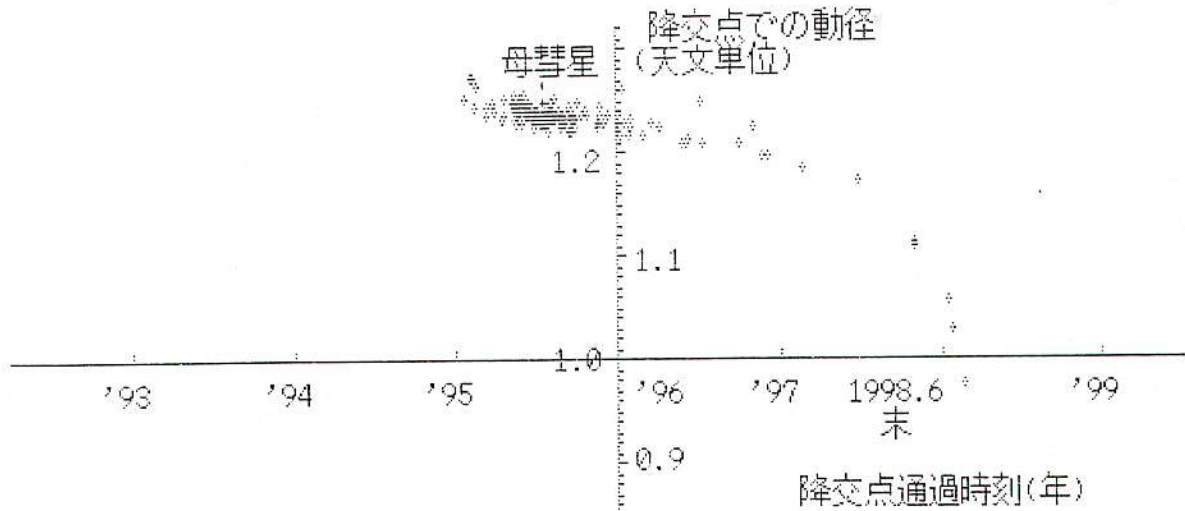


オランダの風景(突発日影)
録

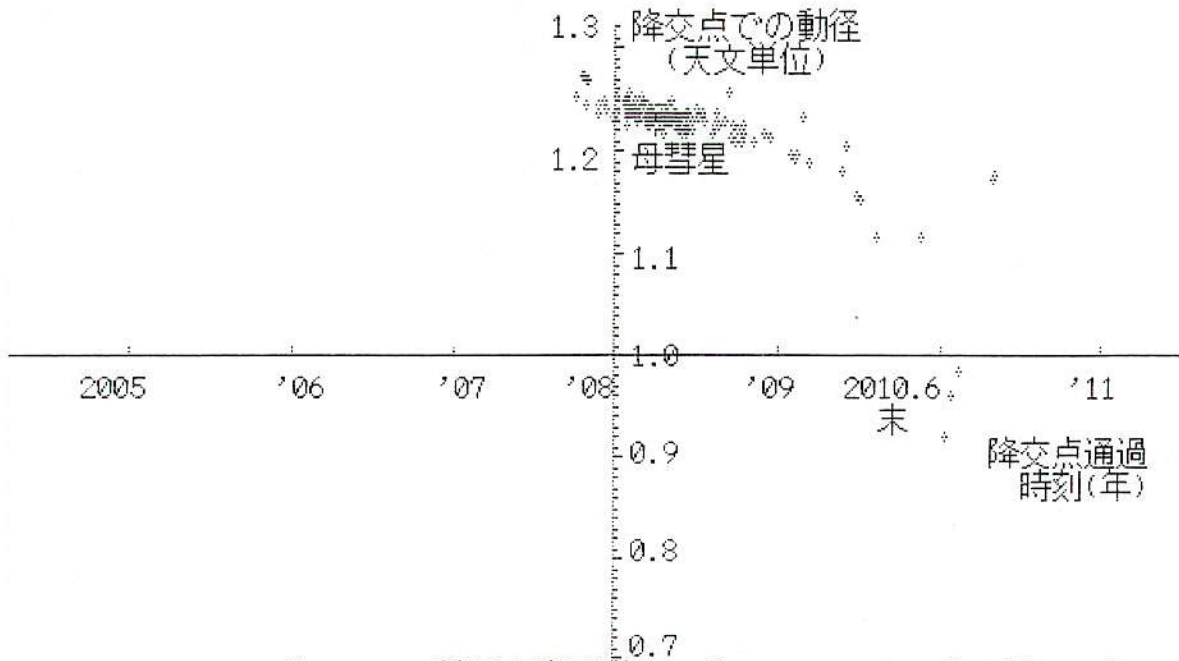
(長谷川 隆)



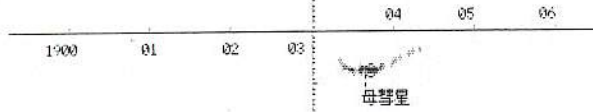
MSS-089



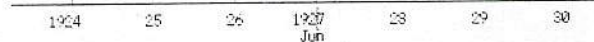
ポーン=ウイネック彗星の流星群のコンピュータ シミュレーション(今回の回帰) Hasegawa T('98/7/9)



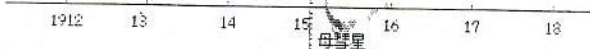
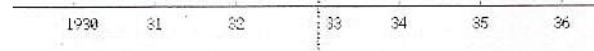
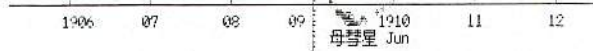
ポーン=ウイネック彗星の流星群のコンピュータ シミュレーション(2回後の回帰)



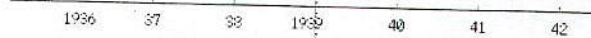
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



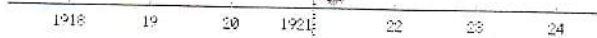
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



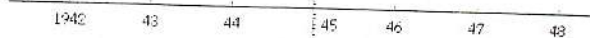
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



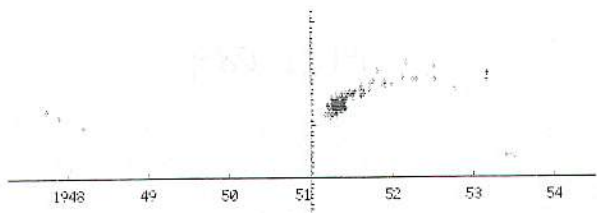
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



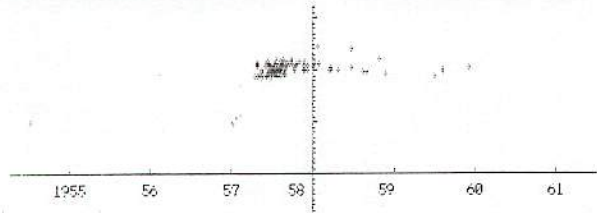
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%

MSS-089

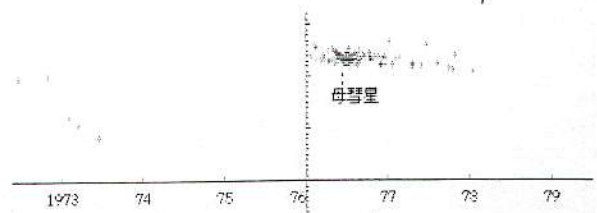
1942
 1943
 1944
 1945
 1946
 1947
 1948
 1949
 1950
 1951
 1952
 1953
 1954
 1955
 1956
 1957
 1958
 1959
 1960
 1961
 1962
 1963
 1964
 1965
 1966
 1967
 1968
 1969
 1970
 1971
 1972
 1973
 1974
 1975
 1976
 1977
 1978
 1979



load " auto go to list run% save " key print edit . cont%

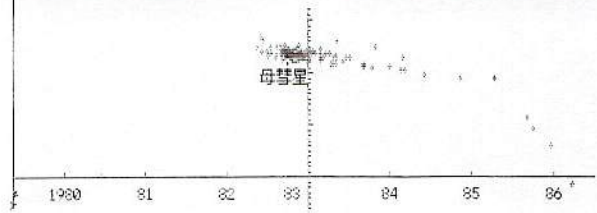


load " auto go to list run% save " key print edit . cont%

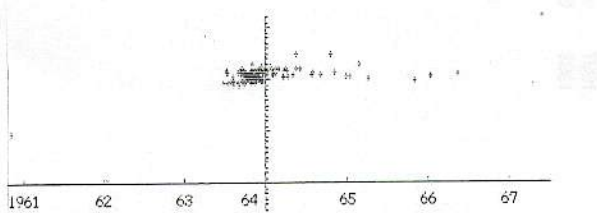


母彗星

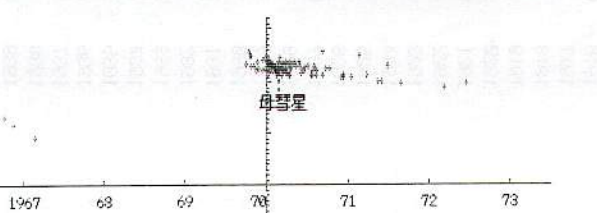
load " auto go to list run% save " key print edit . cont%



母彗星

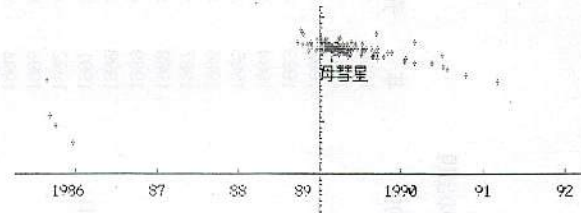


oad " auto go to list run% save " key print edit . cont%



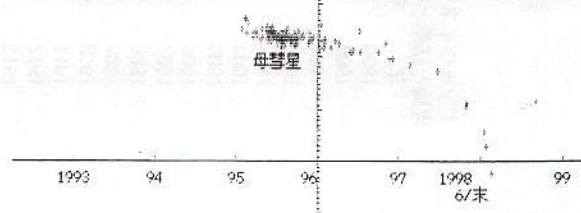
母彗星

oad " auto go to list run% save " key print edit . cont%



母彗星

load " auto go to list run% save " key print edit . com



母彗星

load " auto go to list run% save " key print edit . cont

6/末

ボン=ウイネック彗星関連流星群の出現
理論と結果との比較

年	予想	実際	理論的中	年	予想	実際	理論的中
1899	×	×	合	1980	×	×	合
1900	×	×	合	1981	×	×	合
1901	×	×	合	1982	×	×	合
1902	×	×	合	1983	×	×	合
1903	×	×	合	1984	×	×	合
1904	×	×	合	1985	×	×	合
1905	×	×	合	1986	×	×	合
1906	×	×	合	1987	×	×	合
1907	×	×	合	1988	×	×	合
1908	×	×	合	1989	×	×	合
1909	×	×	合	1990	×	×	合
1910	○	×	はずれ	1991	×	×	合
1911	×	×	合	1992	×	×	合
1912	×	×	合	1993	×	×	合
1913	×	×	合	1994	×	×	合
1914	×	×	合	1995	×	×	合
1915	×	×	合	1996	×	×	合
1916	○	○	合	1997	×	×	合
1917	×	×	合	1998	○	○	合
1918	×	×	合				
1919	×	×	合				
1920	×	×	合				
1921	○	○	合				
1922	×	×	合				
1923	×	×	合				
1924	×	×	合				
1925	×	×	合				
1926	×	×	合				
1927	○	○	合				
1928	×	×	合				
1929	×	×	合				
1930	×	×	合				
1931	×	×	合				
1932	×	×	合				
1933	×	×	合				
1934	×	×	合				
1935	×	×	合				
1936	×	×	合				
1937	×	×	合				
1938	×	×	合				
1939	×	×	合				
1940	×	×	合				

合致/年
的中率
99/100
99%

MSS-089

19k → 20k → 21k 2月18日(月)

for MSS(Ryusei Butsuri Seminar)2000/10/15 Hasegawa Takashi
表題: 1999年のしし座流星群の結果に関する私的情報
長谷川 隆

3 INET GATE INI00100 99/09/04 17:37
題名: RE: about Leo.meteor from T.Hasegawa 1999

Date: Sat, 4 Sep 1999 17:28:57 +0900
From: "Yoshihide Kozai" <kozai@th.nao.ac.jp>
To: "長谷川 隆" <MHG03405@nifty.ne.jp>

長谷川様

今日の便で、昨年はあまり流星が出ないで、今年はあるという理由、色々書いて貰いましたが、やはり皆を納得させることではないと思います。今年あるいは、流星雨になるかも知れませんが、これとは違った理由でかも知れません。今まで流星雨になった場合と同じだということが分れば、多くの人が納得するでしょう。私も色々なことを考えましたが、まだ昔の記録を再現出来ないで苦労しています。

.....
気になるのは、近日点で出たダストと限定したことで、現実には近日点から90度.....
も離れた場所でも尾が見えることもありますから、限定しない方がよいと思います。近日点からの角度を f とすれば、同じ速度で脱出すれば、近日点通過の遅れは、近日.....

点の場合の $f/2$ の \cos の自乗になるというのが、私の結論です。
また、太陽輻射圧の影響は、大きさ L mm のダストで、太陽引力は 0.0008 倍だけ減少したと同じ結果になります。ケプラーの第3法則はそれだけ変化し、 $L=1$ (1 mm の大きさ) では、近日点通過の時刻を、一公転周期あたり 230 日ほど遅らせませす。脱出速度が毎分 12 m の影響とほぼ同じことになります。だから、脱出速度 12 m とすれば、大きさ 1 mm のダストは、一公転あたり 450 日ほど近日点通過が遅れることになります。 $L=10$ なら輻射圧の影響はずっと小さくなり、遅れは 23 日ですみませす。

流星の人たちは、よく共鳴の話しをします。しかし、私に言わせれば、例えば木星の3倍の周期のダストがあれば、どの公転の時も木星との相対位置関係が同じで、従って振動は公転毎に加算され、振動が大きくなるのが共鳴です。それは、何公転も後の話しです。長谷川さんが見つけた木星の振動の違いは、彗星とダストが一番近く時の距離の差で、共鳴のためではないと思います。私などは、共鳴のため振動が大きくなったという記述を読むと、この論文はおかしいと思う癖があります。私は、20日過ぎまで、手紙への返事が遅れます。 古在由秀

点線は筆者が付けました。今にして思えば、この部分は「ピークの時間幅は、アッシャーの帯の任意の1本全体を、母彗星に近い部分と遠い先端部分とに分けて考えたときに、母彗星から離れていない、母彗星付近の部分に地球が当たるうちは、大きくブロードになるが、母彗星から離れて、フィラメントの先の方に地球が当たる場合は狭く鋭くなる。」と言い換えられるように、筆者には思えてなりません。出現ピークの時間幅をだらだらとさせてしまう、平均から離れる成分は、近日点から遠くで放出されるために、法線方向の初期放出速度成分があれば、それによる降交点黄径の平均との差が大きくなる成分ではないかと筆者は考えるからです。そしてそれは、古在氏によれば、近日点通過の遅れがあまり出ない、すなわち、アッシャーの帯の任意の1本で、先端ではなく母彗星に近い部分に多い成分であると結論されているからです。アッシャーの図を解釈すると、1999年の場合、11月18日11時のピークは、1899年ないし1932年形成の帯に、19日04時のピークは、1866

年形成の帯に出現予想時刻が近いと聞いています。この事と(2)を組み合わせると、(1)でのべたように、19日04時のピークが18日11時のピークに比較して出現分布幅が広がったのは、19日04時には、18日11時のピークには無かった、近日点から離れた地点で1866年の回帰時に放出された、初期放出速度ベクトルに、法線方向成分が少しある流星が見えたからという事になるのではと、脳裏に1999年のしし座流星群の流星出現の様子をまざまざと思い浮かべながら、筆者は想像しています。1999年の主極大のピークは、1899年や、1932年形成帯の、母彗星から見て遠い、フィラメントの先部分が地球と衝突しただけだったのでないでしょうか? そこには、もう近日点から離れた部分で放出される流星はほとんど無かったのだと筆者は想像します。

ところで、そのアッシャーによると、1733年に放出された帯が1866年と同程度の交差条件で、日本時間の18日未明からは最も近い時刻に、地球軌道と交差すると聞いています。問題は、日本では出現幅が狭くないと「立ち上がりすら見えない状況にあるという点」だと、筆者も思います。しかし、上の論が正しいと、ひよっとすると、この帯も、今年は1999年19日04時のピークのように、だらだらと出るかも知れないと期待しています。なぜなら1733年放出帯は、放出から8公転もしているために、母彗星の近日点通過から3年近くたった今年でさえ、長く伸びたフィラメント全体のうち、相対的に母彗星に近いと言える部分に、今年は地球が当たると期待されるからです。

1999年しし座流星群は流星雨となり、鋭いピークが出ました。しかしながらしし座流星雨の出現時間幅は、HR数千というレベルでは、少なくともいつも、2時間以内に終わる程度には鋭いとは限らないという、奥の深い話も聞いています。今後、地球と当たるのが、アッシャー帯の母彗星に近い根元か、あるいは先端か、という上の考察が、出現時間幅との相関という観点から注目され、歴史的流星雨のいろいろな出現時間幅の謎の解明が進む事を、筆者は陰ながら期待しています。 以上

注: 著者 1999年11月19日未明日本での観測地点=自宅
: 埼玉県越谷市東越谷6丁目-3-2-2 郵便番号343-0023
氏名 長谷川 隆

昨1999年は、幸い世界レベルでみればしし座流星群の当たり年となり、関心を持って現象に臨んだ方は、それぞれに個人の事情で固有の経験をされ悲喜こもごもだったと解釈しています。以下、「おまえはどうだったのか」との筆者に対する想定質問への御答えとして、下記2点を御報告します。

(1) 18日11時のピークは、19日4時のピークに比べて本当に鋭かった

1999年11月17日晩、日本時間の夜半まで、筆者は妻と、会社の永年勤続者の慰安旅行で、パリのドゴール空港に居ました。そこよりJALの成田行きの直行便で日本に向かい、9時ころバイカル湖の上空10km付近、11時にサハリン上空におりました。明るくなり流星が見えなくなったのは、日本時間の9時すぎです。この間11時すぎの著しい出現の、「前触れ」と言える「尻上がり増加」は、筆者が旅客機の窓に目を張りつけて、流星の飛び方を確認するというやり方では、少なくとも全く捉えられませんでした。IMOの集計でも、中国等の観測で、少なくとも2時間前の数が、11時すぎの極大期に比して、たいへん小さく出ていますが、11時に比べて小さいが、幾らか登り坂であったという事すら無いと認識しています。9時まで観測できたが、それ以後は見えなかった観測者には、本当に流星雨があったとは予想もできないほど、1999年11月18日11時(JST)のピークは、鋭く立ち上がったのです。幅が1時間強というIMOの発表を、その通りだと、自分の経験に照らし合わせて確信できる経験を、幸運にも私はさせてもらえました。

更に幸運な経験を、その晩旅行の疲れを押して、11月18日夜半すぎから19日の明け方、無論日本にある自宅より、しし群を観察する事により、私はする事ができました。輻射点が上がった0時すぎより、しし座流星群はHR数十程度でコンスタントに流れ、4時すぎまでその状態が続きました。なお筆者の場合、当日の確認の方法は、旅行で疲れた体に負担を掛けないように、ベットをベランダの端まで押し出して、寝転んだままベランダから流星群を眺めるという方法によりました。

この日の未明、輻射点が登場している間中、しし座流星群は活発だった事は、こうして私も脳裏にしっかりと焼き付けています。「未明」は4時間以上続きますから、この年の19日未明のピークが、18日11時すぎの主極大より、出現幅が広いと、私の場合、IMO等他人のデータを解析して引用しないでも、以上の自分の経験だけから、しっかりと確信する事ができます。自分の見たものから、次のしし群の出現を読んで備えるという事を仮にするとすれば、たとえるなら、以上のようなやりかたは、各地の観測点のデータを解析して天気予報を出す近代的方法ではなく、雲の動き等から自力で天気予報をする原始的な方法に、どちらかと言えば似ている事になります。が、それがもしかしら出来たかもしれない急所となるポイントに、偶然にも自分が常に居合せたのかも知れないと、旅客機の運行時刻が早過ぎたために主極大をはずした幸運を、深く感謝している今日このごろです。

(2) アッシャーの「帯」は古在由秀氏の研究が正しいとすると、出現時間幅が年が違っても、同じ帯なら一定と言う訳にはいかないのではないかと?

1999年9月の始め、国立天文台元台長の古在由秀博士が、筆者宛に以下の手紙を電子メールでくれました。一介のアマチュア天文家が、天文台の台長等を勤めた方から手紙をもらうのも珍しい事かもしれないので、全文を以下紹介します。

流星物理セミナー 1999/10/17

1999年のしし座流星群について

長谷川隆 (埼玉県越谷市)
 inet:mhg03405@nifty.ne.jp
 or lfe24018@biglobe.ne.jp

概要

1999年のしし座流星群について、1899年形成のダスト・チューブが1965年の回帰時のように、1998年の回帰時、1999年に地球軌道に接近していても、Dr. アッシャーの言うように、HR1500の流星雨には、とてもならないようにする事もできる事を発見したので報告する。

内容

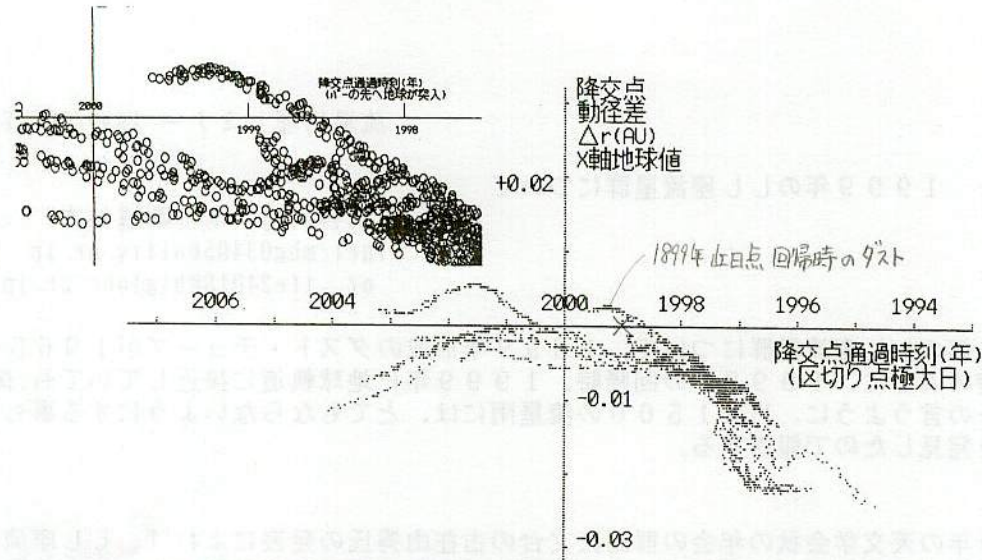
1999年の天文学会秋の年会の群馬天文台の古在由秀氏の発表によれば、しし座流星群のダストは、彗星コマに於いて、流星物質のダストが彗星のガス等の圧力等で初期相対速度を持つ場合とは別に、太陽の輻射圧を受けても、彗星より、また相互に拡散して行くという。これは、太陽の輻射の圧力により、太陽の万有引力が、ミリメートル・オーダーのダストの場合、全体の1万分の8の割合で減少したかに振る舞うため、公転周期が、放出瞬間に約半年、母彗星より長くなるためであると言う。(古在氏からの電子メールの説明。)

ところで、太陽の重力加速度が $8/10000$ 減るとするのは、軌道公転方向に、母彗星の公転速度の $4/10000$ に当たる $+16\text{m/sec}$ で、相対速度が付くのと、実は挙動に差はほとんどない。特殊相対性理論を思い出して時計を $4/10000$ だけ遅らせたと思像してほしい。この新しい t' 単位で、太陽の万有引力は、高次の差を除いて元と等しくなり、軌道運動の速度が元の $4/10000$ 倍増加する。この時計と、正しい時計とで、 $4/10000$ の歩度差では、テンペル=タトル彗星の公転周期をかけても、数日しか差がない。次の近日点通過時刻の数値は、どちらの時計を用いても、その程度の誤差しかなく置き換えが、流星雨の衝突予想に影響する大きさではない。実際の母彗星との間の半年の公転周期の差は、ほとんど流星物質の遠日点距離が、増加したためだけで起こっていると見れば、こう置き換えて良い事が理解しやすいだろう。

母彗星からの放出が、彗星ガス等のダストへの衝突の場合、ガスが吹き出すのが、一般には太陽方向と見るのが自然なため、流星雨を降らせるダストチューブには、一定の幅ができると想像される。なぜなら、降交点のみで母彗星からダストが出るとは限らないため、ここから離れた時刻に核より放出された流星物質の降交点での動径に、ある程度の幅ができると想像されるからである。そしてこれは、初期放出速度ベクトルが、太陽方向が核の進行方向に対して、概ね90度別の方向を向いているために、公転方向垂直成分が大きくなる事から来ている。仮に、Dr. アッシャーの言うように1998年回帰時、特定のダストチューブ、たとえば1899年回帰時放出された流星によって作られた帯が、1999年に地球軌道に 0.001AU 程度でかなり接近するようになれば、それはHR1000以上の流星雨を降らせる事が、上の理屈だけからはもっともらしいと、言えるのである。

所が、もしこの1899年チューブの拡散が、核から放出される時のダストの彗星核のガスによる圧力ではなく、太陽の輻射圧作用が、流星物質の直径や密度でばらばらになる事から主に起こっているとすると、様子は大きく異なってくる。冒頭にのべたように、輻射圧が作用した時、ほぼ公転方向に、初期放出ベクトルが加わったように作用するだけだからである。この時、放出が太陽方向であって公転方向に垂直なら、有ったはずの「チューブの太り」がほとんど無くなる。

SP0-234



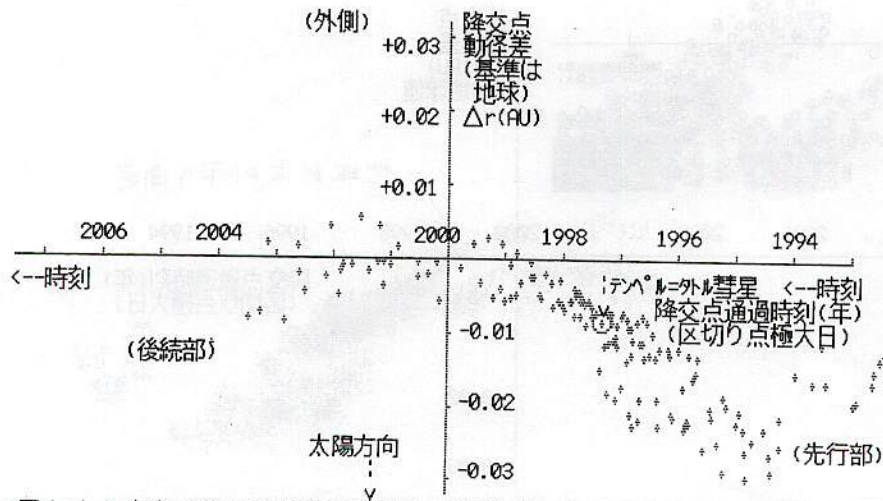
[図4]太陽輻射圧がダストの拡散に寄与する場合の流星雨域の形状(イメージ図)

1999 の出現はないという結論

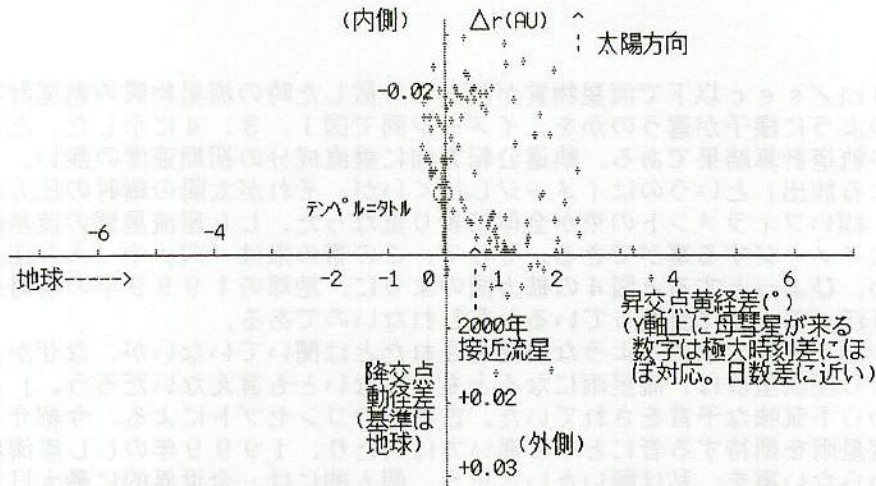
この事を、 20 m/sec 以下で流星物質が核から分散した時の流星物質の軌道計算結果を元に、どのように様子が違うのかを、イメージ画で図1、3、4に示した。ただし図1は、本物の軌道計算結果である。軌道公転方向に垂直成分の初期速度の無い、「彗星ガス圧による放出」というのはイメージしにくいですが、それが太陽の輻射の圧力なら簡単に起こり、細いフィラメントの束が全体に折り重なった、しし座流星群の流星雨帯を図4のようにイメージする事ができる。そして、この帯の束は「穴」や「入り江」を含んでいるため、ひよっとすると図4の拡大図のように、地球の1999年の通過点が運悪く、「入り江」の一つに当たっているかもしれないのである。

