

2001 年しし座流星群の 4 公転トレイルと 9 公転トレイルの推定 ZHR

内山茂男

要旨

2001 年のしし座流星群は、4 公転トレイルと 9 公転トレイルに地球が突入することにより、11 月 18/19 日に東アジア上空で大出現すると予測されていた。そして、日本でも ZHR3000 を越える大出現が観測されたが、4 公転トレイルと 9 公転トレイルへの接近時刻が近いこと、ZHR 曲線からではこの 2 つのトレイルの活動を分離することが非常に困難である。しかし、眼視観測の光度データから、4 公転トレイルと 9 公転トレイルの光度比を推定し、その違いを利用してそれぞれの ZHR を推定することができた。

はじめに

しし座流星群の大出現が 2001 年 11 月 18/19 日に見られるという予測が、数名の研究者によって発表された[1,2,3]。彼等によると、母天体である 55P/テンペル・タットル彗星が 1766 年の近日点通過時に放出したダストによるダストトレイル（7 公転トレイル）と 1699 年放出のダストトレイル（9 公転トレイル）、1866 年放出のダストトレイル（4 公転トレイル）に地球が突入し、これらによって大出現が生じ、7 公転トレイルによる出現はアメリカ方面で、9 公転トレイルと 4 公転トレイルによる出現は東アジア方面で見られるという。そして、実際に彼等の予測に近い大出現が観測された。ただし、この 9 公転トレイルと 4 公転トレイルは接近しており、これらによるピーク時刻は McNaught - Asher によると 49 分差[1]、Lyytinen 等によると 17 分差しかない[2]。実際に観測された ZHR 曲線も 2 つのトレイルの活動が重なった大きな 1 つの山になっていて、ZHR 曲線から 2 つのトレイルの活動を分離することはできない。しかし、この 2 つのトレイルの活動を分離することは、トレイルの進化の研究や 2002 年以後のしし群出現予測の研究に重要である。

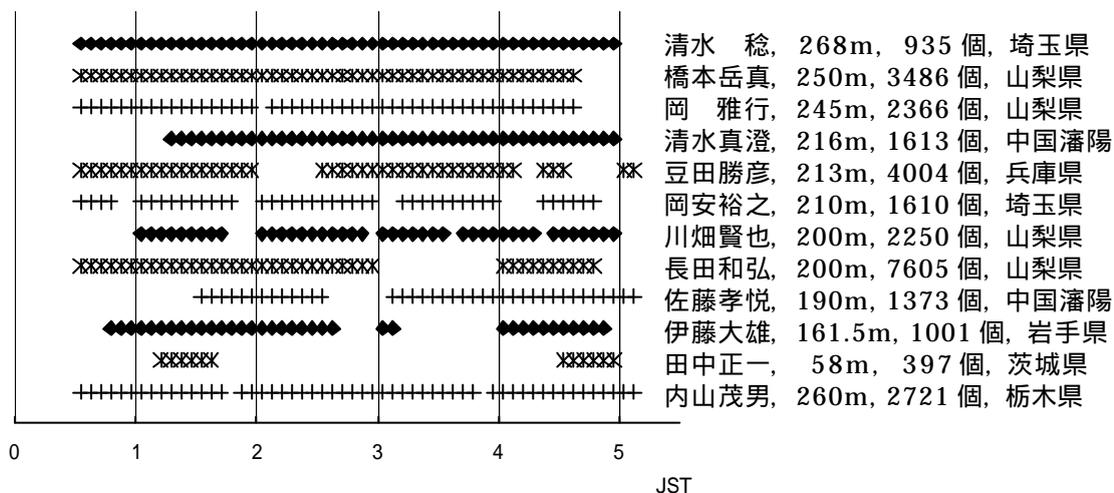
なんとか 4 公転トレイルと 9 公転トレイルを分離するには、これらの性質の違いを利用する必要がある。Asher は、4 公転トレイルの流星と 9 公転トレイルの流星で輻射点が 0.1 度程度異なることを計算により予測した[1]。しかし、この違いを検出し ZHR を推定するのは非常に困難である。そこで、注目したのが「光度比」の違いである。小さいダストよりも大きいダストの方が母天体からの放出速度が小さいことが期待される。また、大きいダストの方が太陽光圧の影響も少ない。これらのために、大きいダストの方が母天体からゆっくりと離れていく可能性が高い。2001 年に地球に遭遇するダストは 3 年 9 ヶ月ほど母彗星から遅れたものなので、4 公転トレイルでは 1 公転あたり 11 ヶ月遅れるダストであるのに対し、9 公転トレイルでは 1 公転あたり 5 ヶ月しか遅れないダストである。このため、今回見られる流星のダストでは、9 公転トレイルの方が大きいものが多い、すなわち光度比が小さい可能性が高いのである。