古在氏が、この図を計算で求めるような研究をされたとは聞いていないが、なぜか、「1999年のしし座流星群は、流星雨になるともならないとも言えないだろう。」と御自身の御研究から不気味な予言をされていた。古在氏のコンセプトによる、今紹介したアイデアが流星雨を期待する者にとって悪い方に当たり、1999年のしし座流星雨が空振りに終わらない事を、私は願いたいと思う。個人的には、全世界的に最大HR数十で終わるとしたら、いったいどんな場合なのだろうか、以前から真剣に考えてはいた。古在氏からの連絡で、それが解けたような気がする。たぶん、それが起こるとしたら、今のべたのが最も有りえる話だと、私は今思っているのだがどうだろうか。

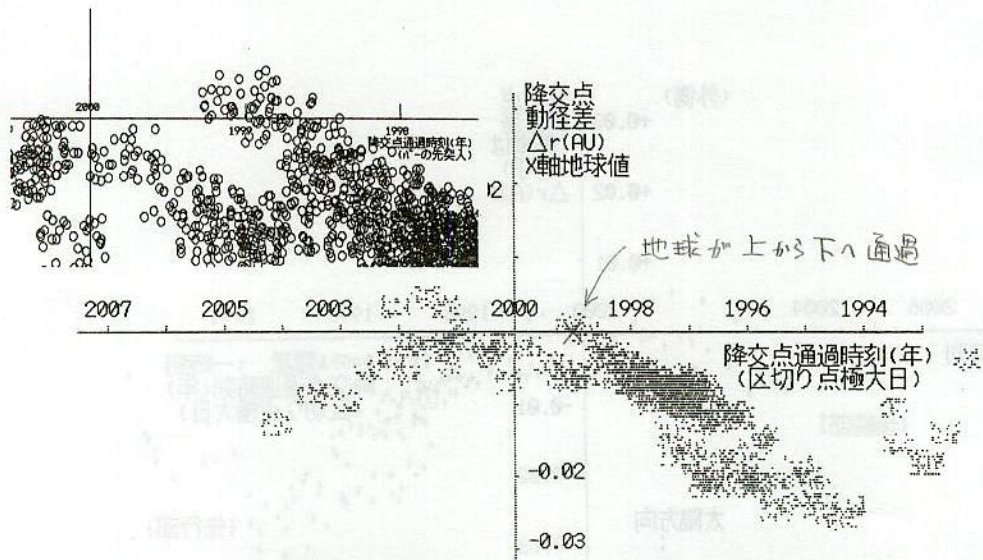
以上



〔図1〕しし座流星群1998年母彗星回帰時の流星物質分布計算結果(降交点通過t-動径)



〔図2〕しし座流星群1998年母彗星回帰時の流星物質分布計算結果(異交点黄経-動径)



〔図3〕ダストが彗星ガスの衝突圧力のみで拡散される場合の流星雨域の形状(イメージ図)

1999年は多少出るかも知れない
 彗星ガスは主に太陽の方向に吹き出す
 18m/s ダストとぶつかる

2002年 7月 7日

しし座流星群の軌道は一般相対論で計算すべきか？

長谷川 隆

しし座流星群の流星物質の軌道を、ニュートン力学で計算する試みは盛んである。他方、ニュートン力学は近似理論である事が知られている。アインシュタインの一般相対論で厳密に解くと、たとえば2002年の1866年放出帯の出現数に影響があるだろうか？ 時間をかけて、厳密に考える前に、こんな事を考える事自体に意味があるかどうかあたりをつける簡単な方法を考察したので報告する。

[1] ニュートン力学の誤差の原理

重力は空間の歪みであり、それを逆2乗法則で近似するから誤差があるのだと言ってしまうおしまいが、それでは誤差が具体的にどんな数値なのか、想像するのは難しい。次のように考えた方が良さしい。「重力は万有の力である。従って重力は重力自身に働く。重力は天体間の距離が小さいと大きくなるから、太陽と流星物質との間の重力を考えた場合、太陽とく太陽と流星物質間の重力に働く付加的な重力は、流星物質が太陽に近づくと、雪だるま式に増加する。」確かめた事はないが、恐らく、ニュートン力学からの軌道のずれは、流星物質の近日点距離に、だいたい依存するだけだろうというのは、この考えから容易に想像できる。他方流星物質ではなくて惑星の場合、近日点経度が、理論間で差分前進（一般相対論—ニュートン近似）する事は良く知られており、大きさは次の通りになる。

距離 (天文単位)	100年の値 (角度の秒)	(惑星)
0.4 AU	43秒	水星
0.6 AU	9秒	金星
1.0 AU	4秒	地球

考えてみるかどうかのあたりをつける程度なら、近日点経度が前進する影響が出るのが両理論の差のすべてと考えて、チェックしてみれば充分だろう。

また、近い惑星の値で流星の場合代用してチェックすれば充分だろう。

[2] チェックのための計算方法の近似

チェックするにしても、その計算がやたらに複雑ではめんどうである。よって、ケプラーの楕円軌道ではなく、コペルニクスの円の組み合わせ軌道間で差分を取り、その差で代用する。アインシュタインからケプラーへ、さらにコペルニクスの周転円へと、近似はひどく粗くなったが、その差分は微細であり、差分の誤差は差分に対してまあ小さいと考えられる。

図のように、順行軌道の場合、北半球から見て、コペルニクスの太陽系天体は、軌道半長径の上を等速で動く平均天体支点を中心として、軌道半長径に離心率をかけた半径の周転円上を等速で時計回りに運行する。逆行軌道の場合は、回転の向きがそれぞれ反対となる。位相は近日点で太陽に一番近い点である。円軌道に近い場合はかなり良い近似だが、流星物質のように離心率が大きい天体の場合は、相対論を持ち出すかどうかのチェックに使える程度だろう。

よって、近日点経度にdラジアンだけの差が出来たとすれば、一般相対論の計算とニュートン力学の計算とで、コペルニクスの周点円上で位相差がdラジアンだけできると置き換えられるから、位置の誤差等は幾何学的計算だけでいとも簡単になる。

[3] 例：水星の太陽面経過の潜入時刻の誤差

ルベリエがバルカン星を探している時点で、水星の軌道観測の歴史は200年になつていたと言う。従って、水星の近日点経度には角度で86秒の誤差があった事になる。

水星の軌道要素を概略示すと次の通り：

- 軌道半長径：0.4 AU 離心率：0.2
- 昇交点黄経：47度44分
- 近日点黄経100年当たり全体変動：約510秒（相対論効果うち43秒）
- 軌道傾斜：7度
- 近日点引数：30度 近日点引数100年当たり変化：1度弱
- 1950年の年初位置：318度

幾何学的計算から、
地球から見た位置角度誤差

$$= \text{周天円位相差} * \text{水星軌道離心率} * \text{水星軌道半径} / \text{地球水星間距離}$$

$$= 86 \text{ 秒} * |\cos(\text{太陽面経過時近日点角})|$$

$$= 10 \text{ 秒} * 0.2 * 0.4 \text{ AU} / (1 - 0.4) * |\cos(360 - 30)|$$

となる。水星の視直径が11秒前後だから、ほぼその程度のずれ、1970年5月9日の水星の太陽面経過のように、太陽の中心付近を通る食の時、ほぼ、時刻の3分程度の潜入時刻のずれ（ニュートン力学が遠日点経過の場合は遅れる）と進む
なる。この計算は、厳密に楕円幾何学計算をしたときと大きな差はないようである。

[4] しし座流星群1866年（133年前流星）の降交点における動径差

テンペル=タトル彗星の軌道要素の概略は次の通り：

- 軌道半長径：1.0 au 離心率：0.9
- 近日点距離：1 au弱
- 昇交点黄経：232度 軌道傾斜：160度
- 近日点引数：170度 1998年近日点回帰：2月28日
- \tan （降交点黄経における離心近日点角/2）

$$= \left(\frac{1-e}{1+e} \right)^{1/2} * \tan(\text{降交点黄経における真近日点角}/2)$$

$$= (0.1/1.9)^{1/2} * \tan(10/2)$$

5月の水星太陽面経過

= 0.02

降交点黄経における離心近日点角/2 = 1.15度

降交点黄経における離心近日点角 = 2.3度

動径差

$$= \text{軌道半長径} * \text{離心率} * \text{経度(黄経)}$$

$$* \text{地球の133年の近日点引数ズレのラジアン単位角度}$$

$$* \sin(\text{降交点黄経における離心近日点角})$$

$$= 1.0 * 0.9 * 1.33 * (4/3600 * 3.1416/180) * \sin(2.3) = 0.00001 \text{ (au)} \text{ (10万分の1 au)}$$



どうやら、一般相対論の効果は、アッシャーの流星出現予想にはとてあえず影響ないようである。

1975年01月04日明け方日本における四分儀の大出現は、ひよっとすると小惑星2003EH1が母天体である何よりの証拠なのではなかったのか？

長谷川 隆

TEL 048-965-1686

(e-MAIL間もなくaddress変更)

発表概要 1975年01月04日の日本時間で00時から05時ころ迄、ひどい月明かりの中、更には平均的な極大時刻よりも明らかに、数時間程度早いにもかかわらず、四分儀座流星群は、レコード的な出現だった事は、実際に見た、太平洋側の日本人なら疑う者も無い所だろう。もしかすると、四分儀とはそう言う気紛れなものだという先入観の為に、不思議とは感じられにくいこの大出現の記憶は、それぞれ見た者が後世に残す努力を怠るべきでは無い、重要な知見を含んでいるのかもしれない。と言いつても、1975年の01月04日の明け方日本で、ひどい月明かりでかつ予想極大よりだいぶ早いにもかかわらず、四分儀が特に多く出現したという事実が、実は2003年に発見された、母天体と疑われている小惑星=2003EH1が、確かに四分儀座流星群の母天体であると言う、他ならぬ有力な証拠になるかもしれないからである。

本文 小惑星2003EH1は、降交点動径が、地球より0.21天文単位ほど遠い事を除いては、四分儀座流星群の軌道と全く良く似ている。が特に興味を引くのは、それ自身の公転周期が約5.53年であってかつ、その15公転で周期的に2回、ペアで木星に近づく事である。小惑星としてはたぶん破格だと思うが、接近距離は最も条件の良いときには、木星との間で僅か0.25天文単位以下までになる。ただし、ペアとなる接近同志の間に、木星に近づかない遠日点通過が1回入る。

ここでポイントは、前回の木星への大接近が、1972年10月23日で、ほぼ最も条件の良い、互いの接近距離約0.25天文単位だったと言う事である。母天体の回りにには、濃厚なダストの塊がたむろしているとすると、それらの地球軌道への交差条件は、この大接近によって、急に変わったと考えるのが、今にして思えば全く自然である。

その為、接近から2-3年ほどのちに、そうした軌道の変化したダストが地球に届くので、

1) いつものより流星の出現数が顕著に多くなるか、または異常に少なくなる。
2) いつとも極大時刻がずれた位置に、見慣れない顕著なピークが現れる。
2) 1)と2)のいずれか一方、またはその両方が起こるのではないかと予想する事に、21世紀の今は、不自然さは全く無いであろう。
そのようなイベントは、従って1975年や1976年に有ってもおかしくは無い。ただし、1)も2)も、天候に恵まれ、たまたまそのイベントに当たる条件の経度や国に居ないと、北半球の中緯度以北であっても無く、存在しずらく全く気が付かない。1975年01月04日明け方、平均的な極大時刻より約1/4日以前の日本で盛んな出現は、たまたま太平洋の西の外れで見たい我々が、幸運にも出会ったそうした類の現象で無いとしたら、あれはいい角度の10度ないし20度程度大きく他の軌道要素の同じダスト、すなわち、降交点通過時刻が、母天体より2か月から数か月程度早い1975年の正月に地球の近くに來る軌道のダストは、1972年10月23日前後の、その時限りの摂星動(すなわち永年的では無い、一回ぼっきりの摂動)によって、軌道後方の木星から、進む方向とは反対向きに、引きずり戻され、その結果近日点距離や降交点位置での動径が小さくなり、かつ、昇交点黄経が後退する、すなわち、流星の出現時刻が極大時刻より早まる(極大時刻前に、別のピークになる)ような力を受けている事をパソコン等で確かめるのは、今では我々アマチュアでも、良く知られているように極めて容易であろう。(注1)

当時の日本から外国へ大出現情報を明確に流すネットワークも無かったから、当時の日本流星研究会の幹事(藪保男氏)に、こうした大出現の情報を全世界へ流す「公報の全責任」を負わせる事は適切ではない態度だと思ふ。そうでなく、たまたま現象に遭遇した、中高年以上の主として太平洋岸在住の日本人は、この1975年の現象を、我々の祖先がしばしばそうしたように、ことあるごとに他人に伝える努力の義務があると、事の重大性(母天体の識別)から見て私にはありと感ぜられるのである。

思えば今では我が国と、国際競争力を争うまでに経済成長を遂げた中華人民共和国等も、1975年の当時は、確か毛沢東路線の継承か、現実路線への転換か

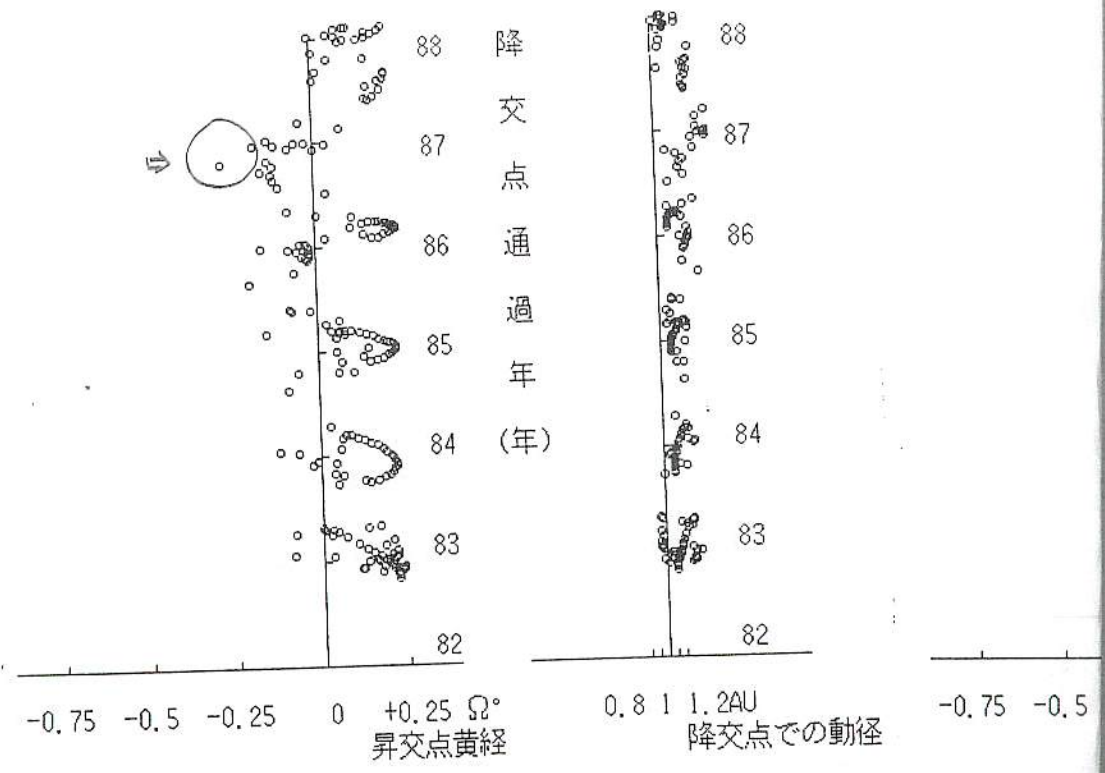
でも、経済的には一般人が流星を研究的に眺めると言うような余裕が、
と、思えない時代であり、更には日本に、太平洋岸よりも寒く、観測に
件、このとき観念する。だか、元分儀を見、妥当で、誰に言っただけあちのちの
か、研究・組織的、四、四分儀を、具体的に、私人に、判断が、難し。が、展の、
け、組織的、四分儀を、具体的に、私人に、判断が、難し。が、展の、
と、考、え、ら、れ、な、い、情、報、を、具、体、に、私、人、に、判、断、が、難、し、い、が、
良、い、の、よ、う、な、情、報、を、具、体、に、私、人、に、判、断、が、難、し、い、が、
に、流、す、と、い、う、の、大、出、現、現、象、に、ま、た、ま、遭、遇、し、た、こ、れ、か、ら、い、ろ、い、ろ、な、所、で、あ、の、時、の、大、出、現、と
四、分、儀、の、大、出、現、現、象、に、ま、た、ま、遭、遇、し、た、こ、れ、か、ら、い、ろ、い、ろ、な、所、で、あ、の、時、の、大、出、現、と
当、時、の、話、を、取、り、上、げ、て、い、く、と、考、え、ら、れ、な、い、情、報、を、具、体、に、私、人、に、判、断、が、難、し、い、が、
の、話、を、取、り、上、げ、て、い、く、と、考、え、ら、れ、な、い、情、報、を、具、体、に、私、人、に、判、断、が、難、し、い、が、
して、我、々、の、話、を、取、り、上、げ、て、い、く、と、考、え、ら、れ、な、い、情、報、を、具、体、に、私、人、に、判、断、が、難、し、い、が、

以上

注1：なるお、カメラやテレビでの軌道要素の測定に連して、他の軌道要素がど
う変わるのか、と言、う、件、に、つ、い、て、は、大、塚、勝、仁、渡、部、潤、一、吉、川、真、の、各、氏、が、
1987年の四、分、儀、の、軌、道、の、観、測、結、果、に、基、づ、い、て、日、本、で、は、良、く、知、ら、れ、て、い、る、
問、い、合、わ、せ、い、た、だ、き、た、い、く、も、1987年、に、出、現、し、た、大、出、現、に、匹、敵、し、た、
よ、う、に、本、文、で、説、明、し、て、い、る、1975年、の、大、出、現、に、匹、敵、し、た、
日、程、度、前、に、あ、っ、た、と、い、う、点、で、良、く、似、た、四、分、儀、座、流、星、群、の、大、出、現、が、あ、り、
な、ら、1987年、の、と、同、し、の、四、分、儀、群、の、流、星、に、つ、い、て、仮、に、彼、ら、が、観、測、を、行、っ、て、
1987年、に、1975年、に、似、た、現、象、が、起、こ、っ、た、の、は、1972年、の、木、星、に、対、す、
る、接、近、イ、ベ、ン、ト、の、ペ、ア、ー、の、相、方、が、筆、者、は、詳、し、く、確、認、し、て、い、る、
10月23日、か、ら、見、て、2003年、E、H、1、の、約、2、公、転、後、に、も、う、一、度、あ、っ、た、か、ら、
と、考、え、ら、れ、ば、充、分、説、明、が、付、く、の、で、は、な、い、か、と、考、え、て、い、る。

(参考文献) 当時の雑誌等には上記イベントは当然載っていますが、成書で邦文
でそれを記載したものは、ざっと見た限り見当たりません。たまたま
余り流星関係の書籍が出版されなかった、1972年以降の流星
関連書籍発行の低迷「はざかい期」に、上記は運悪く起こった現象
のように思えます。

公転周期が木星の5/11の軌道から出発した四分儀群の軌道分布 (その2)



何かキーを押してください

360 - 167.1

$P = 5.39_y$ $\Omega = 167.1$ 残 Hirose
 (171.1 - 4.0)

何かキーを押して

$\theta = 5.0$

長谷川 隆
 (流星物理
 セミナ 1997.4.12)

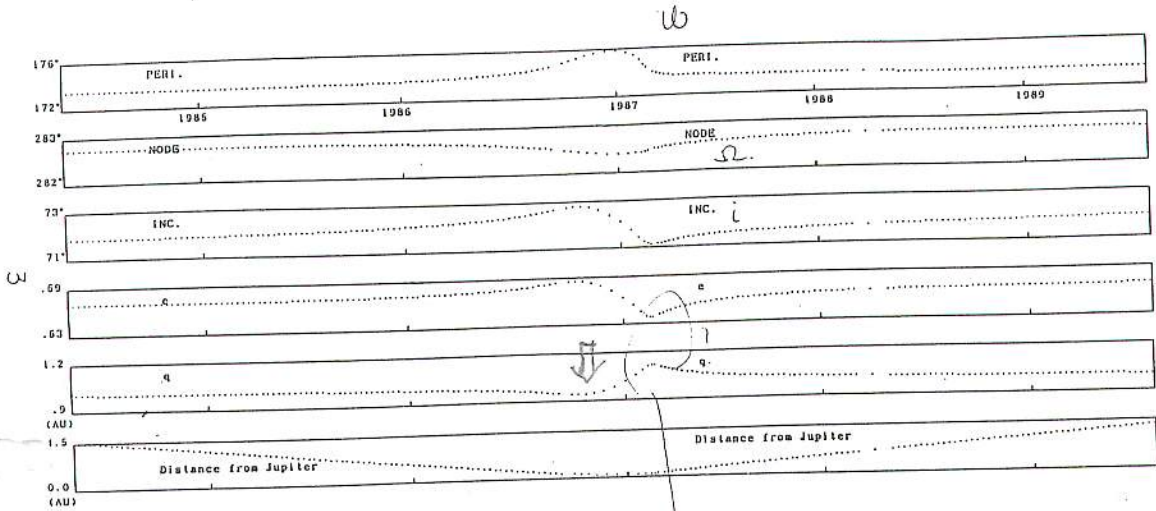


図2 本流各点の一回帰後の軌道進化と木星との最近距離

日高英治 (流星物理)

セミナ 1990.7.15)

遠日点の位置 (対称の形になっている)

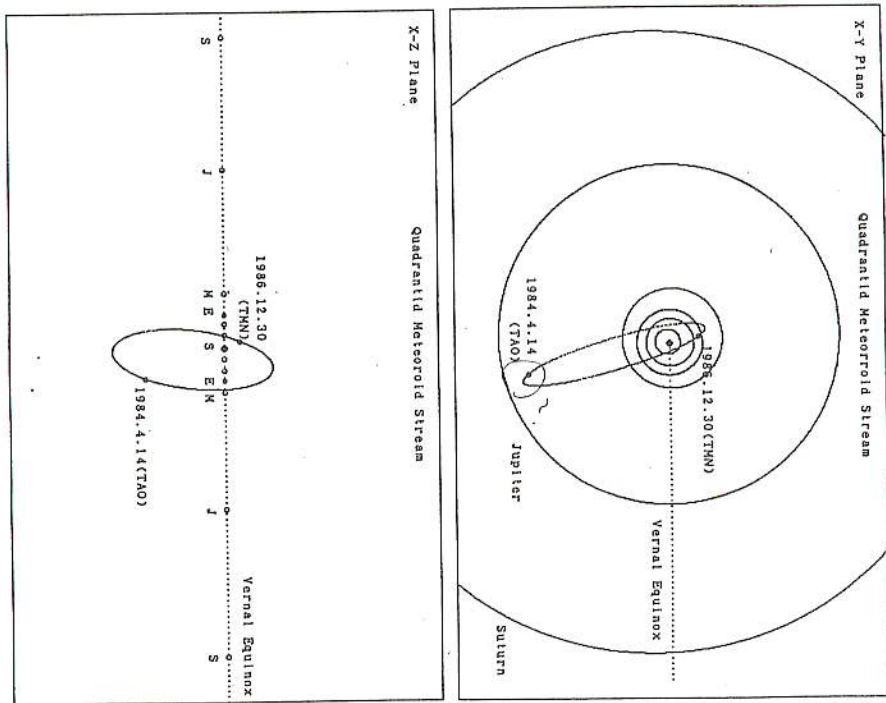


図3 TAOとTMNで観測された流星物質の軌道上の相対位置

ダスト・トレイルによる、1956年のほうおう群突発出現の検証

佐藤 幹哉

(※本内容の詳細は、PASJに J. Watanabe, M. Sato, T. Kasuga で投稿中)

【概要】

ほうおう群は、1956年12月5日に突発出現した流星群で、この年以外では、顕著な活動がない。母天体候補として P/Blanpain (1819 W1) が挙げられていたが、最近発見された小惑星 2003 WY25 がこの天体の再来として確定的となった。

この結果、軌道が明らかになったため過去に放出されたダスト・トレイルを計算し、1956年のほうおう群の活動状況を検証することを試みた。

【1956年の出現状況】

- 出現期間：ニュージーランド 10h10m (UT)～南アフリカ 22h45m (UT)

GARY W.KRONK'S COMETS & METEOR SHOWERS (web)より

- オーストラリア 13h, 13h30m(UT) HR60 以上

Shain, C.A. 1957, Observatory, 77, 27 より

- インド洋上 (南極観測船・宗谷の船上)

13h40m～18h 極大は 16h30 (UT) で HR=300

Huruhata, M., & Nakamura, J. 1957, Tokyo Astron. Bull. Second ser. No. 99, 1053 より

14h(UT)	HR=100
15h	HR=100
16h	HR=200
16h30m	HR=300
17h	HR=100

【ダスト・トレイルの計算結果】

1743年～1951年の近日点通過時に放出したと仮定、放出速度±20m/sの条件で計算した。

表1に fM 値>0.01、距離<0.005AUのものをもとめた。またトレイルと地球軌道の位置関係を図1に示した。

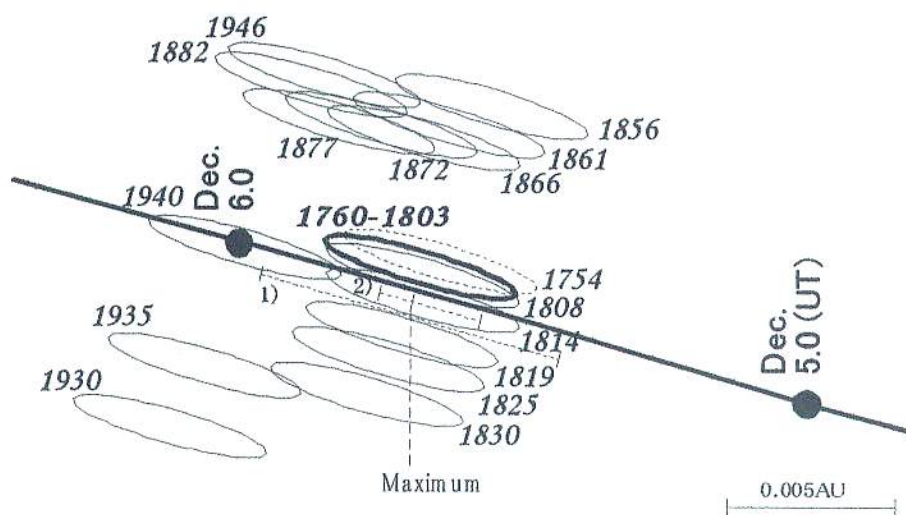


図1 1956年におけるトレイルの分布状況

1) Gary W. Kronk's Comets and Meteor Showersによる流星出現期間
 2) 古畑ら(Tokyo Astronomical Bulletin, 1956, P1053)による流星出現期間及び極大
 ※トレイルは直径0.001[AU]と仮定して図示。

表1 トレイルのデータ

放出年	Date(UT)	Time	LS(2000)	Δr (AU)	放出速度 (m/s)	Δa	fM	輻射点 α δ		速度 (km/s)	備考
1. 1743-1754年											
1754	1956/12/05.66	15:54	254.116	+0.00092	+0.28	0.000	0.010	3.63	-42.03	10.47	
2. 1760-1808年(主極大)											
1760	1956/12/05.69	16:37	254.147	+0.00054	+0.68	0.001	0.025	3.56	-41.95	10.47	
1766	1956/12/05.69	16:39	254.148	+0.00061	+0.62	0.001	0.023	3.55	-41.93	10.46	
1771	1956/12/05.69	16:40	254.149	+0.00065	+0.54	0.000	0.021	3.54	-41.91	10.46	
1776	1956/12/05.69	16:39	254.148	+0.00067	+0.52	0.000	0.020	3.54	-41.89	10.46	
1782	1956/12/05.69	16:38	254.148	+0.00067	+0.50	0.000	0.021	3.53	-41.87	10.46	
1787	1956/12/05.69	16:37	254.146	+0.00068	+0.49	0.000	0.021	3.53	-41.86	10.45	
1792	1956/12/05.69	16:35	254.145	+0.00068	+0.49	0.000	0.020	3.52	-41.84	10.45	
1797	1956/12/05.69	16:33	254.144	+0.00067	+0.49	0.000	0.021	3.52	-41.82	10.45	
1803	1956/12/05.69	16:30	254.142	+0.00065	+0.50	0.000	0.021	3.51	-41.80	10.45	
1808	1956/12/05.68	16:26	254.139	+0.00045	+0.73	0.001	0.031	3.50	-41.79	10.45	
3. 1814-1830年(やや濃い)											
1814	1956/12/05.67	16:08	254.127	-0.00022	+1.46	0.001	0.063	3.46	-41.73	10.47	*1
1819	1956/12/05.69	16:35	254.146	-0.0014	+2.21	0.002	0.095	3.23	-41.63	10.48	*1
1825	1956/12/05.70	16:51	254.157	-0.0021	+2.77	0.002	0.12	3.17	-41.61	10.49	
1830	1956/12/05.72	17:19	254.176	-0.0033	+3.85	0.003	0.20	3.07	-41.55	10.50	
4. 1861-1882年(濃い距離が遠い)											
1861	1956/12/05.71	17:02	254.165	+0.0049	-4.37	-0.004	0.21	3.71	-42.04	10.34	
1866	1956/12/05.75	17:54	254.201	+0.0044	-3.69	-0.003	0.20	3.63	-42.06	10.36	
1872	1956/12/05.82	19:41	254.276	+0.0044	-3.79	-0.003	0.24	3.49	-42.14	10.36	
1877	1956/12/05.89	21:26	254.351	+0.0041	-3.97	-0.003	0.22	3.32	-42.19	10.36	
1882	1956/12/05.96	22:57	254.414	+0.0050	-4.49	-0.004	0.14	3.20	-42.33	10.35	
5. 1935-1940年(新しいトレイル)											
1935	1956/12/06.00	00:01	254.460	-0.0037	+18.83	0.016	0.29	2.42	-41.59	10.50	
1940	1956/12/05.99	23:44	254.448	-0.00013	+21.09	0.017	0.37	2.69	-41.69	10.44	*2

*1: 副極大を形成する可能性があるトレイル

*2: 放出速度が20m/s以上であるが、距離が近いため掲載

【計算結果概要】

- ・1754年以前のトレイルはfM値が小さく、関与が薄い
- ・1760年～1808年のトレイルが0.0007AU以内に接近。時刻も15分以内→主極大を形成する。
放出速度は1m/s以下→大きいダストが多く含まれ、火球クラスが期待される
- ・1814年、1819年トレイルも条件が良い→副極大を形成する可能性がある。
1814年は好条件
1819年は距離が離れ(0.0014AU)、また時刻が主極大と分離しづらい。
- ・1861年～1882年のトレイルは濃い(fM値0.14～0.24)が、距離が遠い(0.004AU以上)ため関与は薄い。
- ・1940年トレイルは距離が大変近いが、放出速度が大きい。また彗星活動時期も考慮する必要あり。

【実際の観測結果】(Huruhataら1957より)

- ・極大は16h30m頃 → 1760～1808年の極大とほぼ一致(1819年も同様)
- ・ほとんどの流星が明るく、顕著な痕を残した。また16h34mには満月級の火球が出現
→ 放出速度が小さいというトレイルの結果と一致
- ・極大前の方が極大後より若干流星数が多い(16h HR=200, 17h HR=100)
→ 1814年のトレイルが関与した可能性がある(極大予想16h08m)

【懸案事項：輻射点の不一致】

計算された輻射点と、実際に観測された輻射点に 10 数度の誤差がある。

→ 現時点では解明できない。今後の課題。

表2 輻射点の差

計算値*1		計算値(修正値*2)		観測値		差	
α	δ	観測地	α	δ	α		δ
3.5 (J2000.0)	-41.8	インド洋*3	10.5 (B1950.0)	-37.0	356 (分点不明)	-43	約13度
4.1 (B1950.0)	-41.5	シドニー*4	15.5 (B1950.0)	-43.0	15 (分点不明)	-58	約15度

- *1 1808年トレイルの場合
- *2 天頂引力・地球の自転の影響を含めて計算
- *3 Huruhataら 1957より
- *4 Shain,C.A. 1957より

インド洋での観測 → 星図に記録していないため、誤差があると記載されている。

シドニーでの観測 → 5度以内の精度があると記載されている。

【期待される今後の出現】

2014年にまとまった出現が期待される。ただし、放出年が比較的新しい。

→ その時点において彗星活動が続いていたかどうかはわからない。

表3 トレイルのデータ(2014年)

放出年	Date(UT)	Time	LS(2000)	Δr (AU)	放出速度 (m/s)	Δa	fM	輻射点		速度 (km/s)	備考
								α	δ		
1835	2014/12/01.96	23:09	249.475	-0.0015	-0.88	-0.001	0.011	7.79	-27.24	9.84	
1840	2014/12/02.01	00:14	249.521	+0.0013	-3.69	-0.003	0.015	8.06	-27.60	9.79	
1882	2014/12/01.90	21:36	249.410	-0.0039	+0.97	0.001	0.011	7.51	-26.83	9.87	
1898	2014/12/02.25	06:02	249.766	+0.0046	-3.40	-0.003	0.052	8.45	-28.60	9.75	
1903	2014/12/02.11	02:38	249.622	+0.0017	-2.42	-0.002	0.030	8.17	-27.95	9.79	
1909	2014/12/02.02	00:26	249.530	+0.00015	-1.76	-0.001	0.021	7.99	-27.55	9.82	*1
1914	2014/12/01.96	23:02	249.470	-0.00074	-1.28	-0.001	0.016	7.88	-27.32	9.83	*1
1919	2014/12/01.97	23:14	249.479	-0.00050	-2.03	-0.002	0.025	7.90	-27.34	9.83	*1
1925	2014/12/02.00	23:58	249.510	+0.0000026	-2.40	-0.002	0.028	7.95	-27.42	9.82	*1
1930	2014/12/02.05	01:07	249.559	+0.00086	-3.03	-0.002	0.034	8.02	-27.57	9.80	*1
1935	2014/12/02.13	03:13	249.647	+0.0026	-4.27	-0.004	0.046	8.16	-27.87	9.76	

*1: 距離0.001AU以内で好条件

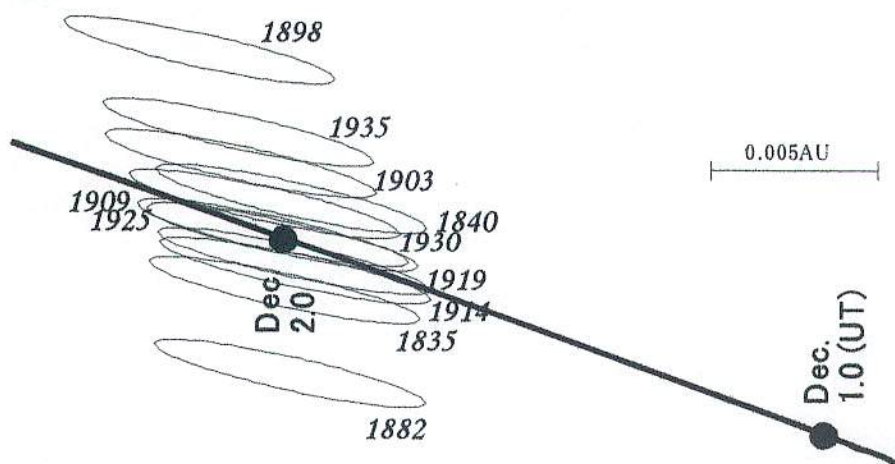
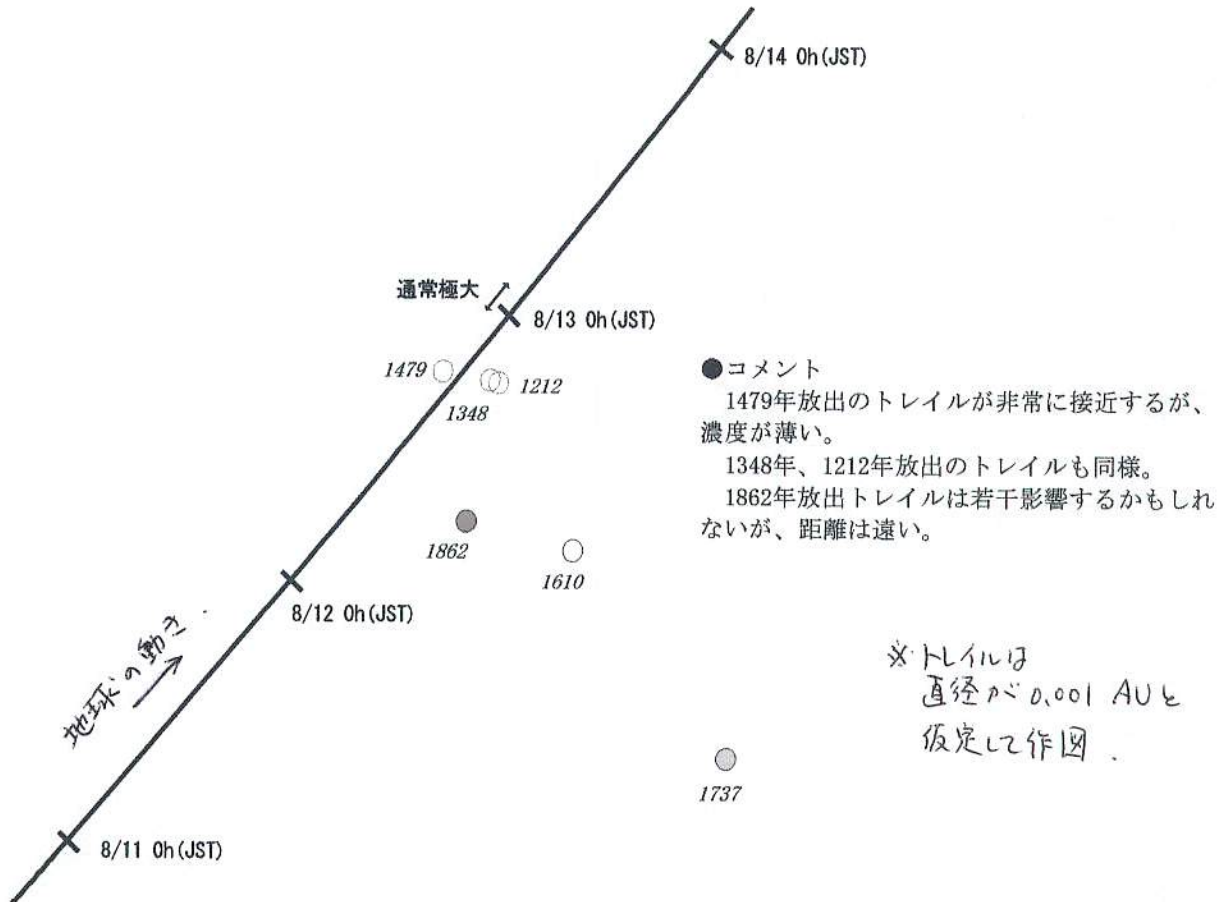


図2 2014年におけるトレイルの分布状況

2005年のペルセ群のトレイルの分布状況

佐藤 幹哉

MSS-110
軌道シミュレーション



放出年	Date(UT)	Time	JST	LS(2000)	Δr (AU)	放出速度(m/s)	Δa	fM	α	δ	V(km/s)
1862	2005/08/12.10	02:18	08/12 11:18	139.414	+0.0048	+23.09	1.583	1.0	45.95	+57.73	59.32
1737	2005/08/12.08	01:56	08/12 10:56	139.400	+0.022	+20.63	1.326	0.52	46.16	+57.38	59.08
1610	2005/08/12.23	05:35	08/12 14:35	139.546	+0.0098	+11.70	0.758	0.035	45.92	+57.51	59.31
1479	2005/08/12.37	08:58	08/12 17:58	139.681	-0.00087	+4.88	0.322	0.0062	45.87	+57.67	59.49
1348	2005/08/12.45	10:46	08/12 19:46	139.753	+0.0013	+2.22	0.147	0.0022	45.92	+57.71	59.43
1212	2005/08/12.46	11:00	08/12 20:00	139.762	+0.0017	+1.15	0.078	0.00095	45.89	+57.72	59.41

●通常極大 (非常に古く放出された流星物質?)

LS = 139.9~140.0° 8/12 23:30 ~ 8/13 2:00 (JST)

→日本では通常極大の観測条件がよい。

しし座流星群の2005年のダストトレイル分布

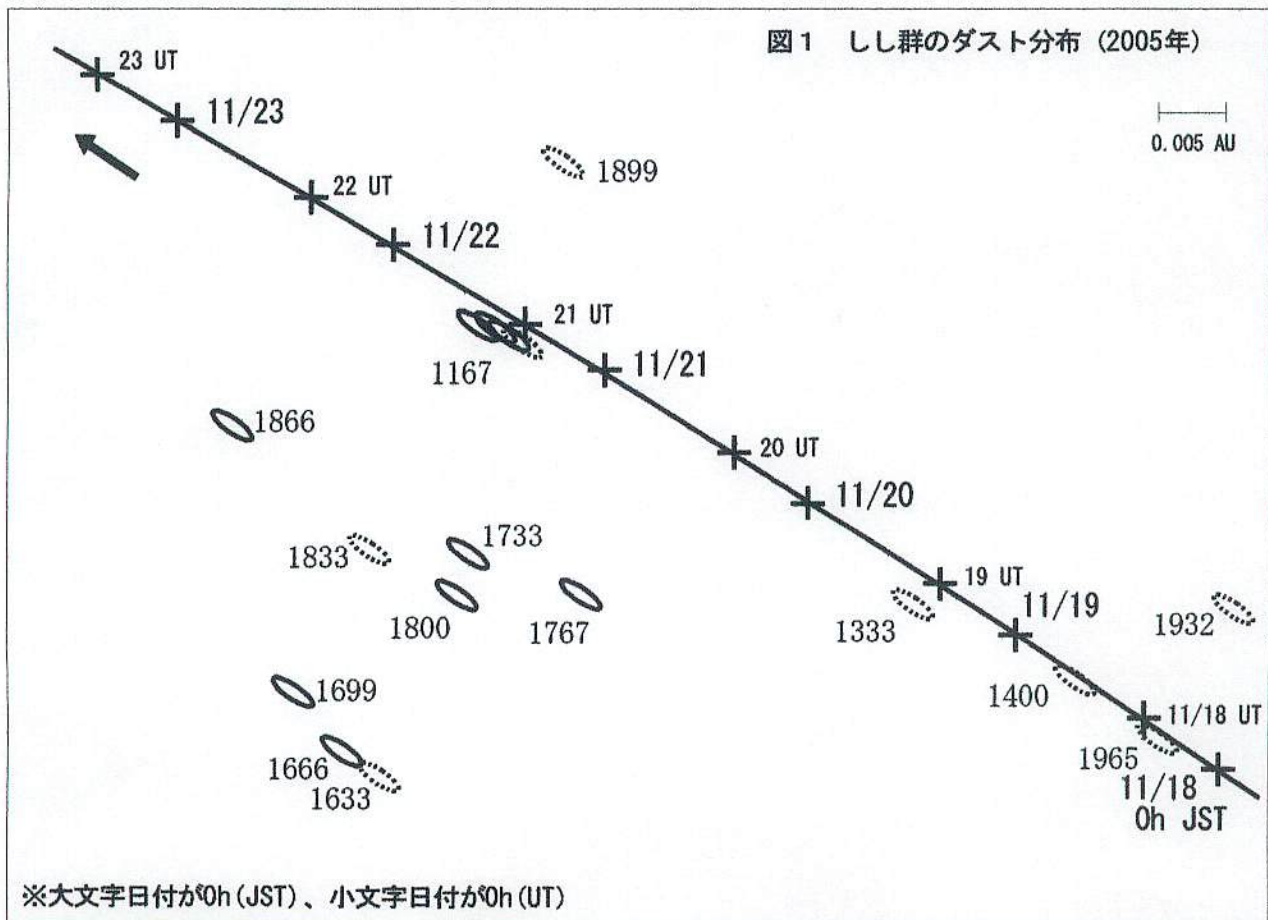
～佐藤 幹哉～

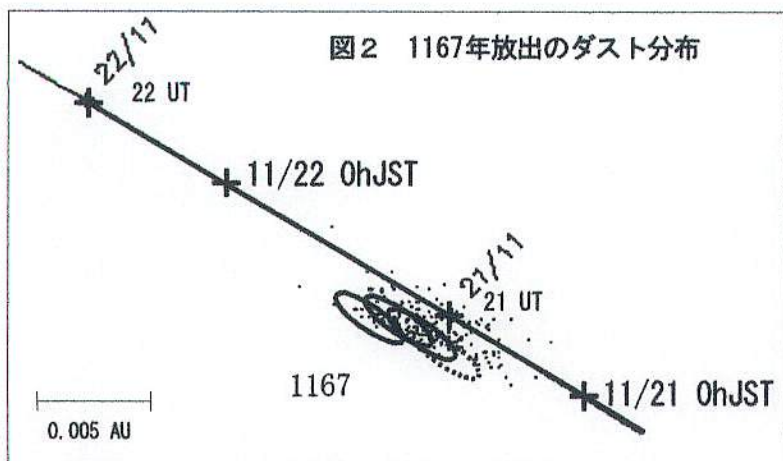
表1. 2005年におけるしし座流星群のダストトレイルの状況

放出年	Date (UT)	Time (UT)	Time (JST)	太陽黄経 (2000.0J)	Δr (AU)	放出速度 (m/s)	Δa (AU)	fM	α	δ	Vg (km/s)	備考
1001	2005/11/10.64	15:19	11/11 00:19	228.257	-0.0059	+19.37	0.203	0.17	149.28	+24.56	70.44	x ~ Δ : Δr 大
1965	2005/11/17.90	21:37	11/18 06:37	235.567	-0.00064	+136.12	1.549	1.0	153.76	+21.51	70.80	x: 放出速度大
1932	2005/11/17.96	23:04	11/18 08:04	235.628	+0.0099	+78.65	0.849	0.55	153.75	+21.50	70.50	x: Δr 大
1400	2005/11/18.32	07:38	11/18 16:38	235.988	-0.00046	+9.40	0.097	*	154.21	+21.88	70.61	x: ※濃度小
1400	2005/11/18.32	07:45	11/18 16:45	235.993	-0.00045	+9.42	0.097	*	154.22	+21.87	70.61	x: ※濃度小
1333	2005/11/19.03	00:42	11/19 09:42	236.705	-0.0022	+13.76	0.139	0.0026	154.67	+21.64	70.68	x: fM値小
1333	2005/11/19.06	01:22	11/19 10:22	236.733	-0.0025	+13.77	0.139	0.010	154.69	+21.63	70.69	Δ ~ x
1767	2005/11/20.21	04:57	11/20 13:57	237.892	-0.014	+17.48	0.180	0.17	155.32	+20.99	71.04	x: Δr 大
1767	2005/11/20.23	05:30	11/20 14:30	237.916	-0.014	+17.17	0.177	0.056	155.34	+21.00	71.04	x: Δr 大
1633	2005/11/20.53	12:46	11/20 21:46	238.222	-0.033	+5.20	0.052	0.0014	155.45	+20.85	71.48	x: Δr 大, fM値小
1800	2005/11/20.65	15:32	11/21 00:32	238.337	-0.019	+15.16	0.153	0.056	155.63	+20.96	71.14	x: Δr 大
1666	2005/11/20.71	17:04	11/21 02:04	238.403	-0.033	+5.60	0.057	0.013	155.54	+20.76	71.48	x: Δr 大
1733	2005/11/20.71	17:05	11/21 02:05	238.403	-0.016	+21.96	0.232	0.055	155.51	+20.55	71.14	x: Δr 大
1167	2005/11/20.96	23:01	11/21 08:01	238.652	-0.0012	+12.92	0.131	0.0054	155.84	+20.86	70.73	x: fM値小
1699	2005/11/21.01	00:18	11/21 09:18	238.707	-0.031	+8.13	0.085	0.026	155.72	+20.63	71.46	x: Δr 大
1167	2005/11/21.02	00:22	11/21 09:22	238.709	-0.0013	+12.95	0.131	0.038	155.87	+20.83	70.74	Δ
1833	2005/11/21.07	01:39	11/21 10:39	238.763	-0.019	+16.57	0.167	0.0019	155.90	+20.86	71.16	x: Δr 大, fM値小
1167	2005/11/21.10	02:25	11/21 11:25	238.796	-0.0016	+12.99	0.131	0.085	155.92	+20.79	70.75	Δ
1167	2005/11/21.15	03:41	11/21 12:41	238.849	-0.0017	+13.01	0.132	0.036	155.96	+20.76	70.76	Δ
1899	2005/11/21.20	04:48	11/21 13:48	238.896	+0.011	+56.92	0.612	0.14	155.86	+20.51	70.53	x: Δr 大, 放出速度大
1866	2005/11/21.81	19:31	11/22 04:31	239.515	-0.017	+21.62	0.224	0.039	156.33	+20.62	71.12	x: Δr 大

※計算条件: 1633年~1966年: 2005年に回帰するトレイル部分 (通常回帰)
901年~1600年: 放出速度 ± 20 m/s, $\Delta r < 0.005$ AU, fM > 0.001

- 今年是好条件のトレイルは無い。
- 1001年トレイルはfM値が大きく古い割に濃い。昨年も別の部分ではあるが出現しており要注意。ただし今年の方が離れている。
- 1333年トレイルは比較的條件が良さそうだが、ほぼ同条件の昨年に目立った出現がなく、今年も微妙。
- 1167年トレイルは古いトレイルだがfM値もまずまずで、出現する可能性が高いと推定。





- Vaubaillon氏らの計算と、佐藤による計算でダスト分布の位置はほぼ一致する。
→出現する可能性は高い。
- 佐藤の計算よりもVaubaillon氏らの計算の方が地球軌道に近く、さらに分布が若干広い。
日本でも多少観測できるかもしれない。

※Vaubaillonらによる分布図(URL : 下記)に重ね合わせて作図。

<http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/ephemerides/phenomenes/meteor2/DATABASE/Leonids/2005/index.php>

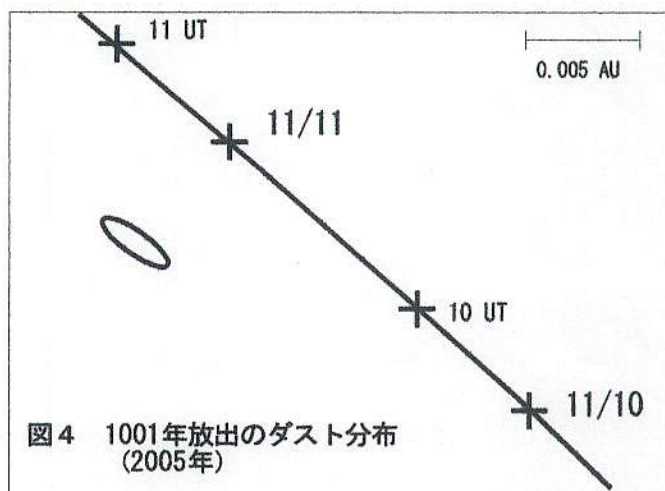
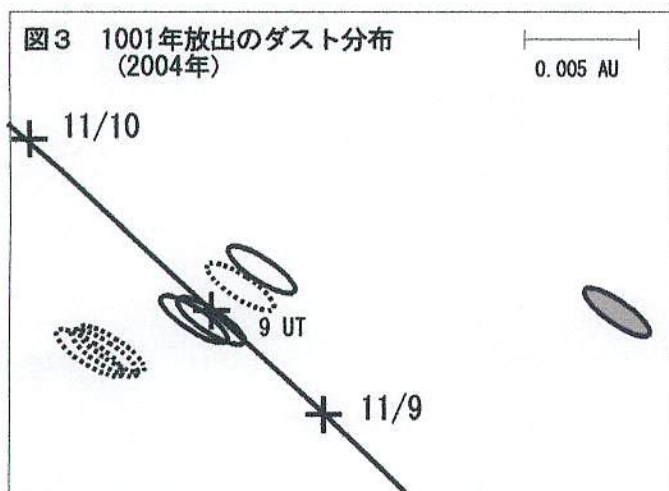
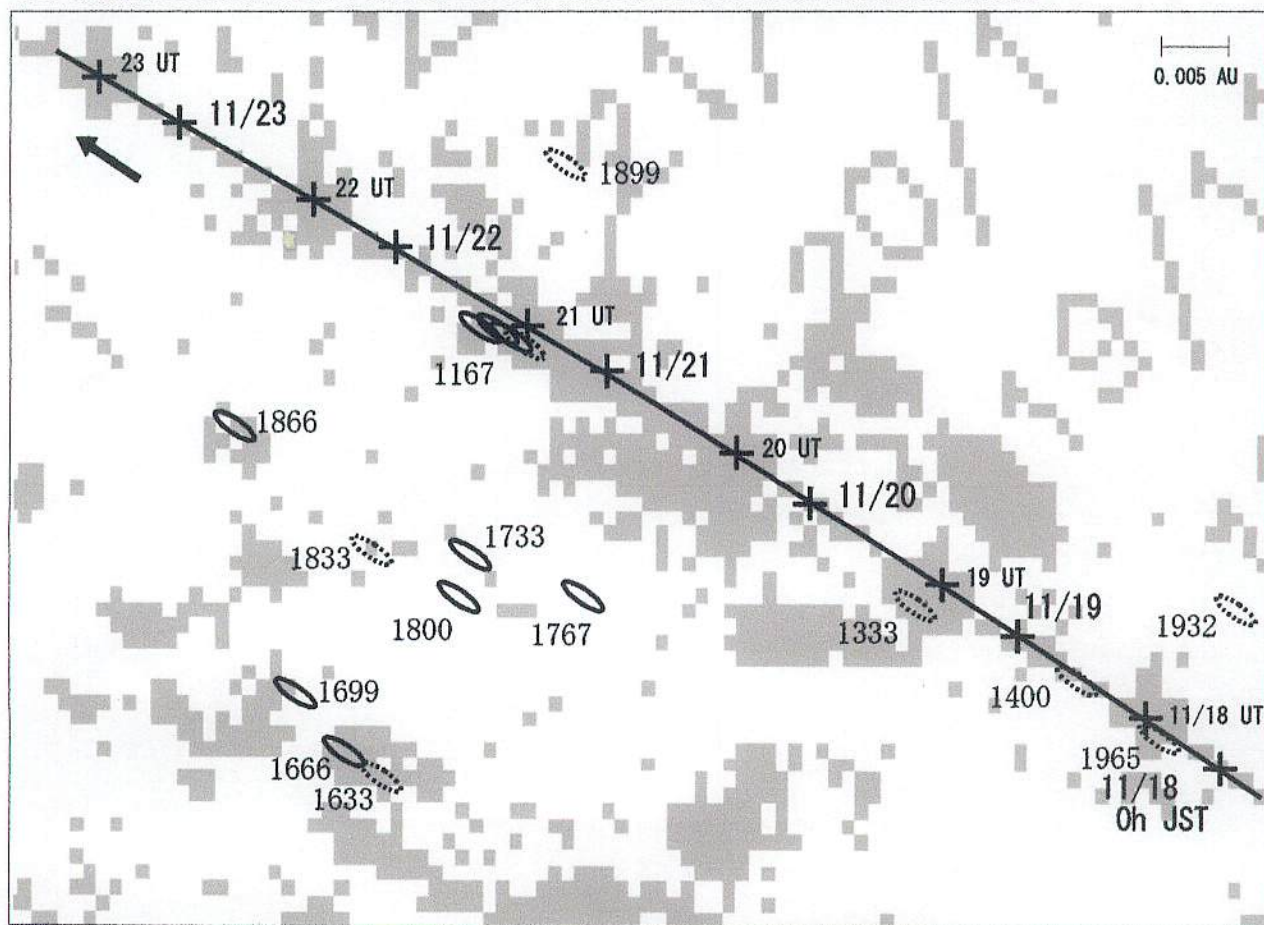