4 公転トレイルと 9 公転トレイルの光度比がわかっているならば、それらがどのような割合で混ざれば観測された光度比になるのかが求められる。したがって、それぞれの ZHR を求めることができる。ただし、4 公転トレイルと 9 公転トレイルの流星は混ざって出現するので、それぞれの光度比を求めることは簡単ではない。しかし、ピーク時刻は全く同じではなく、9 公転トレイルのほうがやや早い。また、古い 9 公転トレイルの方が拡散していて継続時間が長くなるかもしれない。このため、それぞれのトレイルの光度比をある程度は推定することができる。

観測データ

NMS 同報で光度データ提供のお願いをして、12名の観測者から5分毎の報告をいただいた。今回解析に用いたデータの観測者と観測時間は図1の通りである。ただし、今回の解析で用いたのは0時30分～5時10分(JST)で、かつ輻射点高度が15度以上のデータだけである。それ以外の時刻の観測報告もいただいているが、観測者が少なく個人差の影響が強くなってしまふなどの理由で、結果的に用いなかった。解析に用いた観測の合計は、観測時間2469.5分、しし群流星数29361個である。観測時刻の地心補正(topocentric correction [4])については、日本国内の観測では1分を越えず、中国瀋陽でも2分は越えないので、補正をしなかった。

図1. 各観測者の観測時刻・観測者名・観測時間・しし群流星数・観測地(解析に用いた分)



等級別 ZHR : ZHR_m

多くの観測者が、流星数が多かった3~4時よりも、その前の0~2時の方が明るい流星が目立ったと感じたようだ。そこで、5分毎のZHR_m(等級別ZHR)を計算してみた(計算方法は付録に)。