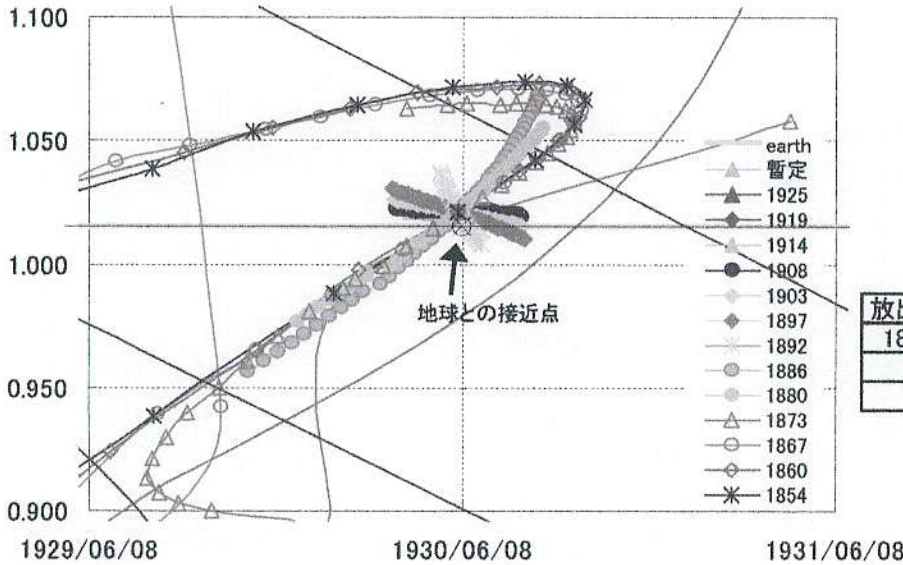
図5 しし群のダスト分布 ※Vaubaillonらによる分布図(URL : 下記)に重ね合わせて作図。

<http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/ephemerides/phenomenes/meteor2/DATABASE/Leonids/2005/index.php>



～佐藤 幹哉～

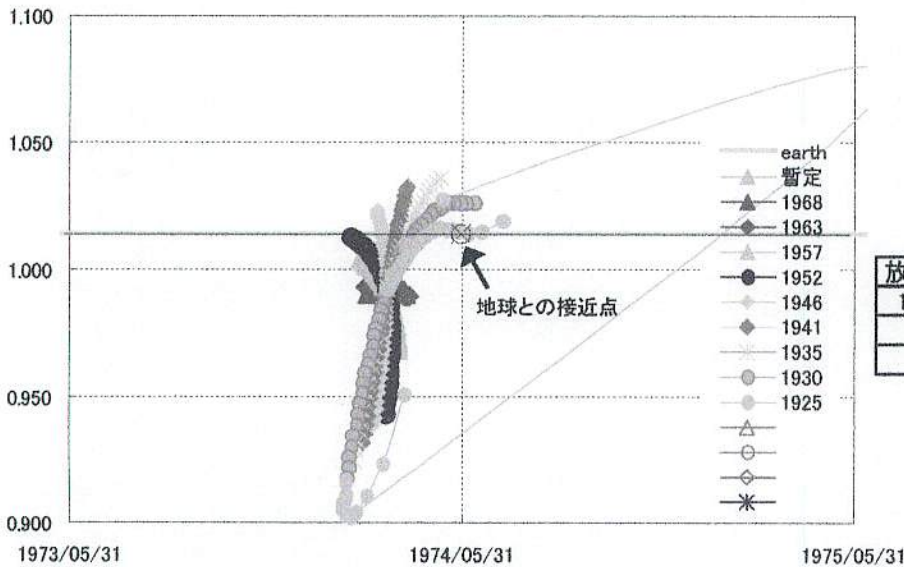
【条件】 放出：1925年以降(1930年については1854年以降)
近日点通過時に±20m/sで放出した場合を図示した。



◆1930年

- ・ 彗星自体と接近する (2006年より近い)
- ・ 1892年放出トレイルと比較的接近するが、距離はやや遠い (+0.0028AU)。
- ・ 放出速度が小さく、明るい流星が期待される。
- ・ fM値が大きく、密度は濃い。

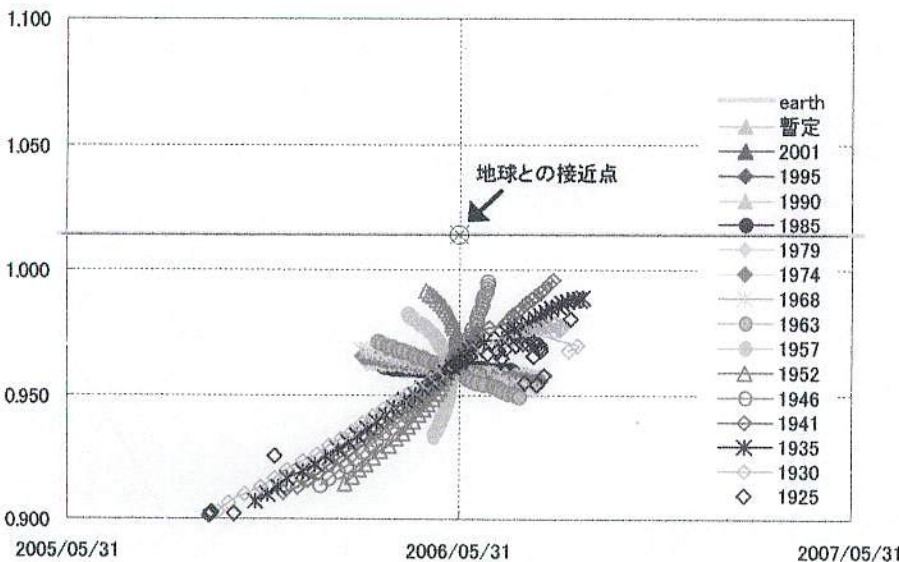
放出年	UT	LS	R(AU)	EjV(m/s)	fM
1892	Jun.08 07:21	77.748	+0.0028	+4.12	0.73
		α	δ	V(km/s)	
		219.71	+44.55	13.74	



◆1974年

- ・ 1925年放出トレイルとかなり接近する (+0.00073AU)。
- ・ 放出速度は大きく (-17m/s) 暗い流星となる可能性が高い。
- ・ 出現記録無し。

放出年	UT	LS	R(AU)	EjV(m/s)	fM
1925	May.30 06:42	68.848	+0.00073	-17.27	0.099
		α	δ	V(km/s)	
		205.65	+23.71	11.53	



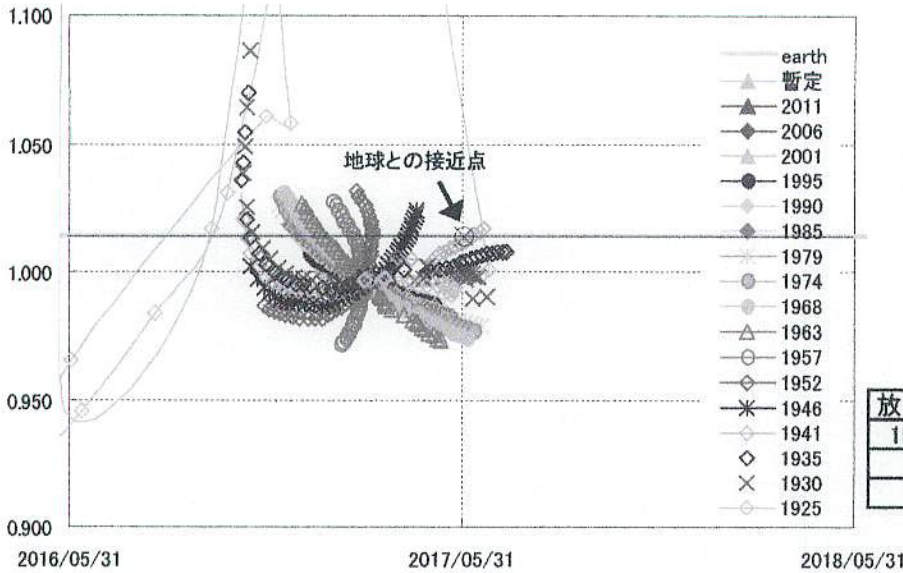
◆2006年

- ・ 彗星とは接近するが、際立って接近するトレイルは存在せず、流星出現の可能性は低い。

◆2017年

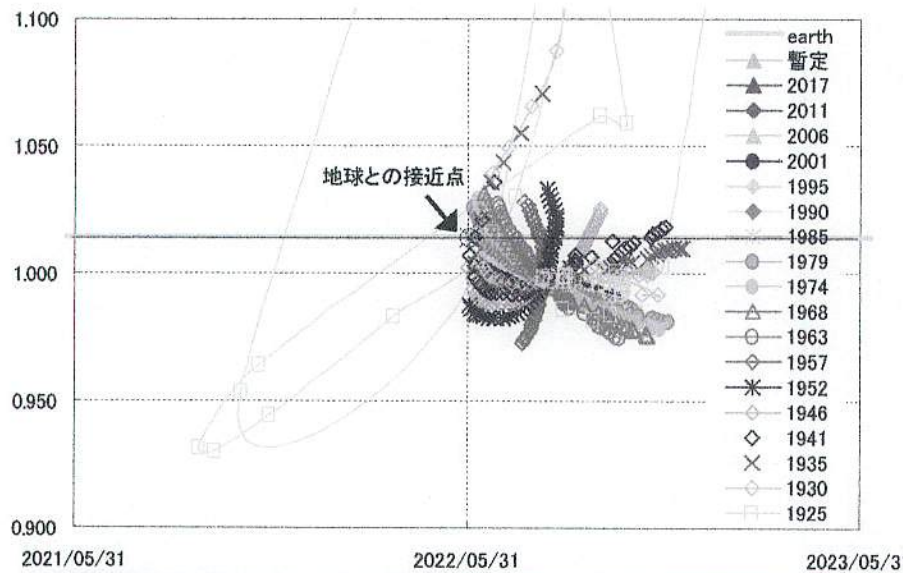
- ・1941年放出トレイルとやや接近する。
(-0.0025AU)
- ・放出速度が大きく(-15m/s)、出現した場合暗い流星の可能性が高い。

放出年	UT	LS	R(AU)	EjV(m/s)	fM
1941	May.31 01:50	69.585	-0.0025	-15.13	0.18
		α	δ	V(km/s)	
		210.90	+29.71	12.38	



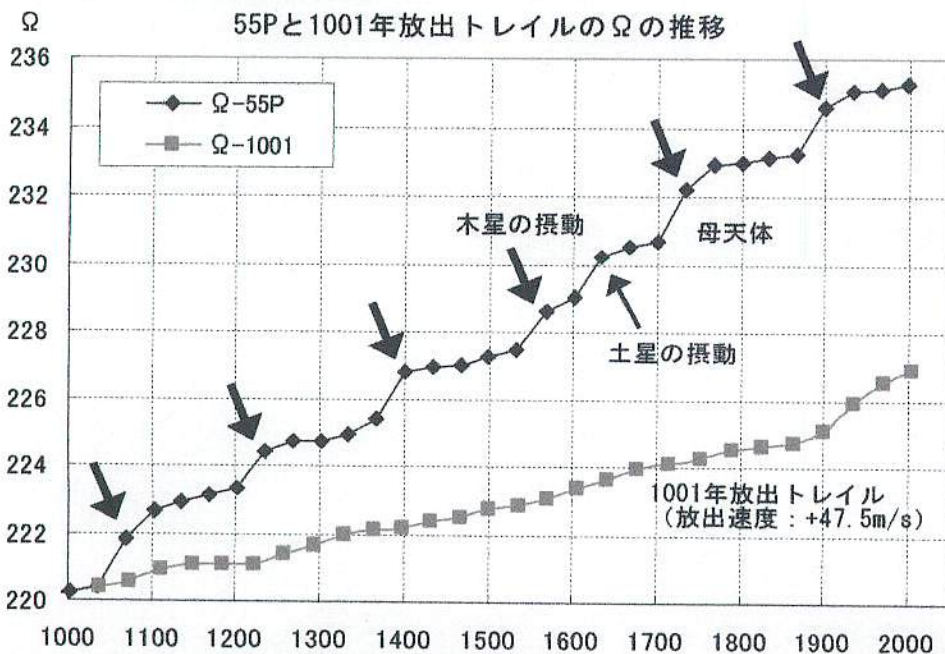
◆2022年

- ・現段階で最も出現が期待される年である。
- ・数本のトレイルが接近する。
- ・1995年放出トレイルは、放出速度がかなり大きい部分であるが(-27m/s)非常に接近する(-0.00041)。またこの年は母天体が分裂しているの、要注意である。
- ・数本の古いトレイルが、折り返し部分で接近傾向にある(1930年など)。これらからもダストの分布の広がり次第で、流星出現の可能性がある。



放出年	UT	LS	R(AU)	EjV(m/s)	fM	α	δ	V(km/s)	
2001	May.31 06:09	69.495	-0.0058	-30.42	0.35	209.11	+28.22	12.16	
1995	May.31 05:04	69.451	-0.00041	-26.68	0.30	209.49	+28.13	12.07	
1990	May.31 03:59	69.408	+0.0046	-23.84	0.32	209.83	+28.04	11.99	
1930	May.30 15:31	68.910	+0.00005	+12.71	※	206.71	+24.20	11.69	折り返し部の延長

◆おまけ・前回の宿題



Q 2004年に出現した1001年放出トレイルの時期が早い(11/9)のはなぜか(橋本さんより)

A 母天体(55P テンペル・タットル)は約33.3年程の周期で、5公転毎に木星の摂動を受けやすい位置にくる。

- ・55P : 33.3 × 5 = 166.5
- ・木星 : 11.86 × 14 = 166.04

母天体は5公転毎に2度木星と接近し、昇交点黄経(Ω)が1度強大きくなる(グラフ↓)。

一方、2004年に接近した1001年放出トレイルは、放出速度が大きく(約47.5m/s)、34~37年と公転周期が長い。この部分は、19世紀まで木星とほとんど接近せず、Ωの変化が小さいまま推移した。このため、母天体よりもΩが約8度小さい。この部分がたまたま2004年に接近した。このため、かなり早い時期の出現となった。

流星物理セミナー2006年02月05日発表原稿

題名：四分儀座流星群の2003EH1を母天体と仮定する軌道計算
長谷川 隆

概要

放出速度を40m/秒以下、方向は軌道に沿ってだけとし、1904年より近日点毎にテスト粒子を放出させ、小惑星2003EH1仮想関連群と、四分儀座流星群との関連を調査するため軌道計算を行った。1972年と1984年の母天体およびダストトレイルと、木星との接近によって

母天体の回りの流星物質の分布形がその度に都合2回大きく変化し、それぞれ1975年・1987年年初に、母天体より最大で降交点黄経が角度の0.2度小さく（極大時刻で約5時間早まるに相当）、軌道同士の交差距離が、最小で約0.11天文単位しか地球軌道と離れていない（母天体自体は、0.21から0.28天文単位程度離れている）、幅約2カ月しか地球軌道に接近しない、曲がったトレイルが急に生じる事が判った。

他方1984年以降から現在（2006年）までの分布の変化は、上記の新たに生じた構造もそのまま存在し、比較的穏やかである。

以上の結果と、日本で観察された、1975年、1987年の、当時「予想外」とされた四分儀座流星群の日本の1月3/4日夜半後の大出現とは、比較的つじつまが合うのではと考えられる。

背景

過去日本で、謎の大出現と雑誌・観測年表で記録された、1975年と1987年の1月4日未明の極大太陽黄経の小さな、早すぎる時刻の盛んな出現の原因について検討した。

恒星社アストラルシリーズ流星1・2は、斉藤馨児氏および長沢工氏が編集し1980年代に出版された。編者であり実は四分儀座流星群の日本での出現について重要な知見を持つ、斉藤馨児氏の観測結果の情報がここには無い。河越彰彦氏の集計解説がシリーズ1と2に分かれて同じ内容が記載され、古いデータが載っていて、今では貴重である。

斉藤馨児氏が若い時代に観測した結果について聞き取った所によると、「四分儀の極大太陽黄経はほぼ安定しており、数も安定していた。」と言う事だ。「1975年のように大出現する事や、似たような太陽黄経の1983年のように、完全なカラブリになるような事があったのか。」と聞くと、「いや（そんな事は無かった。）」との短い返事が返ってきた。

河越氏の流星2の記載によれば、1975年の出現は、1967年から1984年の中では、「強いて言うと最も盛んな出現」であり、1970年や1971年、1974年、1978年、1979年、1980年（月明かりがあるのに結構見えていた）、1982年がこれに次いで多かったとなっている。

個人的には、1974年以降の挙動が自分自身の見たものと一致している為、流星2の四分儀情報は充分信用しえらと見ている。1967年貧出現、1968年貧出現、1969年貧出現、1970年やや出現、1971年やや出現、1972年貧出現、1973年貧出現と言うのも、全部本当であろう。

流星2の結果を簡単にまとめると、「四分儀は、この時代には、西暦を4で割って2余る年を狙うとピークに当たる」となる。1975年の大出

て、地球より外にいる。特に1972年に木星に接近した時、降交点での動径が最大となり、1984年ころ現在に近い値になった。

他方1972年と1984年には、母天体だけでなく、その近くの今計算している新しいダストトレイルも木星と接近し、母天体の回りの流星物質の分布形が、その度に、都合2回大きく変化した。その昇交点黄経の挙動は従来予想された通りでグラフのように、それぞれ1975年・1987年年初に、母天体より最大で降交点黄経が角度の0.2度小さい(極大時刻で約5時間早まるに相当)流星が急に生じて、それが半公転した所でちょうど地球に当たるようになる。また計算初期条件では、母天体とは対象的に、降交点での動径が、1972年と1984年の摂動で、それぞれ大きく減少して、地球との軌道同士の交わりが、改善された急にできたダストトレイル構造の構成流星が当たるようになる。すなわち軌道同士の交差距離が、最小で約0.11天文単位しか地球軌道と離れていない、曲がったダストトレイルが、ピークの頂点幅約2カ月程度で地球軌道に1975年、1987年各年正月ごろちょうど接近する。(ダストトレイルの曲線曲率の詳細についてはY軸スケールを1/12に変えた別図を参照)

なおこれらの挙動を引き起こしているのは、順行軌道の木星に引っ張られた小天体の昇交点黄経は後退し、木星小天体の交差点に、小天体が先に到達する場合には、近日点距離が最初に比べて小さくなり、小天体が後に到達する場合には、近日点距離が最初に比べて大きくなる、と言う一過的な、単純な摂動の原理だけである。以前日高英治氏が、流星物理セミナーで発表した、四分儀軌道上に並んだ小天体の、1公転間の木星摂動シミュレーションで、今にして思えば既に理屈は全部いい尽くされていたものであった。

なお、1975年接近する曲がった帯、1987年接近する曲がった帯とも、地球に接近後も消滅せずに残っている。

事実1984年以降から現在(2006年)までの分布の変化は、上記の新たに生じた構造もそのまま存在し、比較的穏やかである。ピークが日本で再度見えないのは、グラフを見る限り、単に、4年と5.5年の最小公倍数が、44年もあるからだと思われる。半公転した状態で見えたのは

好運だったとしか言いようがない。

以上の結果と、日本で観察された、1975年、1987年の、当時「予想外」とされた四分儀座流星群の日本の1月3/4日夜半後の大出現は、計算した20世紀のトレイルが見えたのではないにしろ、母天体の近くの、近年放出された各トレイルの動径、昇交点黄経の変化挙動がほぼ同じであり、四分儀の流星は木星に接近しやすく、動径のばらつきが、もともと0.1天文単位くらいあってもおかしくないとすれば、今にして思えば、それほど不思議な大出現ではなかったのかもしれない。

今後の課題

今回の計算は、ほぼ100年程度の時間スケールでしかなく、1975年と1987年に大出現した流星の、母天体からの放出年を特定したものでは無かった。母天体の原始軌道を求めるのが、現時点では結構難物のようであるが、ゆくゆくはクリアーしたいものである。

ちなみに流星ガイドブックによると、「フィッシャーにより、1864年、1879年、1897年、1909年、1922年に大出現が観測され、プレントイスが1932年に大出現を観測した」と言う。このうち、

現後ただちに、「四分儀の極大が、数時間以上早まった。解明すべき課題である。」と雑誌に記載されたのは、それなりに根拠のある事と言える。並の出現が流星雨になった訳では無いが、1975年は数もいつもの極大を越えていた。この年、4日未明は月明かりもあったのである。

以上に比べて1987年の大出現は、現在も情報の入手がより容易で、疑う余地が無い。すなわち1982年以降は1983年貧出現、1984年貧出現、1985年は明け方近くにピークがちょっと出たものの全体として貧出現、1986年には北海道教育大学の観測地等以外では曇だったため、やや出現したものの見た者の少ない状態であった。そして1987年は、1975年を思い出させる大出現であった。

ちなみにその4年後の1991年は、大出現と言われた1990年に比べると少なく、1983年の挙動と合わせて、1987年のピークが、定常的で無い事を確定させた。更に1995年、やや期待された1999年

、2003年とも四分儀は日本ではたいした出現は無かった。(それどころか、1995年以降は、「やや出現」以上の記録が無い状態が更新されている。)

よって1975年や1987年に日本で、予想外の太陽黄経点で、通常の極大の数より流星がやや多く出現する程度のピークが存在したとして、その原因を考えてみる事には、一応の意味がありそうである。

以上の挙動は、1987年と1975年の差が木星の公転周期である為ダストトレイル理論を使用し、木星の摂動のせいとすれば説明できるのではないかと考えるようになるのは、しし座流星群の予想の成功等があれば時間の問題であった。1987年に多出現したときの流星軌道が、写真多点観測により、いつもと少しずれ、木星の引力のせいとして説明できるとい研究が、大塚勝仁氏らにより、観測後ただちに出ているからである。

問題は、ダストトレイル理論では、新しい放出帯を地球に接近させて、異常ピークを説明するのだが、交差の良い短周期の母天体候補が、四分儀群の場合長い間発見されなかった事だった。母天体くさいが、地球軌道と母天体の軌道とが、接近点で1天文単位近く離れていたり、交差が良くても母天体の公転周期が1000年以上と言うのでは、新鮮な流星物質が同じ観測者が生きている間に断続的かつ形を様々変えながら地球と衝突し、多彩な現象を見せるような計算結果を導くのはかなり困難であった。

この状況は2003年に劇的に変化した。2003EH1という、木星と0.3天文単位まで接近する、最近木星に捕らえられた、長周期彗星ではないかとさえみられる、比較的珍しい軌道の、公転周期現在約5.5年の小惑星が発見された為である。なお現在のこの天体と地球の交差点の距離は、0.21天文単位と、他の有力な母天体候補、マックホルツ彗星よりも更に近い。降交点で地球に接近する事、木星に接近する点が、四分儀群と他流星群の関連を研究するため、軌道進化を計算しようとして導入された、流星物質の仮定軌道にほぼ近い事も、「この天体を流星物質の出所として計算する、試行のやる気を起こさせる」のには充分であった。

更に調査の結果、この小惑星の近日点通過が、1975年の夏と、1986年の夏に起こっており、母天体の回りの、若いダストトレイルを、地球に1975年1月と1987年1月に接近させやすい状況である事が判った。齊藤馨児氏が、1963年に四分儀群の異常ピークを見なかったのは、母天体の回帰からは時間が離れており、新しいトレイルが無かった為とすれば説明がついたのである。

そこで母天体の近日点通過毎にテスト粒子を放出させ、小惑星2003 EH1仮想関連群と、四分儀座流星群との関連を調査するための簡単な軌道計算を行った。1972年と1984年の母天体およびダストトレイルと、木星との接近によって、流星物質軌道がその度に都合2回大きく変化することは、20年近く前に予想された事だった。極大が早まる事は、ほぼ当然視されていた。問題は、この天体が母天体なら、それぞれ1975年・1987年年初に、流星軌道と地球軌道とが実際に接近するような、動径に沿っても曲がったトレイルがこの条件でできるかどうかであった。またこのトレイルは、観測条件が限られており、上記2回以外、日本では見えない結果になる必要もあった。実際の計算経過と結果は、下記に報告する通りである。

計算条件

2003 EH1の軌道につき、下記条件を仮定し、近日点毎に放出した流星の、降交点通過日、動径、昇交点黄経をもとめ、地球軌道との交差の程度と、極大時刻の動きを調べた。

- a (軌道長半径) = 3.1063 (au)
- P (計算開始時点での公転周期) = 5.475 (年)
- e (離心率値) = 0.63
- q (近日点距離) = 1.15 (au)
- Ω (昇交点黄経値) = 282.95 (°)
- ω (近日点引数値) = 171.1 (°)
- i (軌道傾斜角値) = 70.785 (°)
- (計算の始まりとなる、近日点通過年) = 1904.73 (年)

なお上記仮定初期軌道は暫定的であって、詳しい摂動計算に基づいていない。母天体は木星に破格に接近する彗星様の軌道の為、大接近毎に過去軌道の推定精度は急速に悪化する。通常の小惑星でこのような例が希であるばかりでなく、彗星としても、摂動を受け安い天体に入る。2003 EH1が、1490Y1彗星と同じ起源になる可能性、ババザノフの四分儀座流星群の過去軌道のシミュレーションから、1913年の木星の接近少し前の1904年時点での公転周期が、木星の6/13であろうと、当てずっぽうに決め、現在の軌道要素に合うよう、試行錯誤で軌道要素を微調節して求めている。1842年ころに、その前の大接近時代となるが、それ以前の軌道を、発表者が今後精度良く求める事が可能だとはとても思えない。特に、計算の始まりとなる近日点通過年をわずかに変えると、母天体の現軌道とは全く合わなくなってしまう。カオス的軌道になり易い、不安定軌道となっている。

こうした悪条件のもと、ともかく放出速度を40m/秒以下、方向は軌道に沿ってだけとし、上記1904年より近日点毎にテスト粒子を軌道の前後に合計10個づつ放出させた。

結果と考察

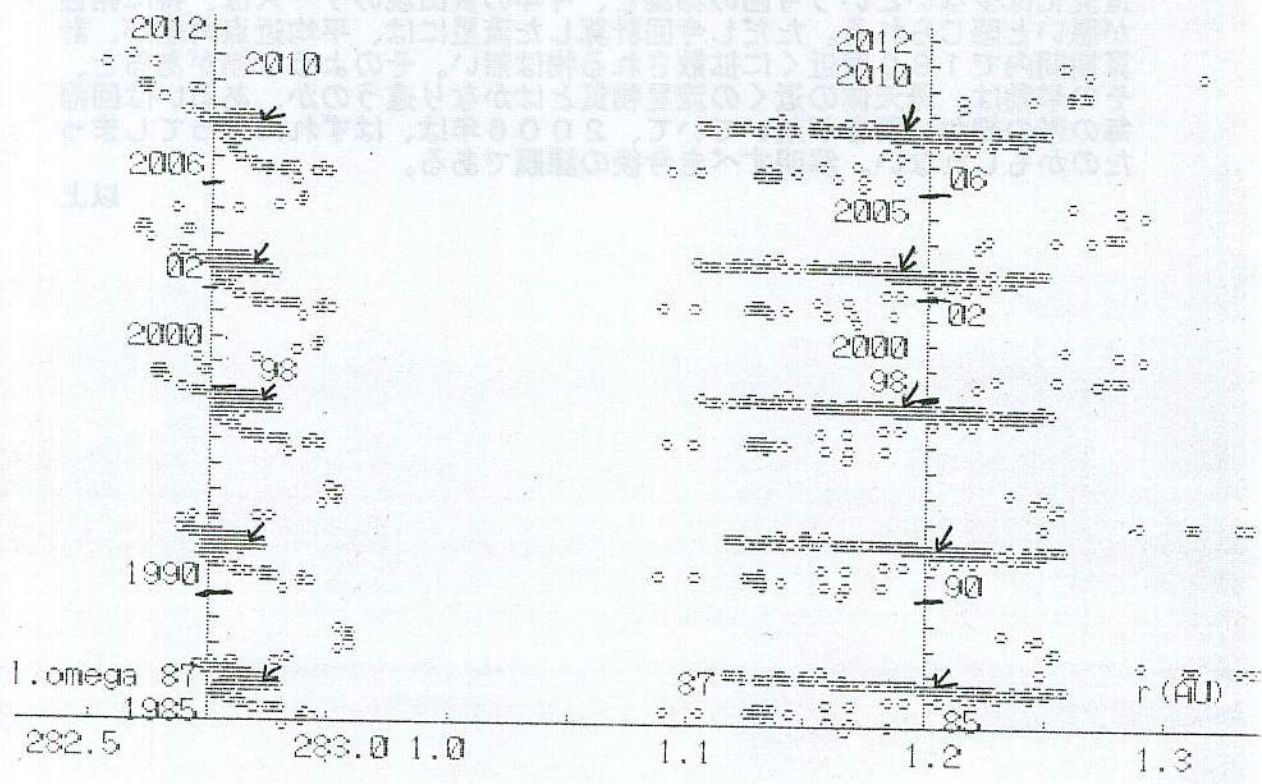
プロットは流星の、降交点通過日対昇交点黄経(左)、降交点通過日対動径(右)であり、それぞれ、極大時刻、地球軌道との交差の程度の目安となる。(各粒子とも、5.5年を於いて複数回プロットされる。)