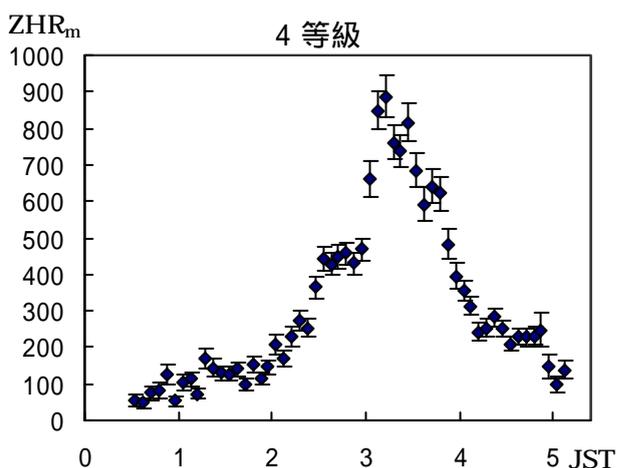
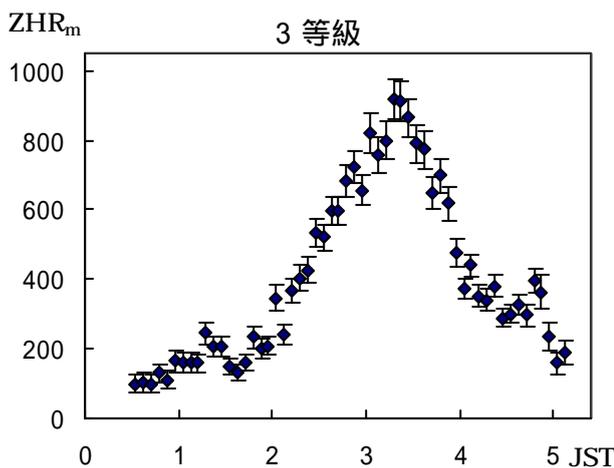
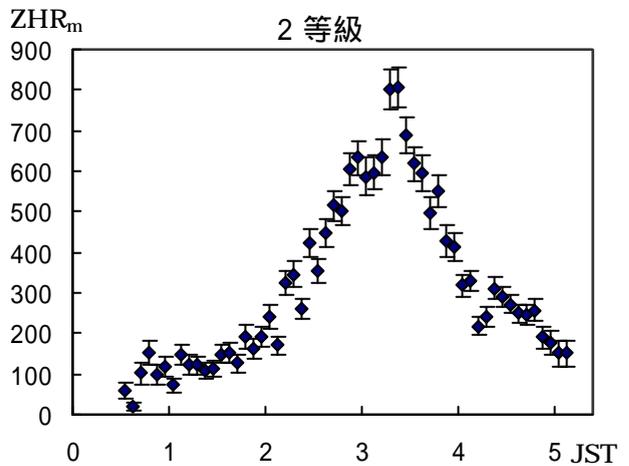
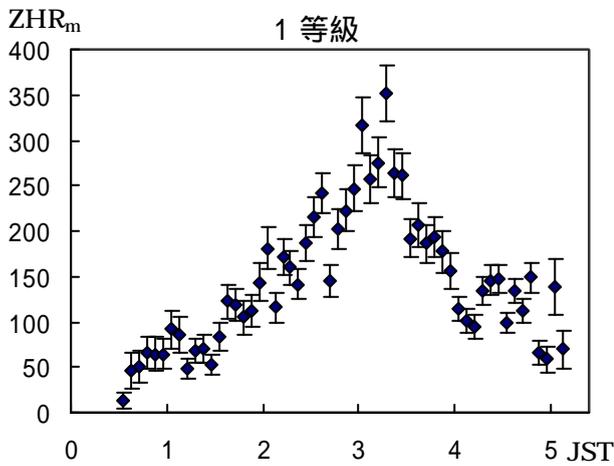
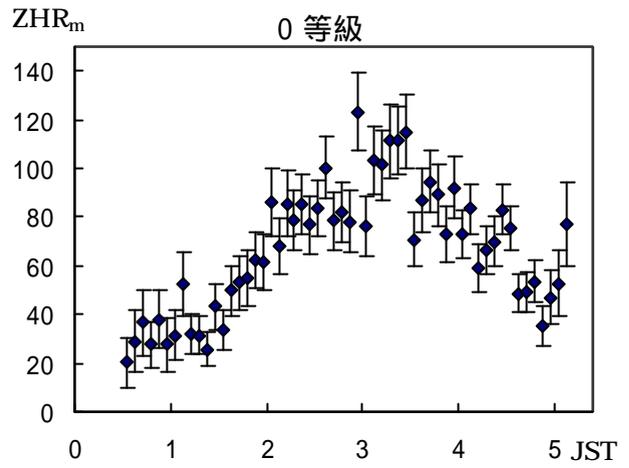
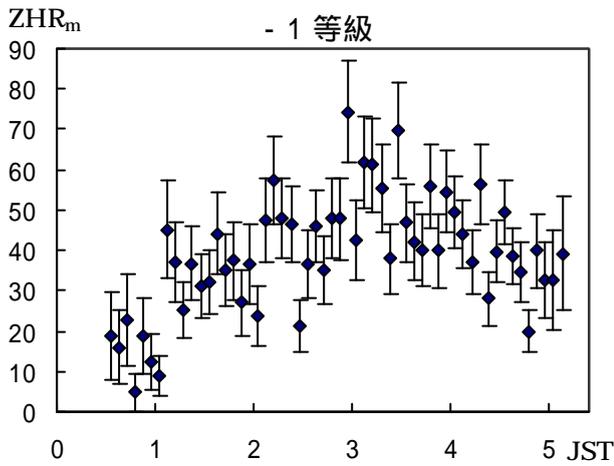
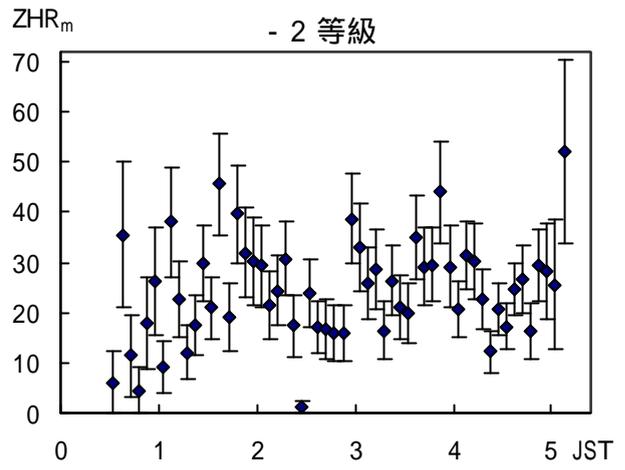
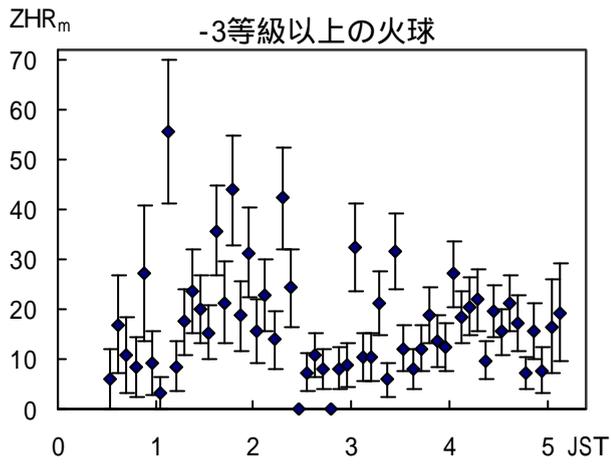
計算結果を図2に示す。これを見ると次のようなことが言える。