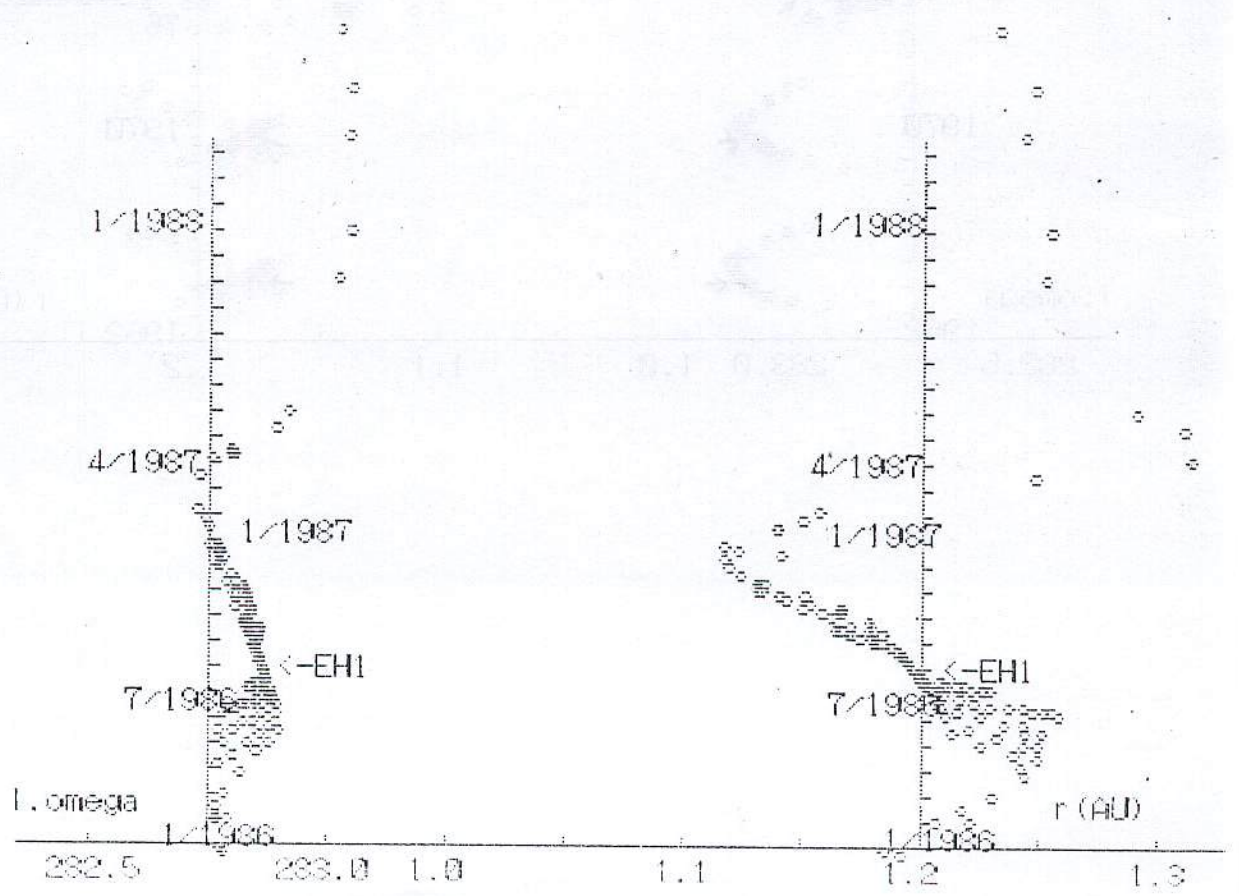
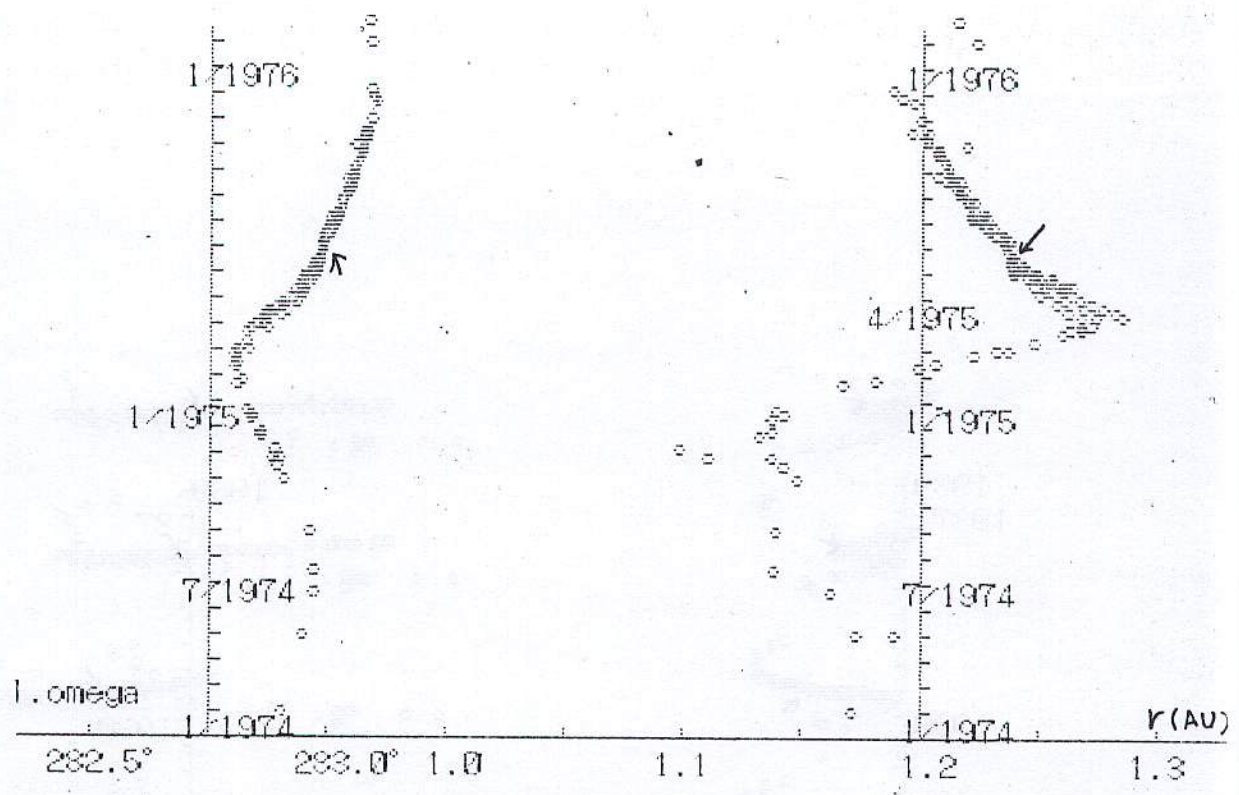
母天体は、地球より降交点で、0.21から0.28天文単位程度離れ

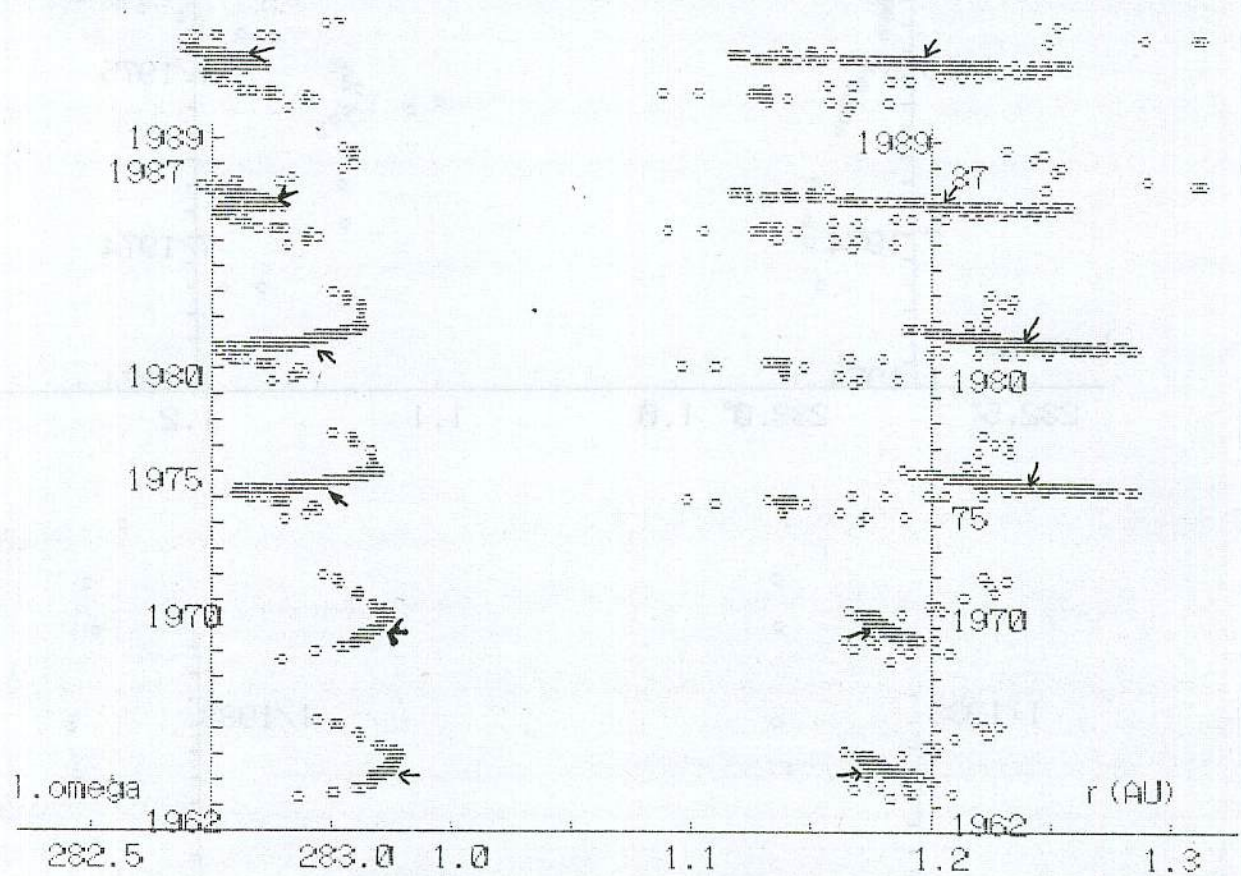
1897年と1909年のペアは、1975年と1987年同様、12年隔てての大出現の為、類似性が感じられる。全部の説明は無理でも、このペア現象の説明は、狙ってみるべきかもしれない。(ただし、木星接近半公転衝突だけでなく、1.5公転後衝突も考える必要があるかもしれない。)

なお日本で観測された、四分儀にまつわる現象は、むろん今回論じた上記2年のようなケースばかりではない。1998年、2002年、2006年と、四分儀が期待されたほど見えていないよさという問題もある。1998年、2002年は、2003EH1と平均近点角差が120度以内で、今回の結果となんらかの意味で関連している可能性も残る。が、2006年のケースだけは別で、反対側(180度違い)に近くて、正常に1990年は大出現しているので、1984年の木星との接近より後の構造変化は少ないという今回の結論と、今年の大出現のケースは、特に相性が悪いと感じられる。ただし今回計算した流星には、平均近点角差が、計算期間内で180度近くに拡散される物は無い。そのような物があると、その挙動は、母天体の近くの流星物質とはかなり違うのか、あるいは回帰毎の帯の細かい動きが効いていて、2006年は、はずれになってしまったのかもしれない。解明すべき今後の課題である。

以上







IAUC mailing list [quai@cfa.harvard.edu] さん [CBET 283: 20051111 : 2005 UD AND THE DAYTIME SEXTANTIDS] Write:

Electronic Telegram No. 283

Central Bureau for Astronomical Telegrams
INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION
M.S. 18, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA 02138, U.S.A.
IAUSUBS@CFA.HARVARD.EDU or FAX 617-495-7231 (subscriptions)
CBAT@CFA.HARVARD.EDU (science)
URL <http://cfa-www.harvard.edu/iau/cbat.html>

2005 UD AND THE DAYTIME SEXTANTIDS

K. Ohtsuka, Tokyo Meteor Network, Saitama, Japan; T. Sekiguchi, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ); D. Kinoshita, National Central University, Jung-Li; and J. Watanabe, NAOJ, suggest that the Apollo-type minor planet 2005 UD (MPEC 2005-U22, 2005-U68, 2005-V49) is a possible candidate for the parent object of the daytime Sextantids meteor stream (Sekanina 1976, Icarus 27, 265). Furthermore, it may be a member of the Geminid stream complex (e.g., Cook 1973, in NASA SP-319, p. 183) -- i.e., perhaps a larger fragment of (3200) Phaethon. The phase of orbital evolution of 2005 UD shifts by about 4000 yr or more from the present orbit of Phaethon (Ohtsuka et al. 1999, Earth, Moon and Planets 77, 83). Kinoshita obtained multi-color images of 2005 UD at Lulin observatory (1.0-m f/8 reflector + CCD) on Oct. 31-Nov. 5, but no cometary features were detected.

NOTE: These 'Central Bureau Electronic Telegrams' are sometimes superseded by text appearing later in the printed IAU Circulars.

(C) Copyright 2005 CBAT

2005 November 11

(CBET 283)

Daniel W. E. Green

Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon?

K. Ohtsuka¹, T. Sekiguchi², D. Kinoshita³, J.-I. Watanabe², T. Ito², H. Arakida², and T. Kasuga⁴

¹ Tokyo Meteor Network, Daisawa 1–27–5, Setagaya-ku, Tokyo 155–0032, Japan
e-mail: ohtsuka@jb3.so-net.ne.jp

² National Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2–21–1, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

³ Institute of Astronomy, National Central University, 300 Jhongda Rd, Jhongli, Taoyuan 32001, Taiwan

⁴ The Graduate University for Advanced Studies, Osawa 2–21–1, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

Received 14 December 2005 / Accepted 7 March 2006

ABSTRACT

Context. The recently discovered Apollo asteroid 2005 UD is the most likely candidate for being a large member of the Phaethon-Geminid stream Complex (PGC).

Aims. Detecting more complex members like this should clarify the formation and evolution of the PGC.

Methods. Our backward and forward ($\pm 10\,000$ -yr) integration of the Kustaanheimo-Stiefel regularized equation of motion revealed that the orbital evolutions of Apollo asteroids (3200) Phaethon and 2005 UD show a similar profile, time-shifting by ~ 4600 yr.

Results. Within the PGC, this time shift is rather large against the time-lag of 220 yr for Phaethon-Geminids and ~ 3900 yr between Phaethon-Sextantids, although much smaller than that of $\sim 19\,000$ yr between Phaethon-Canis Minorids.

Conclusions. This is a km-order object, hence may be a split nucleus of Phaethon. Besides, the orbital parameters of 2005 UD and the Sextantids are in good agreement along with the time-lag of 100 yr. Therefore, the Sextantid meteor shower seems to be associated more closely with 2005 UD than Phaethon.

Key words. minor planets, asteroids – methods: numerical – meteors, meteoroids

1. Introduction

Apollo asteroid (3200) Phaethon (=1983 TB) is probably one of the dormant or extinct cometary nuclei from the point of view of the parent of the Geminid meteor stream (Whipple 1983; Ryabova 2001 etc.). In fact, the total mass of the Geminid meteor stream is comparable to those of other major meteor streams of cometary origin (Jewitt 2004). The current orbital parameters of Phaethon are: semimajor axis (a) ~ 1.27 AU (astronomical unit); eccentricity (e) ~ 0.89 , thus perihelion distance (q) ~ 0.14 AU along with inclination (i) $\sim 22^\circ$; however, it has a shorter orbital period of 1.43 yr than any known short-period comets.

Before the discovery of Phaethon in 1983, likely multi-meteor showers, an association between the Geminids, the Sextantids, and the Canis Minorids, had already been pointed out by Nilsson (1964), Cook (1973), and Kresáková (1974). After the discovery, Babadzhanov & Obruchov (1987, 1992) simulated the long-term orbital motion of Phaethon, stably changing with a long-period perturbation cycle of $\sim 40\,000$ yr. Then a large-amplitude q - i oscillation arises, with a period equal to half the cycle, i.e. $\sim 20\,000$ yr, during which the argument of the perihelion (ω) changes by $\sim 180^\circ$. Babadzhanov & Obruchov also found that Phaethon regularly becomes an Earth-crosser over such a long-term history; consequently they predicted the occurrences of four meteor showers originating in

Phaethon at four different nodal points. After all, Babadzhanov & Obruchov (1993) successfully reconciled their theoretical meteor shower model with observations. These associated meteor showers are currently observable: Geminids (shower maximum on December 14) and (day time) Sextantids (max. Oct. 2) as active meteor showers; Canis Minorids (max. Dec. 10) and (day time) δ Leonids (max. Oct. 5?) as rather weak ones. Therefore, the detection of such multi-meteor showers should be strongly evident in the formation of the Phaethon-Geminid stream Complex (hereafter, called PGC), probably formed during Phaethon's active cometary phase long ago. A stream complex formation is considered to be dust particles, released at near perihelion every return from a short-period comet with stable, rather than chaotic, cyclic long-term orbital evolutions, moving away from the comet as time goes by. Eventually, the dust particles should be distributed in and around entire space, drawn by such cyclic orbital changes of cometary motion under planetary perturbations and nongravitational effects. Evidence of the Geminid fireball activities of medieval times (Astapovich & Terentjeva 1968) should also support such a spatial spread of PGC.

Although a number of attempts to obtain signs of Phaethon's cometary activity have been carried out, no trace of cometary activities has been detected yet (e.g., Hsieh & Jewitt 2005; Kraemer et al. 2005). The spectral feature of Phaethon is rather bluish, i.e., classified in Tholen's

Table 1. Orbital parameters of (3200) Phaethon and 2005 UD (equinox J2000).

Object	(3200) Phaethon		2005 UD
osculation epoch (TT)	2005 Aug. 18.0	−2581 Aug. 18.0	2005 Aug. 18.0
mean anomaly M	115°:81866	117°:04318	353°:33143
perihelion distance q (AU)	0.1398186	0.1534601	0.1629124
semimajor axis a (AU)	1.2713838	1.2737898	1.2747596
eccentricity e	0.8900265	0.8795248	0.8722015
argument of perihelion ω	321°:99112	207°:64364	207°:46774
longitude of ascending node Ω	265°:41395	22°:12450	19°:84550
inclination i	22°:17403	28°:32959	28°:74946
# of observations	1496		287
arc (oppositions)	1983–2005 (19)		Oct. 22–Nov. 17
RMS residual	0".58		0".25
absolute mag. H	14.5		17.5
reference	JPL	this work	Nakano (2005)

taxonomy of F-type, as opposed to those of typical cometary nuclei being slightly reddish in general (Tholen 1985; Luu & Jewitt 1990; Binzel et al. 2004 etc.). The absolute magnitude (H) and the albedo are 14.5 and 0.11 (e.g., Harris 1998), respectively, which is equivalent to a diameter of ~ 5 km. Other orbital and physical data for Phaethon are summarized on the “Near Earth Objects Dynamic Site” (<http://131.114.72.13/cgi-bin/neo/dys/neoibo>) and “Database of Physical and Dynamical Properties of Near-Earth Asteroids” (<http://earn.dlr.de/nea/003200.htm>).

According to the orbital study by Ohtsuka et al. (1997), Phaethon approaches the Sun up to $27 R_{\odot}$ (solar radius), i.e., ~ 0.126 AU, in the minimum- q phase ~ 1900 yr ago. Considering its low albedo, the sunny-side surface should be heated over 1000 K, at which temperature the phyllosilicates in CI and CM chondrites decompose into olivine, magnetite and anhydrite, etc. (e.g., Nozaki et al. 2006), and the chondritic dust particles may be destroyed (e.g., Mann et al. 2004). Indeed, F-type asteroids, like Phaethon, are regarded as being anhydrous and thermally metamorphosed (Hiroi et al. 1993; Rivkin et al. 2002), and the Geminid meteoroids experienced a thermal history, probably due to the Sun (Halliday 1988; Kasuga et al. 2005). Moreover, a solar thermal stress seems to be a trigger, not only to generate a meteor-stream complex, but also to split and disintegrate a comet such as the 96P/Machholz-Quadrantid stream complex including the near-sun (i.e., sunskirting) Marsden and Kracht comet groups detected by the space-borne coronagraph, SOHO/LASCO (Ohtsuka et al. 2003; Sekanina & Chodas 2005). Their minimum q reaches up to $\sim 6 R_{\odot}$, then their surface temperature rises at least 1.5 times higher than that of Phaethon. The other sunskirters, Meyer and Kracht II comet groups, along with q of 8–12 R_{\odot} (Meyer 2003; Hoffman & Marsden 2005; Hönig 2005), would also accompany their complex streams. Therefore, the formation of the PGC may imply the existence of some large members as a split cometary nucleus or fragments among the PGC.

We have long believed our working hypothesis mentioned above, and have been searching for large PGC members. Finally, we found a candidate: a recently discovered Apollo asteroid, 2005 UD.

2. Orbital evolution of Phaethon

In the first stage of stream-complex formation, the orbital energy (a^{-1}) of released meteoroids, fragments, and split nuclei from the parent comet must become slightly different from that of the parent. This results in differences in their evolutionary rates. The time-lags (hereafter, called Δt) between orbital evolutions of the parent comet and released matter should be longer with time. Therefore, a large PGC member, if there are any, should be in orbital similarity with Phaethon, shifting by Δt .

As preliminary work for a PGC survey (mentioned in the next chapter) and for determining the Δt of Phaethon with unknown potential PGC members, first of all, we have begun with the orbital evolution of Phaethon. We performed here the backward and forward numerical integration of the KS (Kustaanheimo-Stiefel) regularized equation of motion (cf. Arakida & Fukushima 2000, 2001) over the term of 10000 BC to 10000 AD (JDT -1931503.5 to JDT 5373520.5), applying the 12th-order Adams method in double precision with a step size of 0.5 day. We have confirmed that the results of the numerical integration did not significantly change, even when we adopted smaller step size or when we used other integration methods such as the extrapolation method. The initial orbital data of Phaethon at osculation epoch 2005 Aug. 18.0 TT = JDT 2453600.5 were taken from “JPL’s HORIZONS System” (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.html>), as listed in Table 1. All the major planets from Mercury through Pluto were included as perturbing bodies, in which the mass of the moon was added to that of the Earth, and the barycenter of their masses was taken as Earth’s position. The coordinates of the major planets were taken from the JPL Planetary and Lunar Ephemeris DE408.

3. Survey

3.1. Process

We surveyed whether there are the large PGC members or not among “the List of Apollo Minor Planets”

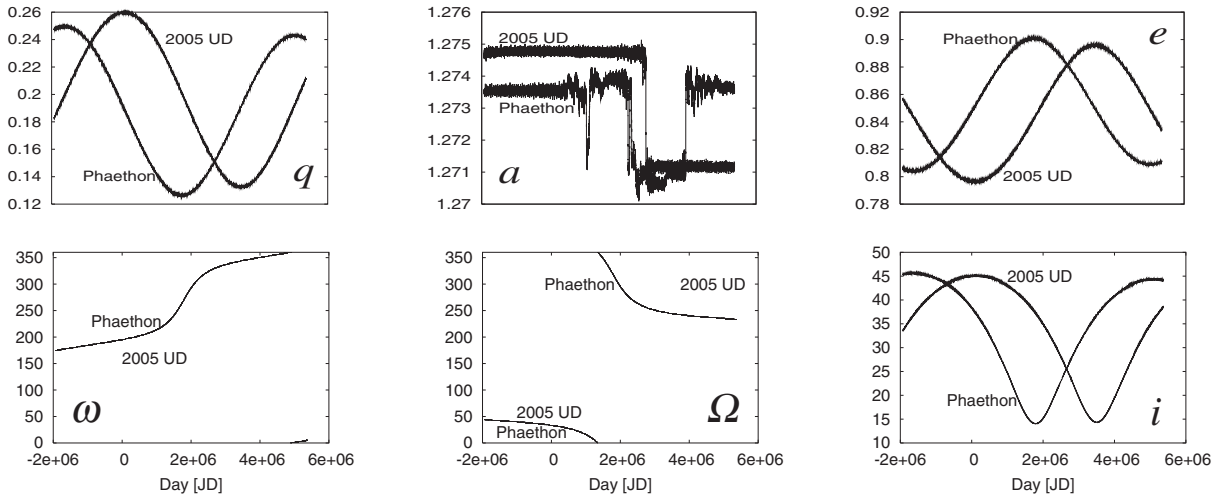


Fig. 1. Orbital evolutions of (3200) Phaethon (thick line) and 2005 UD (thin line), where six graphs show: perihelion distance q in AU (*upper left*); semimajor axis a in AU (*upper center*); eccentricity e (*upper right*); argument of perihelion ω in degree (*lower left*); longitude of ascending node Ω in degree (*lower center*); and inclination i in degree (*lower right*). The abscissa of all is time in Julian Terrestrial Date (JDT).

(<http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>) and latest MPECs (Minor Planet electric circulars).

As of 2005 November 3, a total of 1758 Apollo asteroids are recorded in the database, among which we directed our attention to 62 Apollos with $q < 0.3$ AU, since q of Phaethon has never been beyond 0.26 AU in our orbital computation. We applied here the following three criteria as the retrieving engine for our survey: the first criterion is traditional D_{SH} (Southworth & Hawkins 1963), since in investigating the orbital similarity between two bodies, e.g., comet/asteroid and meteors, we often use D_{SH} . Thus, we traced such a large PGC member on the basis of the Phaethon's orbital evolution from the integration. For each Apollo, we found the minimum D_{SH} between it and Phaethon, as Phaethon's orbit evolves. When this minimum value of D_{SH} is below 0.15, this means that Phaethon and the given Apollo are within the probable association range.

The second and third criteria are C_1 and C_2 integrals for the candidate selected by D_{SH} . They were derived by Moiseev (1945) and Lidov (1961), respectively, given as:

$$C_1 = (1 - e^2) \cos^2 i, \quad (1)$$

$$C_2 = e^2 (0.4 - \sin^2 i \sin^2 \omega). \quad (2)$$

These integrals describe the secular orbital variations well. Babadzhanov & Obruchov (1987, 1992) demonstrated that both C_1 and C_2 integrals are almost invariant in their 20 000-yr backward integration of Phaethon's orbit: ~ 0.18 and ~ 0.27 , respectively. Therefore, C_1 and C_2 integrals should also be useful criteria to distinguish a PGC member.

3.2. Detection of the candidate: Apollo asteroid 2005 UD

By these procedures, we finally detected a candidate large PGC member, "Apollo asteroid 2005 UD", recently discovered in the Catalina sky survey on 2005 October 22 (MPEC 2005–U22). The orbital elements at epoch 2005 Aug. 18.0

TT = JDT 2 453 600.5, listed along with Phaethon in Table 1, were taken from Nakano's (2005) solution, based on 287 positions during an arc of 2005 October 22 to November 17 (27 days) with a rms residual of $0'.25$. $H \sim 17.5$ corresponds to a km-order size object. Among these observations, a total of 183 positions along with multi-color measurements were carried out by one of the authors, D. Kinoshita, at Lulin Observatory (1.0-m reflector $f/8.0$ + CCD) from 2005 October 31 to November 5, when no cometary feature was detected. His results will be published elsewhere as a journal paper.