- (1) ほとんどの光度で、3時15~20分頃をピークとする出現数の変化がきれいに見られる。
 - (2) 2等級や3等級以上の明るい流星では、ピークは見られず、出現数はほとんど一定である。
(1等級や0等級ではピークが見られるが、1~4等級の流星よりも増減率が少なくなる。)
- 2等級以上の流星となる大きい流星物質は、9公転トレイルにも4公転トレイルにもほとんど含まれていないと考えられる。
- (3) 2等級以上の明るい流星のZHR_mの合計は40程度と、近年のバックグラウンドにしては非常に多い。

予測されていなかった大きいダストの供給源があったはずである。

2001年のしし群は大出現が予測され、多くの観測者が注目する中で起きた。そして、このとき多くの火球が出現し、永続痕も多数観測された。しかし、この多数の火球は予測されたトレイルによる大出現と偶然重なった可能性が高いのだ。あのような大出現にならなくても、2等以上の明るい流星が1時間に40個も出現したら、多くの観測者は感激するであろう。その火球群の出現が予測された大出現時刻に重なったことはたいへん幸運であった。もしも、火球群が1日早く出現していれば、これを観測できた人はかなり少なくなったであろう。

図 2. ZHR_m (光度別ZHR)

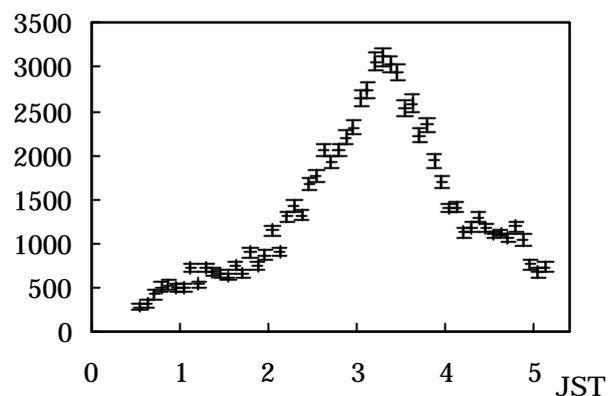


さて、それではこの火球の供給源は何であろうか？ これについては、確かなことはわからないが、可能性として考えられるのは、古い拡散したトレイルか、共鳴領域であろう。今回は 10 公転トレイルと 11 公転トレイルにも接近しているが [1,2,3]、これらは 9 公転トレイルよりも明るいものの割合が高く、拡散している可能性が高いので、これらの火球の供給源かもしれない。また、しし群の母天体であるテンペル・タットル彗星は、その公転周期が木星と 14 : 5 の共鳴関係にあるという。ということは、この軌道に 14 ヶ所の共鳴領域ができるということである。母天体を含む共鳴領域は、多くの大きいダストを含んでいて、1998 年の火球の多数出現はこの共鳴領域のためだろうとされている。それ以外の共鳴領域にはダストはあまり多く含まれていないだろうと思われるが、母天体の隣の共鳴領域はある程度のダストの集中があるかもしれない。これが 2001 年に接近した可能性もある。

観測された ZHR と予測

ZHR_m の各光度の値を足し合わせることで、ZHR を求められる。こうして、今回の解析データから求めた ZHR を図 3 に示す。求められた極大時刻は 3 時 17 分 ± 3 分、そのときの ZHR は 3120 ± 100 である。この ZHR の値は、NMS 速報データ [5] から求めた値よりやや小さくなっている。しかし、NMS 同報を通じて報告されたデータを見ると、流星の光度を記録せずに数だけを数えた観測者より、光度も記録した観測者の観測流星数の方がやや少ないという傾向が見られた。今回のように流星が非常に多く出現したときにはありそうなことである。これが、ここで求めた ZHR の値がやや小さい理由ではないかと考えている。

図3. ZHR



さて、今回、日本で観測可能であった時刻の主な予測を表 1 にまとめた。

表 1. 2001 年しし座流星群出現予測 (時刻は JST)

Trail	McNaught-Asher [1]	Lyytinen [2]	Jenniskens [3]
4-rev	3h13m (ZHR8000)	3h20m (ZHR5000)	2h55m (ZHR2700)
9-rev	2h24m (ZHR2000)	3h03m (ZHR2600)	2h08m (ZHR1800)
10-rev	3h43m (ZHR 40)	4h10m (ZHR 150)	2h01m (ZHR 170)
11-rev	2h36m (ZHR 40)	4h10m (ZHR 150)	2h21m (ZHR 510)

3 名とも最も多くの流星を出現させるのは 4 公転トレイルであると予測している。そして、観測された極大時刻は、McNaught-Asher や Lyytinen の予測に非常に近い。9 公転トレイルによるピークは観測された ZHR 曲線からではよくわからない。しかし、極大後の減少に比べると、極大前の増加はやや緩やかである。これは、9 公転トレイルの影響かもしれない。10・11 公転トレイルは出現数が少ないと思われるので、これらの影響はわからない。

流星の供給源

今回、日本で見られたしし座流星群大出現時には、次の 5 種類の供給源からの流星が混ざって出現したと考えられる。

- (1) 4公転トレイルからの流星
- (2) 9公転トレイルからの流星
- (3) 10・11公転トレイルからの流星
- (4) 毎年見られるバックグラウンドの流星
- (5) 大きいダストの供給源による明るい流星

今回の大出現の中心的役割をした4公転トレイルと9公転トレイルによる出現数の様子を見るには、関係ないものを取り除かなければならない。通常の極大は大出現の前夜であったが、このときのZHRは73である[5]。それに対して、今回の解析を行った時間内ではほとんどZHR500以上であったのでバックグラウンドの影響は無視してもよいであろう。しかし、大きいダストの供給源による明るい流星の影響は無視できないので、この影響を減らさなければならない。

(10・11公転トレイルは光度比が9公転トレイルに近いと考えられるので、これを9公転トレイルと分離するのは非常に困難である。結果的に9～11公転トレイルをまとめて求めることになる。)

0～4等の光度比

光度比を調べるために、 ZHR_m ではなく、真の等級別ZHRである $ZHR_{t,m}$ を求めて等級との関係を示したのが、図4である。これを見ると、0～4等の流星数の直線性が特によく、明るい流星数は回帰直線の値よりやや多くなっている。やはり、大きいダストの供給源があると考えられると理解できる。

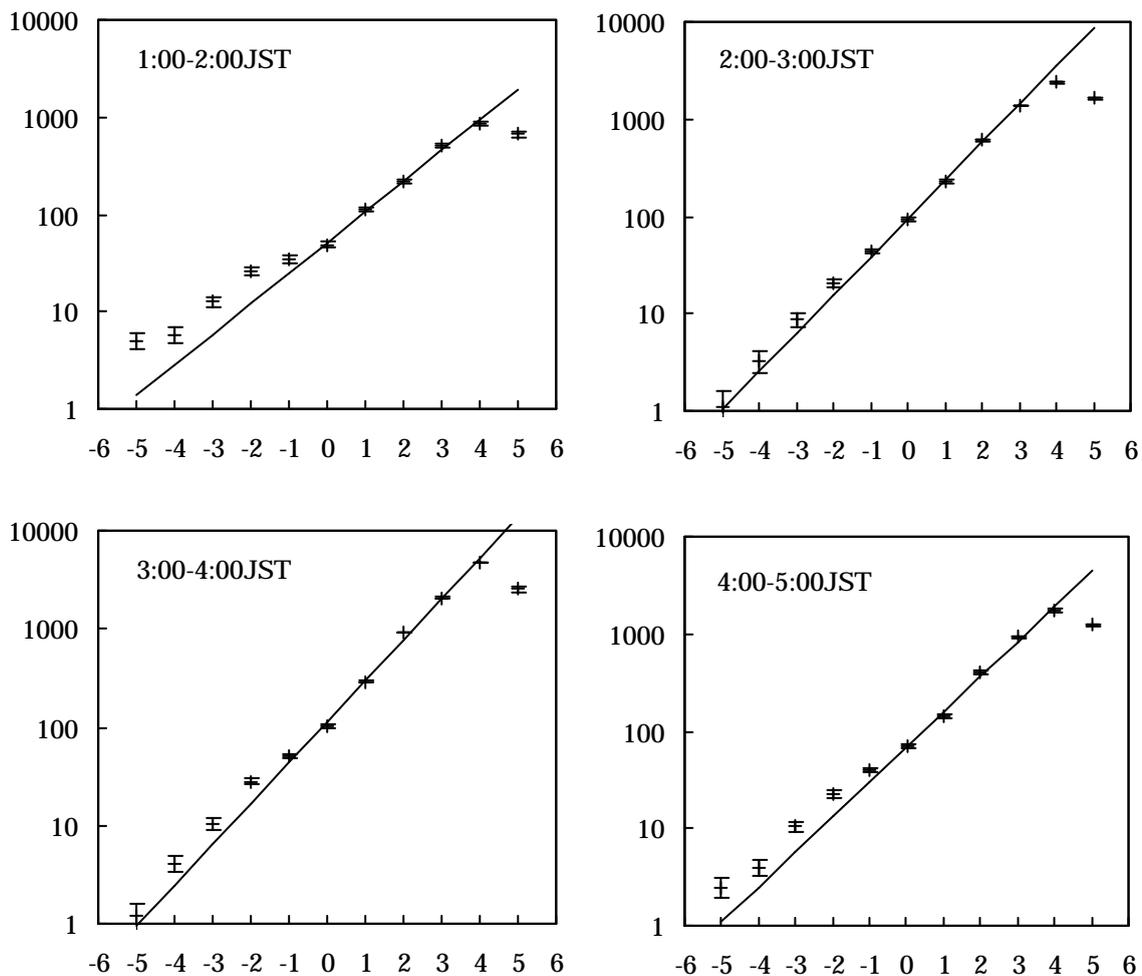


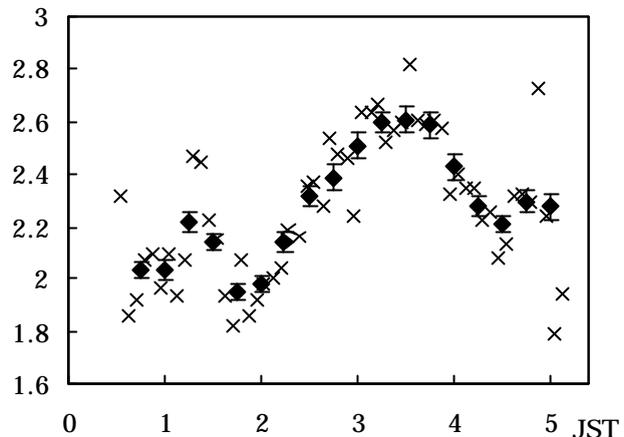
図4. 流星の等級と真の流星数 $ZHR_{t,m}$

そこで、明るい流星の影響を減らすために、0~4等の流星だけに注目し、光度比を求めてみた。0~4等の光度比は、回帰直線をひくことによって求めた。その結果は図5の通りである。図中の×は5分間毎に求めた値、●は30分間の値を15分毎に求めたものである。これを見ると次のことが言える。

- (1) 出現数の増加とともに、光度比が上昇している。(暗い流星が増加している)
- (2) 3時17分頃のZHR極大の前後で比べると、極大後の方が光度比が大きい。

4公転トレイルの方が9公転トレイルよりも光度比が大きい。

図 5. 0~4等の光度比



4 公転トレイルと 9 公転トレイルの光度比の推定

求められたZHR曲線(図3)を見ると、0時30分から2時の間でもZHRはすでに数百に達していて、しかも着実に増加している。ということは、この間も9公転トレイルによる流星が相当数出現していたと考えられる。しかし、この間の0~4等の光度比はばらつきはあるものの、だいたい2.0で一定といえる(図5)。