The current orbital parameters of 2005 UD match those of Phaethon in 2582 BC strikingly well, thus $\Delta t \sim 4600$ yr. Their D_{SH} is minimum at only 0.04, slightly larger compared with the well-established Phaethon-Geminids association of 0.02 (based on the data by Ohtsuka et al. 1997). The C_1 and C_2 parameters of 2005 UD fit those of Phaethon: 0.184 and 0.267, respectively.

Subsequently, using Nakano's data, we also integrated the orbital motion of 2005 UD using the same method as we applied to Phaethon in order to trace both dynamical behaviors of Phaethon and 2005 UD. The solutions of the orbital evolution for both objects are represented in Fig. 1. Phaethon and 2005 UD often closely encounter the terrestrial planets, however, neither of the orbital parameters look chaotic, but rather regular. It is also easy to understand that both orbital evolutions show similar profiles along with quasi-sinusoidal changes, shifting by $\Delta t \sim 4600$ yr.

4. Concluding remarks

We found that Apollo asteroid 2005 UD is the most likely candidate for a large member of the PGC. This is a km-order object, hence may be a split nucleus of Phaethon. We confirmed Δt between Phaethon and 2005 UD ~ 4600 yr, which is rather large as against Δt , being 220 yr for the

Table 2. 2005 UD, (3200) Phaethon, and the Sextantids (Sekanina 1976) at almost the same evolutionary phase.

Object	Epoch (TT)	M	q (AU)	e	ω (2000.0)	Ω	i
2005 UD	1867 Aug. 18	36°:615	0.16570	0.87002	206°:356	20°:930	29°:519
Phaethon	-2688 Aug. 18	329°:118	0.15538	0.87800	206°:759	22°:996	28°:956
Sextantids	1969 Oct. 9	38°:0	0.172	0.816	212°:3	15°:8	31°:1

Phaethon-Geminids association and ~3900 yr between the Phaethon-Sextantids (Ohtsuka et al. 1997), although much smaller than that of ~19000 yr between the Phaethon-Canis Minorids (Babadzhanov & Obruchov 1987). Ohtsuka et al. (1997) simply regard Δt of the orbital evolutions between Phaethon and presently observable associated meteor streams as an indicator of the meteor stream's age. Ohtsuka et al. also hypothesized that the larger Δt means an older age of the meteor stream and more dispersive spatial number density of the meteoroid stream. Really, the hourly rates, i.e., spatial number density of the meteoroid particles, for Geminids, Sextantids, and Canis Minorids are 60, 20, and 2 at most, respectively (Kresáková 1974; Ohtsuka et al. 1997). This suggests that the meteoroid particles are not uniformly distributed over the PGC. Of particular interest should be the relation between 2005 UD and the Sextantids. The orbital parameters of 2005 UD and the Sextantids, picked out by Sekanina (1976) among the Harvard (Havana) radio meteor orbit data, are currently in good agreement. As presented in Table 2, their Δt is only 100 yr, then D_{SH} is minimum at 0.08, while Δt between the Phaethon-Harvard Sextantids amounts to ~4700 yr, along with somewhat larger $D_{SH} = 0.10$. Therefore, the Sextantid meteor shower seems to be associated more closely with 2005 UD than with Phaethon, judging from Δt and D_{SH} .

Another astronomical curiosity is to estimate the splitting time of 2005 UD from Phaethon. Both the dynamical behaviors are closely related with each other. However, Δt does not become much larger with time, since there is an imperceptible difference between the two evolutionary rates. Such a tendency may cause us difficulty in estimating the splitting time on the basis of our rather short-term orbital solution. In addition, the semimajor axes may have small random changes (similar to those shown in Fig. 1) as a result of perturbations from the terrestrial planets in the long term, and the changes in semimajor axes could then cause changes in precession rates. This problem may be resolved by future work based on further long-term orbital studies.

Acknowledgements. The authors are grateful to Dr. David J. Asher for his constructive comments as the reviewer. Thanks are also due to Prof. Hiroshi Nakai for providing us with useful and detailed information on JPL's Development Ephemeris, DE408. Detailed and constructive review by Yolande McLean has considerably improved the English presentation of this paper. Numerical computations were carried out on a general common use computer system at the Astronomical Data Analysis Center, ADAC, of the National Astronomical Observatory of Japan.

References

- Astapovich, I. S., & Terentjeva, A. K. 1968, in *Physics and Dynamics of Meteors*, ed. L. Kresak, & P. M. Millman (Dordrecht: D. Reidel), 308
- Arakida, H., & Fukushima, T. 2000, *AJ*, 120, 3333
- Arakida, H., & Fukushima, T. 2001, *AJ*, 121, 1764
- Babadzhanov, P. B., & Obruchov, Yu. V. 1987, *Publ. Astron. Inst. Czechosl.*, 2, 141
- Babadzhanov, P. B., & Obruchov, Yu. V. 1992, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 54, 111
- Babadzhanov, P. B., & Obruchov, Yu. V. 1993, *Astron. Vest.*, 27, 110
- Binzel, R. P., Rivkin, A. S., Stuart, J. S., et al. 2004, *Icarus*, 170, 259
- Cook, A. F. 1973, in *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids*, ed. C. L. Hemenway, P. M. Millman, & A. F. Cook, NASA SP-319, 183
- Halliday, I. 1988, *Icarus*, 76, 279
- Harris, A. W. 1998, *Icarus*, 131, 291
- Hiroi, T., Pieters, C. M., Zolensky, M. E., et al. 1993, *Science*, 261, 1016
- Hoffman, T., & Marsden, B. G. 2005, *Sky & Tel.*, Aug., 32
- Hönig, S. F. 2006, *A&A*, 445, 759
- Hsieh, H. H., & Jewitt, D. C. 2005, *ApJ*, 624, 1093
- Jewitt, D. C. 2004, in *Comets II*, ed. M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver (Tucson: Univ. Arizona), 659
- Kasuga, T., Watanabe, J., & Ebizuka, N. 2005, *A&A*, 438, L17
- Kraemer, K. E., Lisse, C. M., Price, S. D., et al. 2005, *AJ*, 130, 2363
- Kresáková, M. 1974, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 25, 20
- Lidov, M. L. 1961, *Iskusstvennie Sputniki Zemli*, 8, 5
- Luu, J. X., & Jewitt, D. C. 1990, *AJ*, 99, 1985
- Mann, I., Kimura, H., Biesecker, D. A., et al. 2004, *Space Sci. Rev.*, 110, 269
- Meyer, M. 2003, *Int. Comet Quart.*, 25, 115
- Moiseev, N. D. 1945, *Trudy Gosudarstvennogo Astron. Inst. P.K. Shternberga*, 15, 75
- Nakano, S. 2005, Apollo asteroid 2005 UD, <http://www.oaa.gr.jp/~muramatu/mp/2005ud.htm>
- Nilsson, C. S. 1964, *Aust. J. Phys.*, 17, 158
- Nozaki, W., Nakamura, T., & Noguchi, T. 2006, *M&PS*, in press
- Ohtsuka, K., Shimoda, C., Yoshikawa, M., & Watanabe, J. 1997, *EM&P*, 77, 83
- Ohtsuka, K., Nakano, S., & Yoshikawa, M. 2003, *PASJ*, 55, 321
- Rivkin, A. S., Howell, E. S., Vilas, F., et al. 2002, in *Asteroids III*, ed. W. F. Bottke Jr. et al. (Tucson: Univ. Arizona), 235
- Ryabova, G. O. 2001, in *Proc. of Meteoroids 2001 Conf.*, ed. B. Warmbein, ESA SP-495 (Noordwijk: ESTEC), 77
- Sekanina, Z. 1976, *Icarus*, 27, 265
- Sekanina, Z., & Chodas, P. W. 2005, *ApJS*, 161, 551
- Southworth, R. B., & Hawkins, G. S. 1963, *Smithon. Contr. Ap.*, 7, 261
- Tholen, D. J. 1985, *IAU Circ.*, 4034
- Whipple, F. L. 1983, *IAU Circ.*, 3881

[プロGRESS・レポート] 四分儀座流星群に及ぶインパルス効果

大塚 勝仁・吉川 眞・渡部 潤一・日高 英治・村山 秀幸

四分儀座流星群の遠日点付近で、木星に接近遭遇する事により現れるインパルス摂動は、永年摂動と共鳴摂動と共に、四分儀群の軌道進化に大きな影響を及ぼす。Ohtsuka et al. (1995) は 1987 年四分儀群が約半軌道周期前に、木星に接近遭遇して、軌道が変化した様子を、数値積分を用いて解析し、この特異な現象を観測的に世界で初めて見出した。その際、1987 年よりも 1 木星軌道周期後、即ち 12 年後に、再度、その様な一群が回帰する可能性を指摘していた。それに従い、東京流星ネットワークでは 1999 年により高精度化を目指し 85-135 mm レンズを用いて四分儀群の 3 点同時観測を行い、6 個の群流星データを得る事が出来た。そこで 1987 年のデータとともに、流星出現から約 100 年前まで遡って、個々の軌道運動を再現し、軌道進化の過程を調査してみた。写真四分儀群の観測精度を考慮すれば 100 年間の backward integrations で十分と思われる。1987 年の軌道データは Ohtsuka et al. (1995) より採用した。観測から得られた 1999 年四分儀群の軌道は以下の通りである (J2000 分点)。

流星番号	JDT	M	a	e	i
T9901-01	2451182.25141	0.530	3.368	0.708	175.60 282.9325 70.76
T9901-02	2451182.25769	0.435	2.986	0.671	177.02 282.9389 72.69
T9901-03	2451182.29133	1.259	2.983	0.672	171.37 282.9734 72.12
T9901-04	2452282.29639	0.027	4.027	0.756	179.70 282.9786 71.32
T9901-05	2451182.32375	0.295	3.229	0.696	177.71 283.0066 73.08
T9901-06	2451182.35801	1.640	2.971	0.672	168.79 283.0417 72.09

それらのデータを用いて実行された数値積分の概要は

- ・積分の epoch : 地心より地球の重力半径 の 50 倍 (約 0.1 AU) 離れた地点、流星出現からその地点までは 2 体問題として扱って、差し支えない。
- ・積分期間 : 約 100 年 (36525 日) 過去に遡って計算
- ・積分法 : 外挿法 (cf. Vitagliano, 1997)
- ・摂動力 : ニュートン重力による摂動
- ・摂動天体 : 8 惑星と 4 大 MBA と月と冥王星
- ・摂動天体の位置と速度 : 惑星座標 JPL DE406 より
- ・積分の刻み巾 : 自動調整

各軌道要素に対するその様な出力の結果を、fig. 1 にまとめた。1987 年の結果と 1999 年の結果を比較すると、1987 年四分儀群の方が、圧倒的に軌道の変化が大きい。1999 年四分儀群も半軌道周期前に木星に接近したはずであるが、1987 年四分儀群ほど drastic な変化は見られない。それでも 1999 年四分儀群の軌道傾斜角には 1 ~ 2 度程度のインパルスを見る事が出来る。そこで各年の各流星体の木心距離を調べてみた。最接近時の木心データは以下の通りである。

	TT	v		TT	v
TN20	1984 Aug 16.60722	0.255 13.47	T9901-01	1996 Jul 03.70438	0.558 13.01
TN21	1984 Sep 02.56877	0.329 13.50	T9901-02	1996 Jul 12.17779	0.241 13.44
TN22	1984 Aug 21.53189	0.255 13.28	T9901-03	1996 Aug 01.82391	0.608 13.25
TN23	1984 Sep 14.29834	0.692 13.13	T9901-04	1996 Aug 08.57869	1.893 13.54
TN24	1984 Aug 25.20847	0.080 13.90	T9901-05	1996 Jun 26.58330	0.420 13.28
TN25	1984 Sep 09.25140	0.548 13.43	T9901-06	1996 Aug 13.39913	0.825 13.25

ここでは左右 2 列にまとめてあり、左より流星番号、時刻 (TT)、距離 (AU)、相対速度 (km/sec) である。これを見ても判るように、木星インパルスが 1999 年の方が弱かった理由としては、1999 年四分儀群は 1987 年四分儀群ほど、木星に接近していなかったからである。木星の軌道周期は、より正確には 11.86 年である。従ってその端数が、12 年おきの四分儀群と木星の相対位置の僅かなずれを生じさせ、結果として地球に飛び込むべき四分儀群がどの程度、インパルス効果の影響を受けたか？が決まるのである。このあたりは、対衝時における火星の地心距離の変化と同様かも知れない。これに従えば、四分儀群の軌道周期を固定して考えると、地球は約 83 年に一度、大きなインパルス効果を受けた四分儀群と遭遇する事になる。更に 1987 年四分儀群が最も木星インパルス効果を受けているのであれば、次回にそのような四分儀群の回帰が観測されるのは、2070 年という事になる。とはいえ、今後も 12 年毎の観測は重要であると思われる (次回は 2011 年である)。もし母天体候補であるアモールタイプ小惑星 2003 EH1 が最近まで活動していたのであれば (Wiegert & Brown, 2004)、本来、地球とは交差しないトレイルを地球にもたらず可能性もあるからである。

Fig. 1 において、長期的な視野に立って、より遡ってみると、1987 年と 1999 年四分儀群は、それ以前にもたびたび木星に接近しているようである。それによりこれら四分儀群が過去には、とりわけインパルス摂動により、各軌道要素とも拡がりがあり、空間的に大きく拡がっていた様子を想像する事ができる。つまり四分儀群に及ぶインパルス効果は、この短い期間において、四分儀群の軌道進化を速めている事も理解できる。

もし四分儀群が進化において、必ず地球と交差する phase があると仮定すると、その拡がりをヒントにして、これまで過去の観測から得られている精度の良い写真四分儀群全てを集めて、同様の手続きで処理して、より大昔に遡ってシミュレーション解析する事により、ある epoch での四分儀群が本来持っていた「四分儀群の空間的な拡がり」という情報が得られる可能性がある。2003 EH1 との関連性を議論する場合、そういったデータ解析されたものと比較すべきではないであろうか？

文献

- Ohtsuka, K., Yoshikawa, M. & Watanabe J.-i. 1995, PASJ **47**, 477
 Vitagliano, A. 1997, CeM&DA **66**, 293
 Wiegert, P. & Brown, P. 2004, EM&P **95**,81

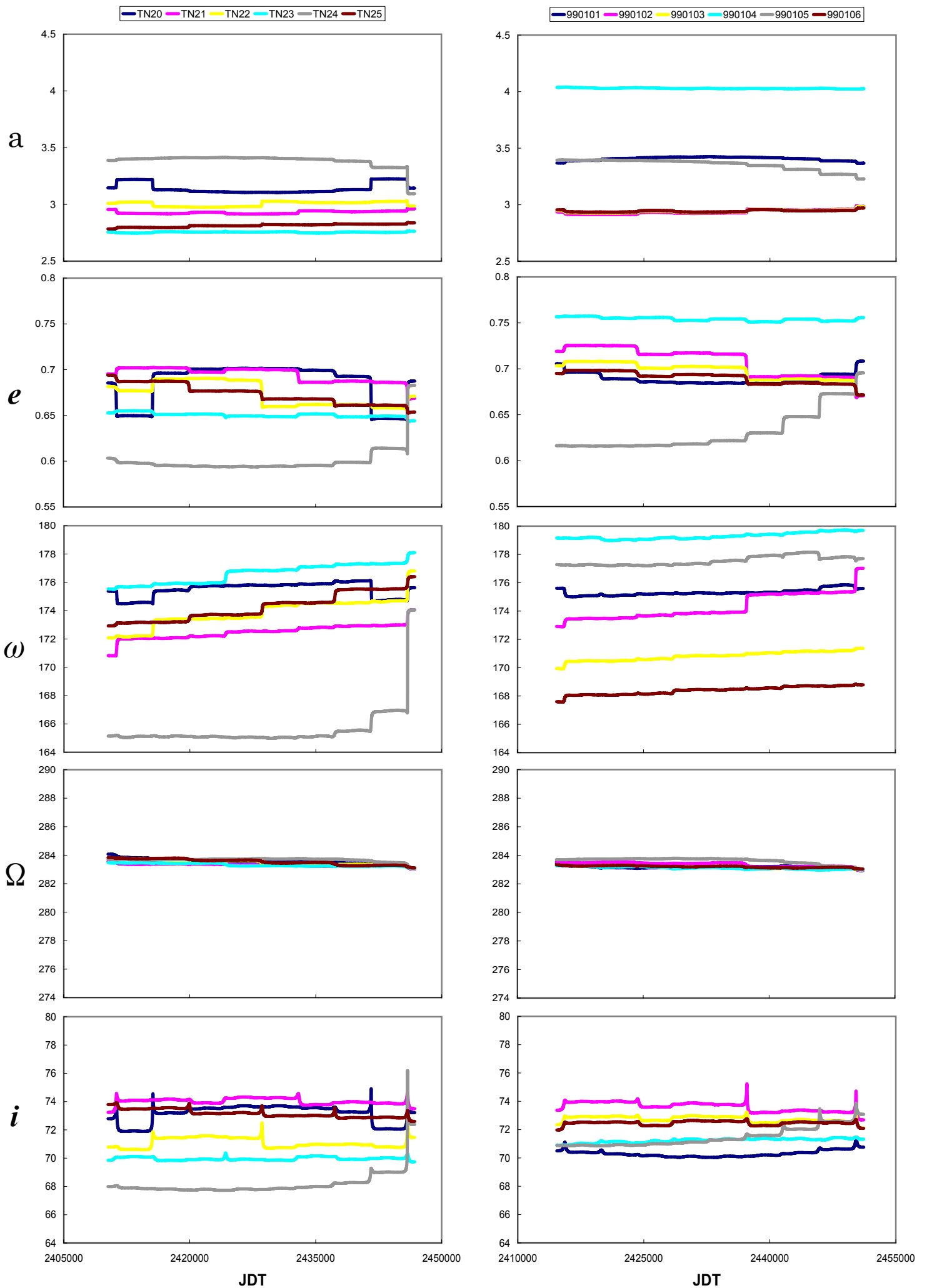


Fig. 1. Orbital evolutions of the Quadrantids in 1987 (left column) and 1999 (right column).

[プロGRESS・レポート 2] 四分儀座流星群に及ぶインパルス効果

大塚 勝仁・吉川 真・渡部 潤一・日高 英治・村山 秀幸

四分儀座流星群の遠日点付近で、木星に接近遭遇する事により現れるインパルス摂動は、永年摂動と共鳴摂動と共に、四分儀群の軌道進化に大きな影響を及ぼす。Ohtsuka et al. (1995) は東京天文台で観測された 1963 年四分儀群と東京流星ネットワークによる 1987 年四分儀群が約半軌道周期前に、木星に接近遭遇して、軌道が変化した様子を、数値積分を用いて解析し、この特異な現象を観測的に世界で初めて見出した。その際、1987 年よりも 1 木星軌道周期後、即ち 12 年後に、再度、その様な一群が回帰する可能性を指摘していた。それに従い、東京流星ネットワークでは 1999 年により高精度化を目指し 85-135 mm レンズを用いて四分儀群の 3 点同時観測を行い、6 個の群流星データを得る事が出来た。

そこで 1963 年と 1987 年のデータとともに、流星出現から約 200 年前まで遡って、個々の軌道運動を再現し、軌道進化の過程を調査してみた。写真四分儀群の観測精度を考慮すれば大惑星との接近遭遇を調べるのには数回帰の backward integrations しか通用しないと思われるが、四分儀群流星体の力学進化の傾向を調べる為に、更に遡った進化計算は意味があるはずである。

個々の 1963 年の 3 四分儀群と 1987 年の 6 四分儀群の軌道データは Ohtsuka et al. (1995) より採用した。1999 年四分儀群の軌道の精度に関しては、輻射点位置は $0^{\circ}.05$ 角以内で、大気外速度は 2 % 以内で決定できている。1999 年四分儀群の日心軌道要素は以下の通りである (J2000 分点)。

流星番号	JDT	M	a	e		i	
T9901-01	2451182.25141	0.530	3.368	0.708	175.60	282.9325	70.76
T9901-02	2451182.25769	0.435	2.986	0.671	177.02	282.9389	72.69
T9901-03	2451182.29133	1.259	2.983	0.672	171.37	282.9734	72.12
T9901-04	2451182.29639	0.027	4.027	0.756	179.70	282.9786	71.32
T9901-05	2451182.32375	0.295	3.229	0.696	177.71	283.0066	73.08
T9901-06	2451182.35801	1.640	2.971	0.672	168.79	283.0417	72.09

それらのデータを初期値として実行された backward integration の概要は

- ・積分の epoch : 地心より地球の重力半径の 50 倍 (約 0.1 AU) 離れた地点、流星出現からその地点までは 2 体問題として扱って、差し支えない。
- ・積分期間 : 約 200 年過去に遡って計算
- ・積分法 : 外挿法 (cf. Vitagliano, 1997)
- ・摂動力 : ニュートン重力による摂動
- ・摂動天体 : 8 惑星と 4 大 MBA と月と冥王星
- ・摂動天体の位置と速度 : 惑星座標 JPL DE406 より
- ・積分の刻み巾 : 自動調整

各軌道要素に対するその様な出力の結果を、fig. 1 にまとめた。各年の流星は色別でまとめられており、それぞれの観測日に地球と衝突してその一生を終えている。各年度の四分儀群の結果を比較すると、1987 年四分儀群が、他の年のものより軌道の変化が大きい。1963 年と 1999 年四分儀群も半軌道周期前に木星に接近したはずであるが、1987 年四分儀群ほど drastic な変化は見られない。そこで我々はそれが各年度の四分儀群に及んだ木星摂動影響の違いにあると予想し、各年の各流星体の木星との encounter の様子を調べてみた。最接近時の木心データは以下の通りである。

1963 四分儀群

	TT		Lj		Vj
M6301	1960 Nov 29.86734		282.13	0.286	13.55
M6302	1960 Nov 23.39934		281.59	0.369	13.37
M6303	1960 Nov 23.30667		281.58	0.558	13.32

1987 四分儀群

	TT		Lj		Vj
TN20	1984 Aug 16.60722		282.04	0.255	13.47
TN21	1984 Sep 02.56877		283.44	0.329	13.50
TN22	1984 Aug 21.53189		282.44	0.255	13.28
TN23	1984 Sep 14.29834		284.42	0.692	13.13
TN24	1984 Aug 25.20847		282.75	0.080	13.90
TN25	1984 Sep 09.25140		284.00	0.548	13.43

1999 四分儀群

	TT		Lj		Vj
T9901-01	1996 Jul 03.70438		282.70	0.558	13.01
T9901-02	1996 Jul 12.17779		283.40	0.241	13.44
T9901-03	1996 Aug 01.82391		285.12	0.608	13.25
T9901-04	1996 Aug 08.57869		285.67	1.893	13.54
T9901-05	1996 Jun 26.58330		282.11	0.420	13.28
T9901-06	1996 Aug 13.39913		286.08	0.825	13.25

ここで各表は左より流星番号、時刻 (TT)、木星の黄経、木星心距離 (AU)、相対速度 (km/sec) である。木星心距離を見ても判るように、木星インパルスは平均して 1987 年四分儀群に一番影響したであろう事が伺える。1963 年と 1999 年四分儀群は、平均的に見ると 1987 年四分儀群ほど木星に接近していなかった。またインパルス摂動を受けた四分儀群が接近した木星黄経を見ると年と共に増加してずれる様子を知ることが出来る。木星の軌道周期は、より正確には 11.86 年である。従ってその端数が、12 年おきの四分儀群と木星の相対位置の僅かなずれを生じさせ、結果として地球に飛び込むべき四分儀群がどの程度、インパルス効果の影響を受けたか? が決まるのである。このあたりは、対衝時における火星の地心距離の変化と同様かも知れない。これに従えば、地球に飛び込むべき四分儀群の軌道周期を固定して考えると、更に 96P-四分儀複合群の軌道進化の道筋に満遍なく流星体が分布しているとすると、地球は約 83 年に一度、大きなインパルス摂動を受けた四分儀群と遭遇する事になる。更に 1987 年四分儀群が最も木星インパルス効果を受けているのであれば、次回にそのような四分儀群の回帰が観測されるのは、2070 年という事になる。とはいえ、今後も 12 年毎の観測は重要であると思われる (次回は 2011 年である)。

我々は同時に母天体候補であるアモールタイプ小惑星 2003 EH1 の運動も過去に遡って計算した。その進化過程は併せて fig. 1 に示されている。もし 2003 EH1 が最近まで活動していたのであれば (Wiegert & Brown, 2004)、本来、地球とは交差しないトレイルを地球にもたらす可能性があるからである。近年の epoch に基づく軌道要素で四分儀群と大きく異なる点は近日点距離が ~ 1.2 AU もあり、それに従うかのように軌道離心率が小さい事である。2003 EH1 もたびたび木星に接近し、その際、インパルスの軌道進化している。最近では 1972 年 10 月 25.31299 日 (TDT) に木星に 0.277 AU まで接近して、とりわけ近日点距離が 0.1 AU 以上大きくなった。1975 年四分儀群の軌道データは得られていないが、おそらく 1975 年四分儀群とは大変近い位置関係にあったものと思われる。

より長期的な視野に立って fig. 1 を眺めてみると、各年四分儀群は、それ以前にもたびたび木星に接近しているようである。それは地球で観測されうるほぼ maximum にある $q \sim 1$, $i \sim 70^\circ$ 、そして $\sim 170^\circ$ という四分儀群の軌道が木星と encounter が起きやすい軌道進化 phase にいるからである。つまり四分儀群に及ぶインパルス効果は、この短い期間において、四分儀群の軌道進化を速めている事も理解できる。そして約 150 年前には、

2003 EH1 がどの軌道要素においても、ほぼ四分儀群の中央に位置していたこともわかる。ただし は少し小さい。これはインパルス効果を受けた四分儀群の がもともと大きかった事による。それは恐らくそれ以前にもたびたび木星に encounter した履歴を物語るのかもしれない。

我々は地球と衝突する四分儀群流星だけしか軌道の情報を得る事が出来ない。しかしながら、四分儀群は地球軌道の外側に大きく広がっているであろう。もし四分儀群が進化において、必ず地球と交差する phase があると仮定すると、その広がりをヒントにして、これまで過去の観測から得られている精度の良い写真四分儀群全てを集めて、同様の手続きで処理して、より大昔に遡ってシミュレーション解析する事により、例えば数百年前のある epoch での四分儀群が本来持っていた「四分儀群の空間的な広がり」という情報が得られる可能性がある。2003 EH1 との関連性を議論する場合、そういったデータ解析されたものと比較すべきではないであろうか？

文献

Ohtsuka, K., Yoshikawa, M. & Watanabe J.-i. 1995, PASJ **47**, 477

Vitagliano, A. 1997, CeM&DA **66**, 293

Wiegert, P. & Brown, P. 2004, EM&P **95**,81

Future works

- ・ TN24 の 1984 年接近時の jovicentric の軌道を導出する。暫間的に木星の衛星軌道になっていたかもしれない。
- ・ インパルス効果を受けた四分儀群は、木星摂動により個数密度が上がったか? 1975 年四分儀群と 1987 年四分儀群は記録上平年の 2 倍近い出現を呈した。

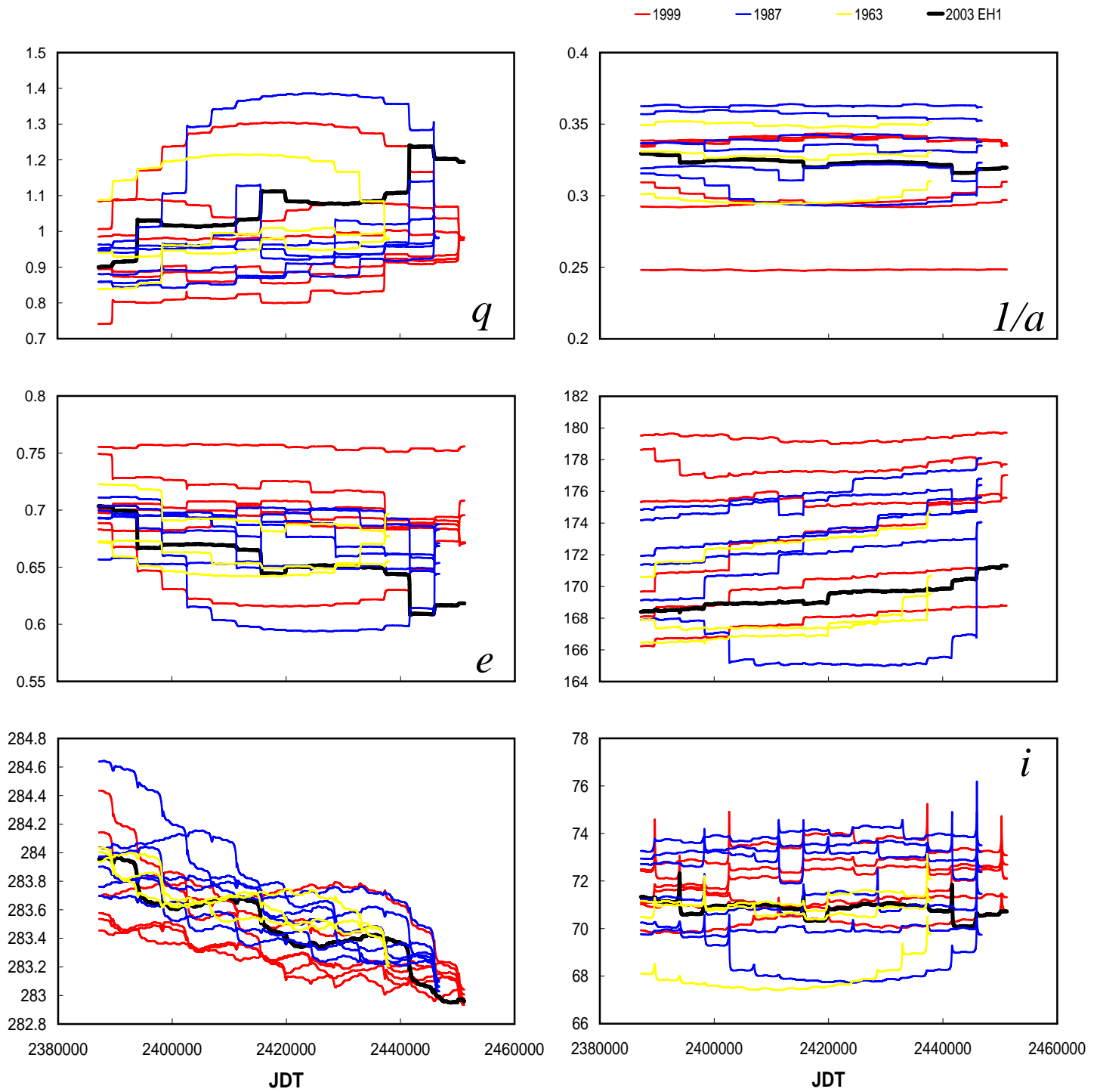


Fig. 1. Orbital evolutions of the 1963, 1987, 1999 Quadrantids and 2003 EH1.

おうし座流星群の共鳴スウォームと木星の関係

内山茂男 (NMS)

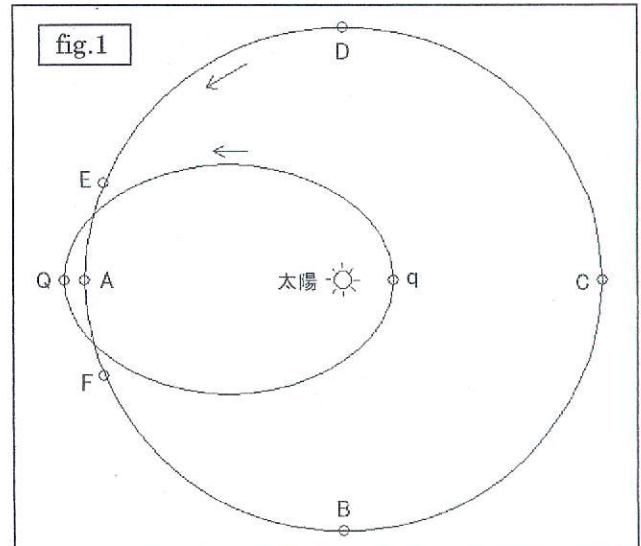
1. 共鳴とは

例：図 1 は、木星公転周期：小天体公転周期=2：1

*ケース 1：(木星, 小天体) = (A, Q) からスタート
 → (B, q) → (C, Q) → (D, q) → (A, Q) → ……
 → 繰り返し (A, Q) で大接近
 → すぐに軌道変化

*ケース 2：(木星, 小天体) = (A, q) からスタート
 → (B, Q) → (C, q) → (D, Q) → (A, q) → ……
 → (A, Q) での接近がない → 軌道が安定

*ケース 3：(木星, 小天体) = (E, Q) からスタート
 → 木星の引力により、小天体減速
 → 小天体の軌道長半径減少
 → 小天体の公転周期減少
 → 小天体が 2 公転する間に、木星は 1 公転弱
 → 小天体が 2 公転して Q に来たとき、木星は E よりやや D 寄り → 両天体は接近しない



まとめ：楕円軌道天体と木星の公転周期が簡単な整数比にあるとき共鳴状態にあると呼び、小天体は木星に接近しない位置を保つ。

2. おうし群の共鳴スウォーム

(1) Asher & Izumi, 1998 によると

木星公転周期：流星物質=7：2 という共鳴で流星が集中している領域(スウォーム)あり。スウォーム中心との平均近点角の差 ΔM が ± 30 度以内で流星数と火球が増加、 ± 40 度以内でやや増加。

(2) 7：2 の共鳴とは

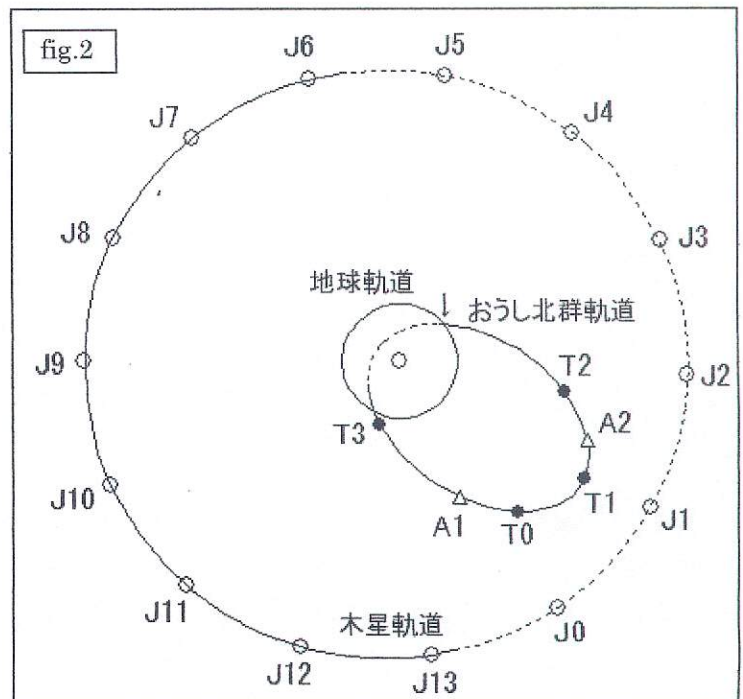
木星が 2 公転する間に、共鳴領域は 7 公転。
 → 木星 1 公転の間に、共鳴領域は 3 公転半。
 → 木星が 14 分の 1 公転する間に、共鳴領域は 4 分の 1 公転。

* 図 2 で木星 J0~J13 は 14 分の 1 公転ずつ、おうし群 T0~T3 は 4 分の 1 公転ずつ作図。(図 2 のおうし群は北群の例。エンケ彗星ではない。)

(3) おうし群は遠日点付近で木星軌道に近づくが、軌道傾斜角の関係で遠日点から少しずれたところで最接近。(T1 付近と J1 付近)

(4) 木星に接近しない共鳴領域は

*ケース 1：(木星, 流星物質) = (J1, T1) からスタート → (J1, T3) → (J1, T1) → (J1, T3) → ……
 → 木星が J1 のとき、T1 と T3 にいた流星物質は、繰り返し木星に接近 → すぐに軌道変化



* ケース 2 : (木星, 流星物質) = (J1, T0) からスタート → (J2, T1) → (J0, T1) → (J1, T2) → . . .

- 木星が J1 のとき、T0 と T2 にいた流星物質が、もっとも木星に近づかない。ただし、木星からの距離をそれほど大きく保てない。(図の T0 と T2 は木星の引力の影響が最も少ない点を見つけて図示したもの)
- (J1, T0) の位置関係のとき加速 → 公転周期増加、(J1, T2) の位置関係のとき減速 → 公転周期減少
- 公転周期が増減を繰り返しながら、共鳴領域付近を保つ

3. アッシャーの共鳴スウォームの不思議その 1 : 共鳴の位置

(1) 共鳴の位置

- * 次に木星が J1 の位置に来るのは 2009 年 11 月 4 日。このときのアッシャーのスウォームは図 2 の A1。
- 木星に近づかない共鳴領域 T0 との位置の違いは、平均近点角で 43 度! (表 1)

(2) アッシャーの共鳴位置決定法 (Asher & Izumi, 1998)

- * 1951 年にオランダの観測者が 26 個のおうし群火球を観測。→ この位置は、 $\Delta M = 35^\circ$
- * 1975 年 6 月 30 日前後に月面の地震計に流星物質の月面衝突が記録。これは、おうし座 β 群 (昼間群) による活動と推測。→ このときのスウォーム中心は確かに、図 2 の T3 近くの地球軌道付近。

表 1. スウォーム中心との平均近点角の差 ΔM (アッシャーと内山比較)

年	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Asher	-13°	94°	-160°	-54°	52°	158°	-95°	11°	117°	-137°	-30°
内山	30°	137°	-117°	-11°	95°	-159°	-52°	54°	160°	-94°	13°
年	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Asher	76°	-178°	-72°	34°	141°	-113°	-7°	99°	-154°	-48°	58°
内山	119°	-135°	-29°	77°	-176°	-70°	36°	142°	-111°	-5°	101°

(3) 過去の出現状況

- * 1998 年は出現数・火球数増加 (が見られた記憶が . . .)
- * 2005 年も出現数・火球数増加 (Dubietis and Arlt 2006)
- 内山共鳴位置からは離れている。
- * 1974 年に出現数・火球数増加 (Asher and Izumi 1998, Table1)。
- アッシャー $\Delta M = -42$ 度 (増加可能性の限界)、内山 $\Delta M = 1$ 度 (共鳴の中心付近)。

(4) 今後の注目年

- * 両者とも ΔM が $\pm 40^\circ$ 以内 : 2008 年、2015 年
- * Asher ΔM だけ $\pm 40^\circ$ 以内 : 2012 年
- * 内山 ΔM だけ $\pm 40^\circ$ 以内 : 2011 年、2018 年

4. アッシャーの共鳴スウォームの不思議その 2 : 共鳴スウォームは 1 ヶ所

- * 共鳴位置は T0 と T2 の 2 ヶ所あるはず (木星が J1 のとき)。
- しかし、アッシャーの共鳴スウォームは 1 ヶ所だけ。
- その近傍に最近流星物質を供給した母天体があれば説明可能
- ところが、エンケ彗星の現在の降交点は近日点付近で水星軌道に近いところ。
- エンケ彗星が共鳴流星物質の供給源になっているとは考えにくい。
- おうし群 (北群・南群それぞれ) の母天体は別にあり、意外に若い流星群???

参考文献

- Asher D. J. and Izumi K. (1998): "Meteor observations in Japan: new implications for a Taurid meteoroid swarm", MNRAS 297, 23-27.
- Dubietis A. and Arlt R. (2006): "Spectacular Taurid meteor shower in 2005", WGN 34:1.

サッチャー彗星のダスト・トレイルと こと座流星群

佐藤幹哉 (NMS・NAOJ・FAS)

観測指針用の基礎データとして、こと座流星群のダスト・トレイルを計算した。
過去の活発な出現状況と比較したところ、比較的よく説明できるケースと、あまりよく合致しないケースがあった。
期待される将来の活発な出現は、2040年・2041年だが、放出速度が大きく微光となる可能性が高い。

【先行研究】

E. Lyytinen & P. Jenniskens 2003 が詳しい。

【母天体】

- 母天体は、周期約400年と言われるサッチャー彗星：C/1861 G1 (Thatcher) である。
- JPLの「Small-Body Database Browser」の1861年回帰時の軌道要素から、その1回帰前の軌道要素を計算した（非重力効果を含めず）。前回回帰は、1472年10月14日に近日点を通過した。
→このときにダストを放出させ、1回帰トレイルの分布を計算した。（放出速度：-30~+50 m/s）

【計算結果】

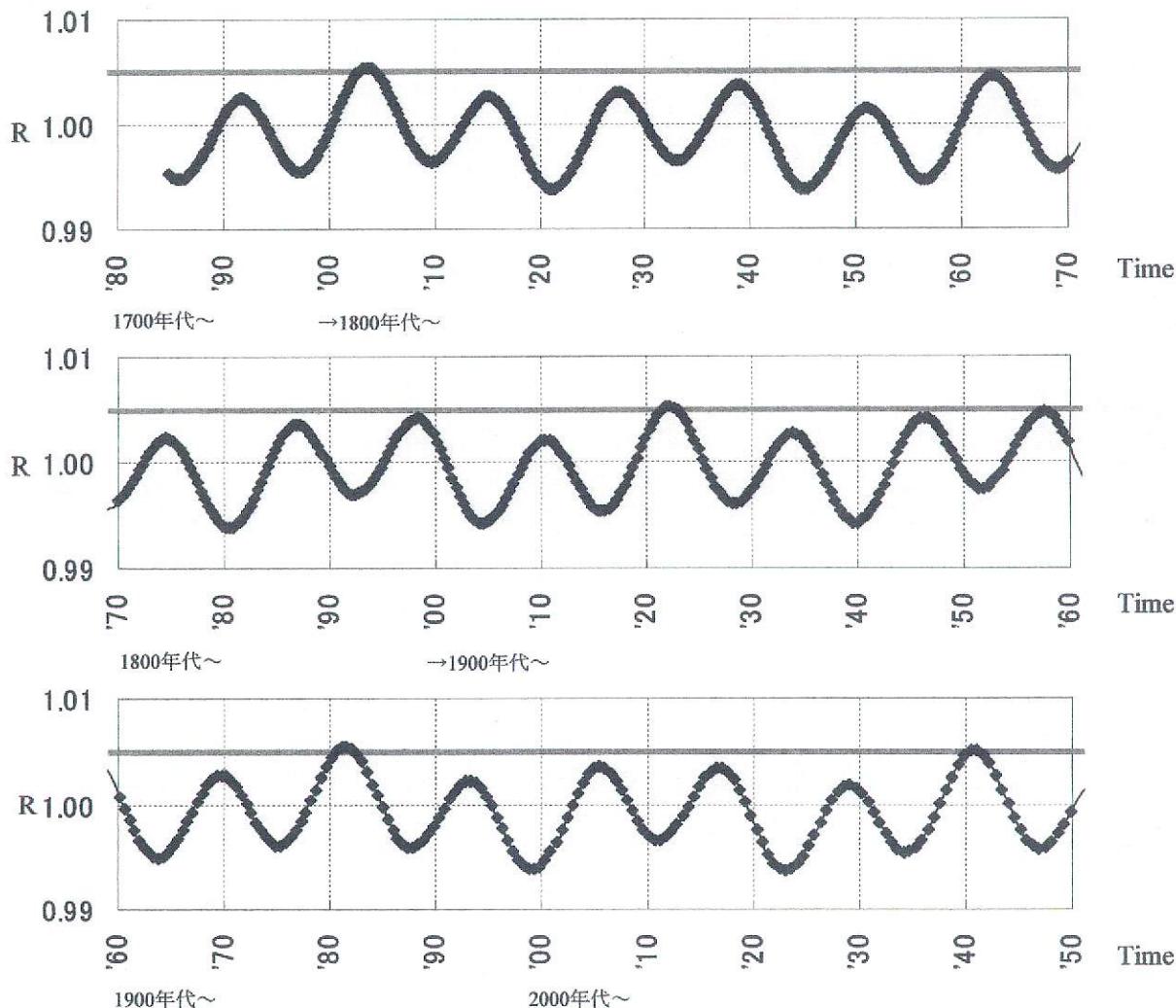


図 1 回帰ダスト・トレイルの分布

R: トレイルの降交点の日心距離 (AU)、Time: トレイルの降交点通過時刻

表1 出現が期待されるおもなダスト・トレイルとの接近年のデータ

Date (UT)	Expected peak time		Δr (AU)	Ejection Velocity (m/s)	fM	Expected position of radiant		Vg (km/s)	State	Remarks
	Time	LS(2000)				α (deg.)	δ (deg.)			
1-rev. (1472)										
1802 Apr 19.96	22:59	31.898	-0.0011	-22.13	1.1	271.99	+33.50	47.07	*	
1803 Apr 20.29	06:53	31.972	-0.000080	-21.70	1.1	272.08	+33.46	47.07	***	Apr.20 7h ZHR=670
1804 Apr 19.62	14:56	32.052	-0.00032	-21.27	1.1	272.15	+33.46	47.08	**	
1862 Apr 20.37	08:59	31.932	-0.0010	+0.31	1.1	271.99	+33.49	47.10	*	
1863 Apr 20.71	17:01	32.011	-0.00091	+0.63	1.1	272.09	+33.47	47.11	**	HR=40
1921 Apr 21.48	11:28	31.913	-0.00055	+17.36	1.1	271.97	+33.52	47.09	**	
1922 Apr 21.82	19:38	31.991	-0.000093	+17.62	1.1	272.04	+33.47	47.11	***	Apr.21 19:45 HR=96 Ls=31.994 ZHR=360-600 Ls=32.006 ZHR=180
1923 Apr 22.14	03:25	32.067	-0.00086	+17.87	1.1	272.12	+33.47	47.13	**	
1945 Apr 21.61	14:44	31.897	-0.0016	+23.27	1.1	271.95	+33.53	47.12	*	Ls=32.042 HR=92
1946 Apr 21.95	22:41	31.966	-0.0011	+23.50	1.1	271.99	+33.50	47.13	*	Ls=31.97 ZHR=80-110
1947 Apr 22.26	06:13	32.029	-0.0018	+23.74	1.1	272.06	+33.47	47.16	*	
1956 Apr 21.47	11:19	31.936	-0.0014	+25.81	1.1	271.99	+33.51	47.13	*	
1957 Apr 21.80	19:11	32.000	-0.00060	+26.04	1.1	272.03	+33.47	47.14	**	
1958 Apr 22.13	03:02	32.073	-0.00096	+26.26	1.1	272.12	+33.46	47.16	**	
1980 Apr 21.61	14:38	31.920	-0.00053	+31.04	1.1	271.99	+33.50	47.12	**	Ls=31.88 ZHR=23
1981 Apr 21.95	22:45	31.996	+0.00029	+31.25	1.1	272.04	+33.49	47.12	**	
1982 Apr 22.28	06:48	32.075	-0.00021	+31.46	1.1	272.12	+33.45	47.15	**	Apr.22 6:50 HR=100
2040 Apr 22.01	00:21	31.942	-0.00015	+42.47	1.1	271.99	+33.51	47.13	**	?
2041 Apr 22.36	08:36	32.022	-0.00019	+42.64	1.1	272.03	+33.48	47.15	**	?

State ***: $|\Delta r| < 0.0001$, **: $|\Delta r| < 0.001$, *: $|\Delta r| < 0.002$

図の通り、ダスト・トレイルは、およそ12年 (=木星の1公転) ごとに地球軌道に接近する。ただし、地球と交差するまでに接近するのはそのうちの限られたケースである。およそ60年ごとの周期が見られ、土星の2公転 (59年) と関係している可能性が高い。

【実際の出現状況との比較】

■計算上好条件で、活発な出現も観測されている

1803年、1863年、1922年、(1980年)、1982年

■活発な出現が観測されているが、さほど条件がよく無い

1945年、1946年 ※特に1945年は出現時間帯にもずれがある

■活発な出現が観測されているが、トレイルが接近しない

1849年 (ZHR=54)、1934年 (ZHR=80)、1953年 (HR=77)

→この2ケースは、さらに古いダスト・トレイルの検討が必要であろう。

■比較的好条件だが、活発な出現記録が無い (※は日本で観測可能な時間帯)

1804年※、1921年、1923年、1957年※、1958年、1981年

→出現記録の再調査、天候などのチェックをしたい。

【今後の出現状況】

・2040年、2041年に期待される。(E. Lyytinen & P. Jenniskens 2003とほぼ同様である)

・ただし、放出速度は40m/sを超え、かなり微光な流星の可能性が高い。

・日本では観測できない時間帯である。(残念)

・1回帰トレイルに限ると、2040年以前では期待される年が無い。

【参考文献】

E. Lyytinen & P. Jenniskens 2003, Icarus, Volume 162, Issue 2, p. 443-452.

The Dynamics of Low-Perihelion Meteoroid Streams

Paul A. Wiegert (Earth Moon Planet (2008) 102:15-26)

Abstract The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) has collected information on a number of weak meteor showers that have not been well characterized in the literature. A subsample of these showers (1) do not show a strong orbital resemblance to any known comets or asteroids, (2) have highly inclined orbits, (3) are at low perihelion distances ($\ll 1$ AU) and (4) are at small semimajor axes ($\ll 2$ AU). Though one might conclude that the absence of a parent object could be the result of its disruption, it is unclear how this relatively inaccessible (dynamically speaking) region of phase space might have been populated by parents in the first place. It will be shown that the Kozai secular resonance and/or Poynting-Robertson drag can modify meteor stream orbits rapidly (on time scales comparable to a precession cycle) and may be responsible for placing some of these streams into their current locations. These same effects are also argued to act on these streams so as to contribute to the high-ecliptic latitude north and south toroidal sporadic meteor sources. There remain some differences between the simple model results presented here and observations, but there may be no need to invoke a substantial population of high-inclination parents for the observed high-inclination meteoroid streams with small perihelion distances.

Table 1 Comparison of the orbits of 96P/Machholz (Marsden and Williams 2005) and the Daytime ϵ Perseids

Name	a (AU)	q (AU)	e	i ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	ω ($^\circ$)
D ϵ Perseids	4.6 ± 1	0.13 ± 0.01	0.97 ± 0.01	63 ± 2	96 ± 0.3	40 ± 2
96P/Machholz	3.01	0.123	0.959	59.9	94.5	14.6

Errors for the shower elements are approximate

Table 2 The elements of the Daytime April Piscids and South Daytime May Arietids, together with those of the better-known North and South ι Aquariids

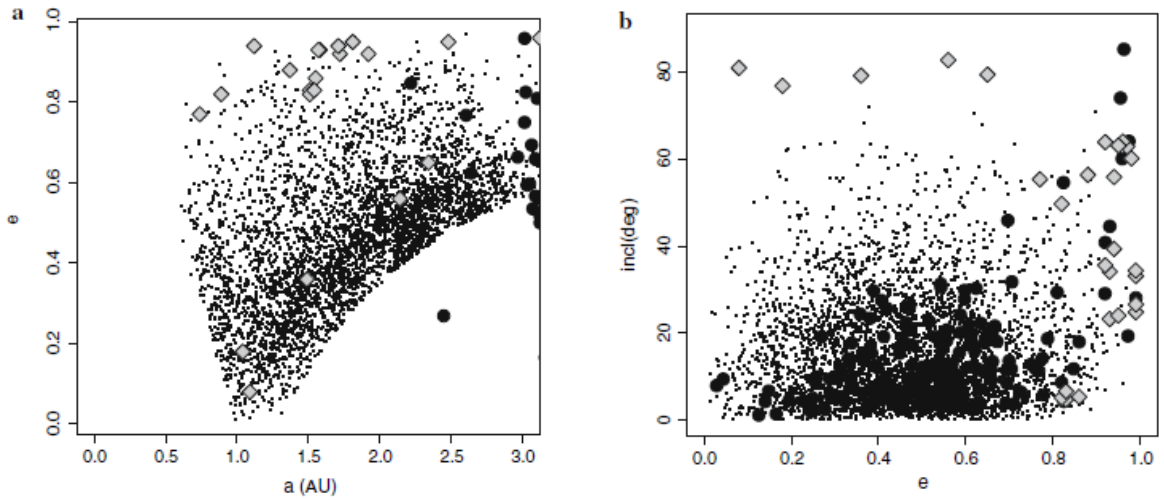
Name	a (AU)	q (AU)	e	i ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	ω ($^\circ$)
Daytime April Piscids	1.51	0.26	0.83	4.7	25	50
S Daytime May Arietids	1.51	0.27	0.82	5.1	227	232
N ι Aquariids	1.52	0.27	0.83	5.7	159	309
S ι Aquariids	1.55	0.22	0.86	5.3	309	134

The orbits are from the CMOR catalogue

Table 3 A selection of the new or previously little-studied meteor showers in the CMOR catalogue

Name	a (AU)	q (AU)	e	i ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	ω ($^\circ$)
N Daytime ω Cetids	1.58	0.12	0.93	34	45	33
S Daytime ω Cetids	1.72	0.14	0.92	36	225	216
S June Aquilids	1.12	0.06	0.94	56	260	159
Daytime γ Taurids	1.57	0.10	0.93	23	266	211
Vulpeculids	0.76	0.17	0.77	55	105	335
N June Aquilids	1.71	0.11	0.94	39	101	328
β Equulids	0.89	0.16	0.82	50	106	330
July σ Cassiopeiids	1.09	1.00	0.08	81	105	217
ψ Cassiopeiids	2.14	0.93	0.56	83	118	141
N δ Aquariids	1.81	0.10	0.95	24	139	329
σ Serpentids	1.92	0.16	0.92	64	276	41
ω Serpentids	1.37	0.16	0.88	56	276	39
θ Coronae Borealids	1.11	0.92	0.17	77	296	125
λ Bootids	1.49	0.96	0.36	79	295	207
ζ Coronae Borealids	2.34	0.82	0.65	80	294	125
α Antilids	2.47	0.14	0.94	64	136	140

Fig. 1 The orbital distributions of near-Earth asteroids (dots, from the AstDys website <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdys/astibo>), comets (black circles, Marsden and Williams (2005)) and the showers discussed here (grey diamonds) in (a) a-e and (b) e-i space (点：地球近傍小惑星、黒丸：彗星、灰色四角：流星群 (表3))



CMORカタログの多くの小流星群 (表3・図1) は、明らかな母天体も既知の流星群との関連も見られない。

多くは $a < 2$ AU、近日点は水星の軌道の内側、大きな軌道傾斜角を持つ。

- このような彗星や小惑星はほとんどない。
- 流星群をつくった彗星が消滅したのか？ (太陽に近いのですぐに枯渇する)
- 母天体はどのようにしてこの領域へ来たのか説明できない。(この領域への力学的軌道進化は遅い)
- 現在の軌道上の粒子の軌道を過去にさかのぼって調べてみた。

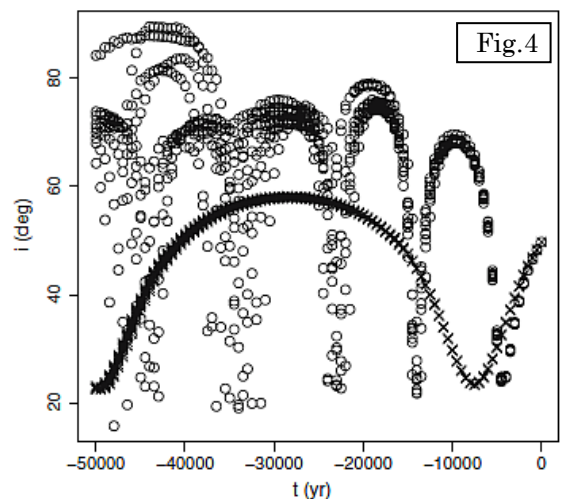
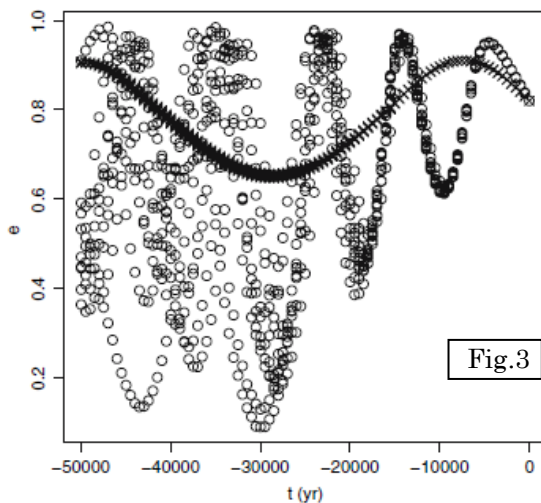
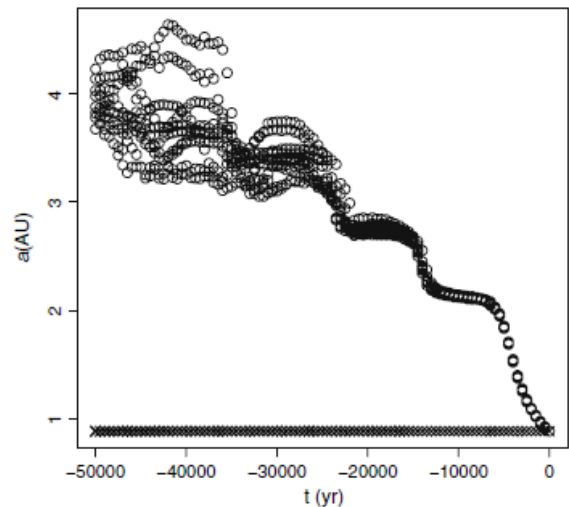
Fig. 2~4 こうまβ群の軌道進化。5万年過去までさかのぼったシミュレーション結果 (粒子数10個)。
○：半径100 μ mの粒子 ($\beta=0.0057$)。×： $\beta=0$ の粒子。

図2：木星族彗星の軌道 ($a \sim 3$ AU) から数千~数万年で $a \sim 1$ AU の軌道に進化する (ポインティング・ロバートソン効果)。
(これらの小流星群は眼視流星群カタログにない)

図3：離心率eが小さくなっていかない (PR効果で期待される)。

- 古在共鳴の効果 (離心率eと軌道傾斜角iが周期的に変動し、eが小さくなるとiが大きくなる (図4))。
- 軌道傾斜角が大きい期間が長い。

⇒ a が小さく、 i が大きい流星群はたくさんできる。
(そのような軌道の母天体は必要ない。)



3.2 The Toroidal Sporadic Meteor Sources

散在流星のトロイダルソースは次の特徴を持つ (Jones and Brown 1993)。

- a) 軌道長半径 a は1AUをピークとする。
 - b) 軌道傾斜角 i は60度付近が多い。
 - c) 離心率 e は小さい (円軌道に近い)。
- 大きい軌道傾斜角の彗星や小惑星は少ない。
 → ここで議論している軌道傾斜角の大きい小流星群 (PR効果で軌道が小さくなり、古在共鳴で軌道傾斜角が大きい) が、やがてトロイダルソースになるのでは？
 → 次の条件でシミュレーションを試みた。
- a) 表3の軌道 (ただし、 $a=3$) から、b) 将来に向かって計算、c) 粒子サイズは50, 100, 200 μm の3通り、d) 各10個。
- 10万年間に、地球に0.1AUまで近づいた流星物質を調べた。

図5 シミュレーション流星物質による輻射点分布。
 → トロイダルソースに近い分布が得られた。
 → 中心は $\pm 50^\circ$ 付近。(トロイダルは $\pm 60^\circ$ 付近)
 → 近いが完全ではない。

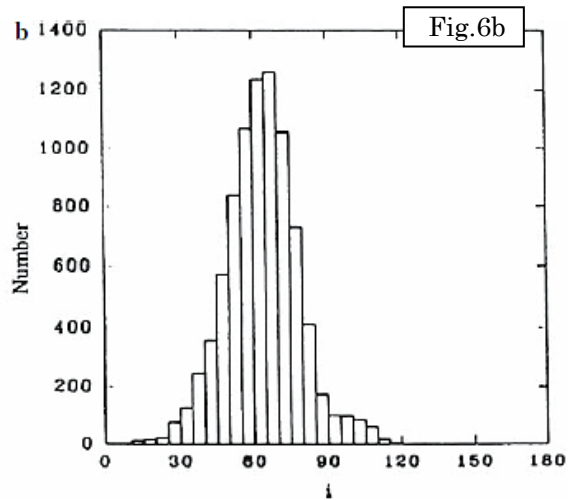
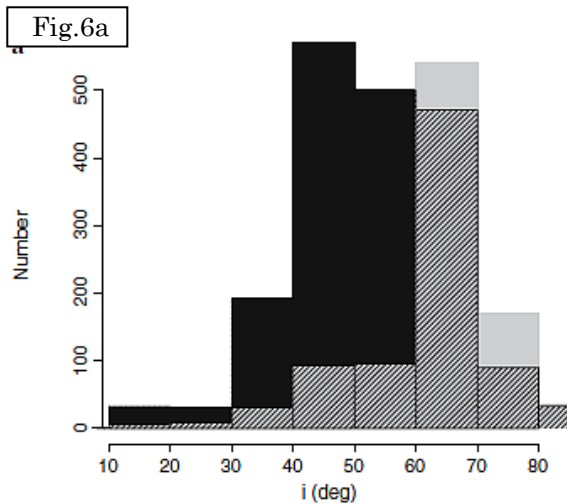
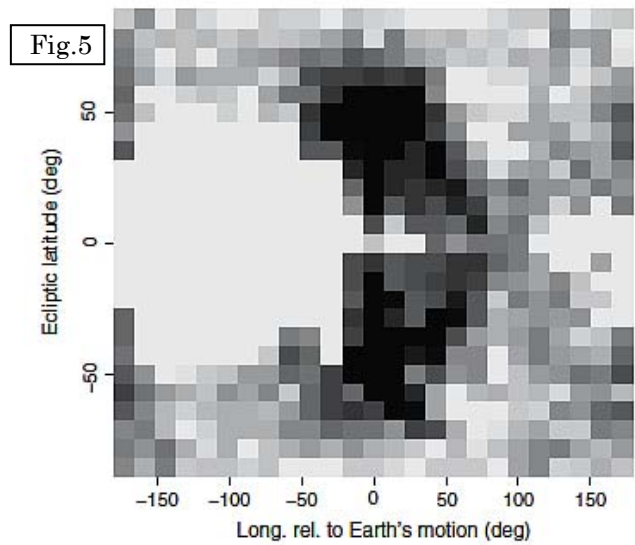


図6a シミュレーションでトロイダル付近を輻射点とする流星物質の軌道傾斜角 i の分布。
 黒は衝突可能性を考慮してウェイトをかけた分布。
 → 観測データ (図6b, Jones and Brown (1993)) と少し似ているが、期待ほどではない。

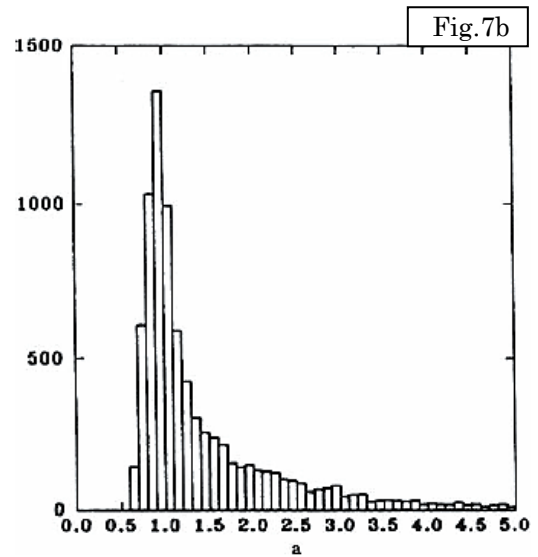
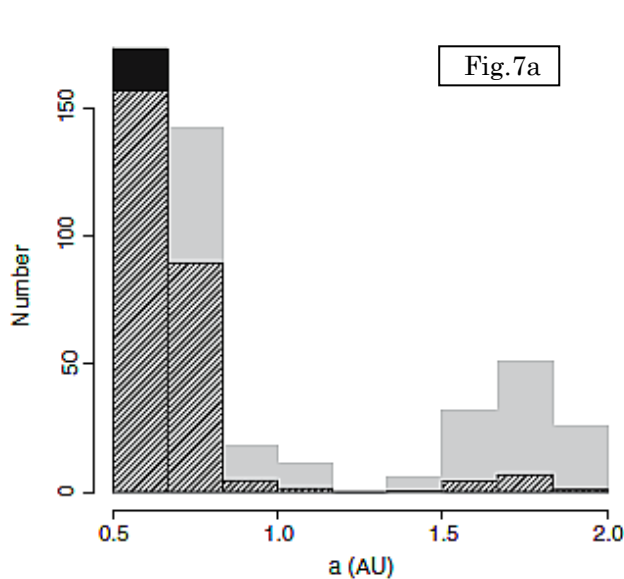


図7a シミュレーションでトロイダル付近を輻射点とする流星物質の軌道長半径 a の分布。

黒は衝突可能性を考慮してウェイトをかけた分布。

→ 観測データ (図7b, Jones and Brown (1993)) と少し似たピークが得られたが、観測データの値より小さい。

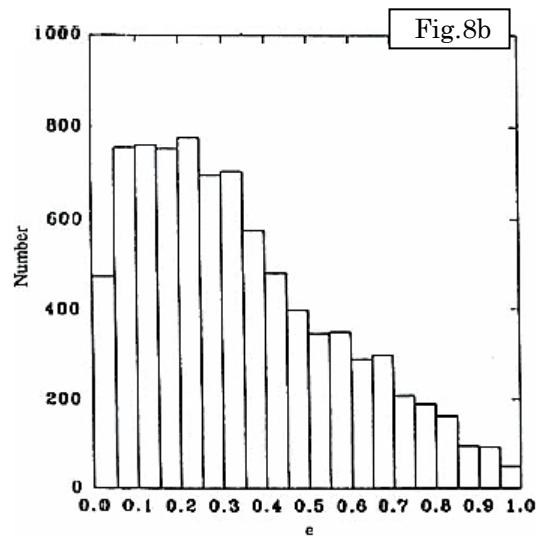
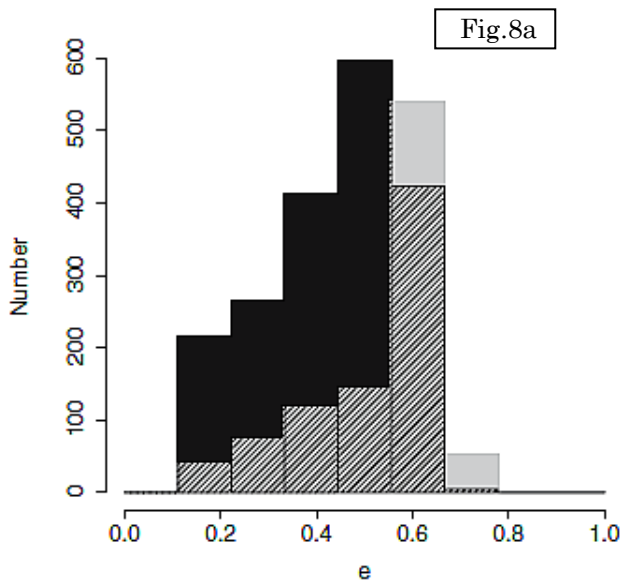
図8a シミュレーションでトロイダル付近を輻射点とする流星物質の離心率 e の分布。

黒は衝突可能性を考慮してウェイトをかけた分布。

観測データ (図8b, Jones and Brown (1993)) では円軌道に近いものが多い。

→シミュレーション結果のウェイトをかけたものは、ウェイトをかけないものと比較するとやや観測データに近い。

しかし、よく一致しているとは言えない。



結論

CMORカタログは流星群の性質に新しい情報をもたらした。ペルセウス座 ϵ 昼間流星群は96P/マックホルツ彗星と関連付けられた。4月うお座昼間流星群と5月おひつじ座南昼間流星群はみずがめ座 ι 南北流星群と関連付けることができた。小さい近日点距離と軌道長半径で軌道傾斜角の大きな多くの小流星群は、もっと大きな軌道長半径の彗星から放出された小さな流星物質がポインティング・ロバートソン効果と古在共鳴による進化によって生じたとして矛盾しないことが示された。これらの流星物質がトロイダルソースの一部となる、という印象を受けたが、これについてはさらに研究が必要である。

1. はじめに

流星群のプロファイルといえば、個々の流星の光度変化を思い浮かべることがあろうが、ここでは ZHR で表される出現推移のグラフという意味で使う。

ZHR は年毎に変化するものであり、特に明瞭な密集部をもつ流星群では、密集部の位置を推定して極大を予想することが行われている。しかし、ここでは、流星群の軌道と地球軌道の位置関係で流星出現はどのように変化するかという基本的な問題のみを扱うこととする。基本的ではあるが、位置関係の考察から推定される流星群のプロファイルは実際に観測されるものとよく一致している。従って、本考察を利用することによって、様々な「流星群」のプロファイリングを行うことが可能と考えられる。

本稿では、プロファイルの推定方法を説明し、推定と実際の観測との間に開きが見られる「しし群」を例として、推定方法の問題点、有効な点について考察する。

2. 流星群の基本構造とプロファイルの推定方法

流星群の誕生から散在流星の中に埋没するまでの過程は次のようなものと考えられている。

- (1)母天体から放出された流星体が母天体周辺に密集して分布する。
- (2)流星体が母天体の軌道に沿って、ほぼ均一に分布する。
- (3)流星体が母天体の軌道面内で、母天体の軌道自体からは離れた場所にも分布を広げる。
- (4)母天体の軌道面から離れた場所にも広がる。
- (5)流星体の分布密度が散在流星の分布の中に埋没する：流星群の消滅。

いわゆる、「トレイル理論」は上の(1)、(2)の範囲を扱うものであり、局在する流星体分布を推定し、流星出現の「予報」を試みるものである。ここで考察するのは(3)と(4)の段階、つまり、平年における流星群の活動状況を流星群と地球軌道の位置関係から考察する。従って、流星体の分布を次のように仮定する。

- (a)流星体は中心部（観測された平均軌道）と近日点方向が一致する。
——平均軌道となす角が大きくなるほど流星体密度は減少する。
- (b)流星体の軌道半長径は中心部と一致する。
——流星体の軌道の形状と中心部のものとの違いが大きくなるほど流星体密度は減少する。

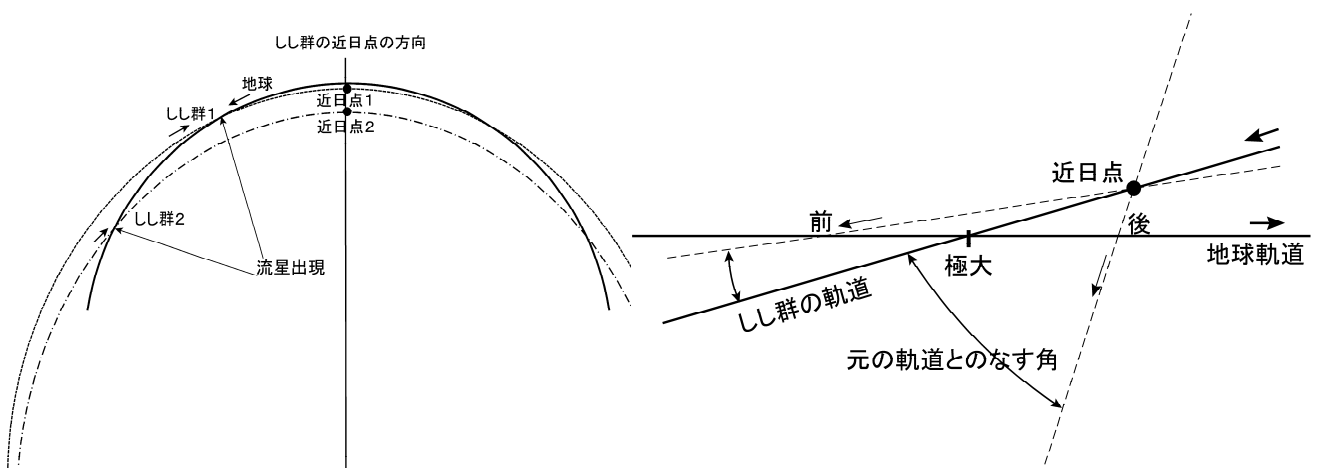
(a)と(b)を元に、平均軌道が地球軌道と交差する、すなわち、極大期から離れた場所における流星出現を次の方法で推定する。

- #1：近日点方向を固定して、平均軌道を回転させ、地球軌道と交差する軌道要素を求める。
- #2：平均軌道と#1 で求めた軌道の違いから、次式で出現数の変化を推定する。ここで、 N_0 は極大における出現数、 I は平均軌道と#1 で求めた軌道のなす角、 $e-e'$ は両者の離心率の差である。ここで $A\sim C$ は任意の数値であるが、経験的に（様々な流星群に適用した結果から） $A=10, B=30, C=1.2$ が一般的に妥当な数値である。

$$N = N_0 \exp\left\{-\left(A \sin|I| + B|e - e'|\right)^C\right\}$$

3. しし群への適用

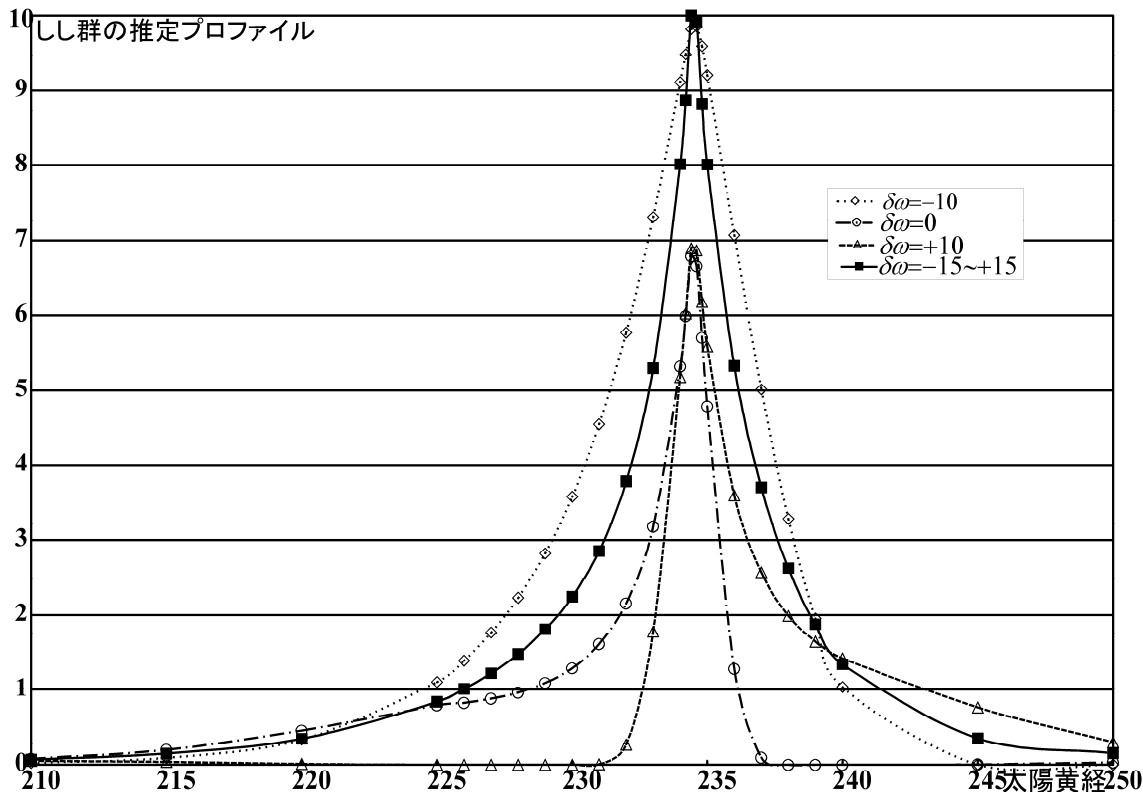
しし群について、(a)と(b)の仮定を具体的に当てはめて模式的に示す(第1図 a, b)。この2つの条件により、平均軌道から離れた場所で流星物質が地球軌道と遭遇するためには、近日点距離と軌道傾斜角が変化している



必要があることが分かる。次に示す軌道要素を2で示した式を単純に当てはめると、第2図の $\delta\omega=0$ のグラフが得られる。

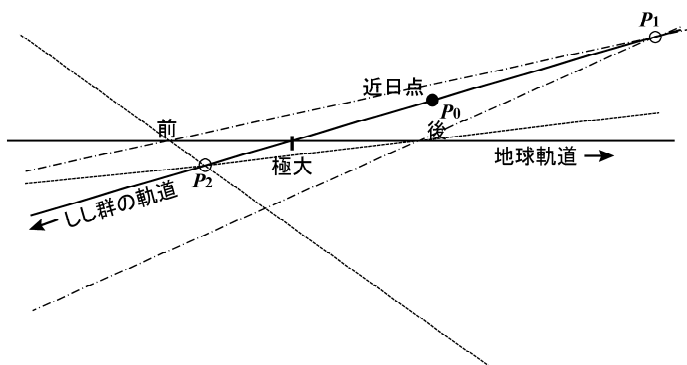
軌道要素：次の条件を満たす38個の写真流星の平均軌道

$$\begin{array}{llll}
 200 \leq \lambda_s < 265 & 260 \leq \lambda - \lambda_s < 285 & 0 \leq \beta < +20 & \\
 \lambda - \lambda_s = 271.3 & \beta = +10.2 & V_g = 70.2 & \\
 e = 0.891 & q = 0.974 & i = 162.2 & \omega = 175.3 \quad \Omega = 234.5
 \end{array}$$



極大においても流星数が10に達していないことと、極大後に出現数が急激に減少することが示される。これは、軌道要素は平均値であり、地球軌道と厳密には交差しないためである。また、急激に減少するのは、近日点の方向を固定することにより、地球軌道との交差には平均軌道から大きく傾斜した軌道を取らなければならないためである(第1図 b)。実は、しし群の軌道は些か極端な例であるのだが、流星群と地球軌道の交差条件によって、流星出現のプロファイルが決まるという意味での好例である。

ここで、平均軌道にたいして、近日点引数 ω を変化させたグラフを第2図で見てみよう。 $\delta\omega=-10$ は ω を10度減じた場合であり、 $\delta\omega=+10$ は ω を10度加えた場合である。この状況を模式的に示したものが第3図である。図中でP1は $\delta\omega=-10$ 、P2は $\delta\omega=+10$ の場合を示す。P1を近日点とすると、出現期間の両側で平均軌道との交差角変化は少ないのに対して、P2では極大前の交差角が大きくなりすぎていることが分かる。これを第2図と合わせて検討すると、流星群と地球軌道の交差条件によって、流星出現のプロファイルが決まっていることが明確になる。また、第2図には、 ω を $-15 \sim +15$ の範囲で変化させた出現数の累積変化(10に規格化してある)を $\delta\omega=-15 \sim +15$ として示した。

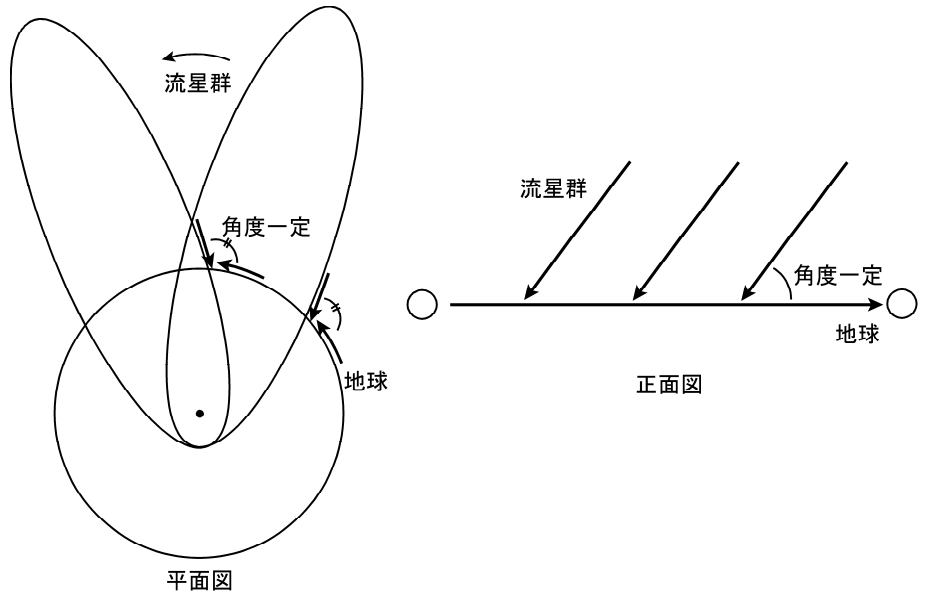


4. 検討

「近日点方向固定、軌道半長径一定」という仮定は、ほぼティスランの判定式と同じ考え方によるものであり、木星による長期間の摂動に対して妥当なものである。ここでは、触れないが、共通な起源を有すると推定されている「しぶんぎ群」と「みずがめδ群」もこの関係を満たすと見なせる。

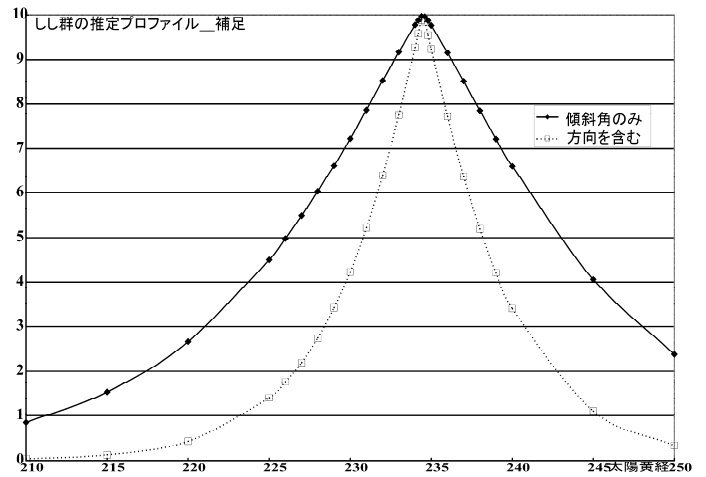
一方、流星群の輻射点移動については、「平行に飛来する流星体に対して地球が円周上を運動するために地球が1日に運動する1度分だけ輻射点は東方に移動する」と説明されることが多い。この関係を模式的に示したものが第4図である。これは、軌道面が太陽を中心に回転している。即ち、近日点も太陽を中心に回転し、

平均軌道面に対して傾斜することを意味する。これによってプロファイルを推定すると第5図になる。図中で「傾斜角のみ」は、回転させた流星群の軌道面と平均軌道のなす角だけに注目してプロファイルを推定したものである。長期間にわたって高い出現数が推定され、実際とはかなり異なったものになっている。「方向を含む」としたものは、軌道面どうしのなす角だけでなく、近日点方向の違いを3の場合と同様に含めたものである。条件が厳しくなる分だけ、この場合には推定される出現数が減少する。しかし、この場合にも実際よりはかなり流星数が多いと思われる。



これに対して、輻射点の東方移動で用いられる軌道モデルは移動の原理を説明するために簡略化されたもので、力学的な根拠はない。近日点方向を黄道の極を中心に回転させる力というのは想定し難い。従って、第5図の推定プロファイルが実際のものから外れることは当然と考えられる。

一方、第2図で $\delta\omega=0$ のグラフも実際のプロファイルからかなり外れている。先にも触れているが、もう少し詳しくこの原因について検討してみよう。第1図bに示されるように、しし群の近日点は地球軌道に極めて近く、地球軌道との交差点にも近い。このため、厳密に「近日点方向固定、軌道半長径一定」という仮定を当てはめると、極大後に地球軌道と交差しうる流星は元の軌道面との傾斜角があり得ないほどに大きくなければならなくなる。流星体の放出が平均軌道面内で行われて、近日点方向がわずかに変化する $\delta\omega=-15\sim+15$ だけで、十分にそのような問題が回避されることが第2図によって示される。 $\delta\omega=-15\sim+15$ の平均値として示したプロファイルは観測と十分に対応するものと考えられる。



しし群の軌道と地球軌道との遭遇条件はかなり特殊であり、このような場合を除けば、 $\delta\omega=0$ のグラフだけで多くの流星群のプロファイルを示すことができる。

ここまで無条件に流星のプロファイルという表現を用いてきたが、流星群の出現状況はZHR、即ち、眼視観測による流星出現数の消長で表すことが一般的であり、それに従っている。流星観測方法は写真、電波、そしてII、CCDと大きく進歩してきた。しかし、流星群の出現状況を表す最も一般的な方法が眼視観測であることは間違いない。

5. まとめ

(1) 流星群内部の流星体分布に簡単な仮定を設定することにより、流星群のプロファイルを推定できる。

近日点方向を軌道面内で回転させてプロファイルを求めた方が良いのは、しし群のように近日点方向と軌道交点が地球軌道極めて接近している場合のみである。一般的には、「近日点方向固定、軌道半長径一定」という仮定だけで流星群のプロファイルを推定できる。エクセルの基本操作ができれば、「悪天候の日の天文趣味」に十分なりうる。

(2) 流星群のプロファイル(ZHR)を求める、基本的な方法は眼視観測である。