したがって、この間に4公転トレイルの流星があまり出現していなければ、9公転トレイルの光度比は2.0程度であろう。もし、この間に光度比が大きい4公転トレイルの流星も相当数出現して光度比が2.0なら9公転トレイルの光度比は2.0より小さいということになる。しかし、あまり小さい光度比は、2等以上の明るい流星が増加しないということと矛盾する。

9公転トレイルの光度比は2.0程度 (1.8程度の可能性も否定できない)

さて、0~4等の光度比のピーク値は 2.61 ± 0.05 (3h15m ~ 3h45m) である。これは、光度比が小さい9公転トレイルの流星も含んだ値であるから、4公転トレイルの光度比は2.61より大きいはずである。4公転トレイルの光度比は2.8以上

4 公転トレイルと 9 公転トレイルの推定 ZHR

4公転トレイルと9公転トレイルそれぞれの光度比の値がわかっていれば、ZHRを推定することができる(計算方法は付録に記してある)。

各トレイルの光度比はだいたいの値は推定できたが、確定することはできていない。そこで、9公転トレイルの光度比 r_9 は1.8と2.0、4公転トレイルの光度比 r_4 は2.8、3.0、3.2の場合について求めた。結果を図6に示す。これを見ると、4公転トレイルの光度比 r_4 が2.8のケースでは、9公転トレイルのZHR曲線の3~4時にくぼみができている。これは不自然なことだと思うので、4公転トレイルの光度比は3.0以上が適当だといえそうである。 r_9 が1.8と2.0、 r_4 が3.0と3.2と仮定したケースでは、それに応じてある程度の違いがあるが、大きな変化ではない。したがって、光度比の推定が少々ずれていても、4公転トレイルと9公転トレイルの推定ZHRは今回求めた値と大きくずれることはないと思われる。

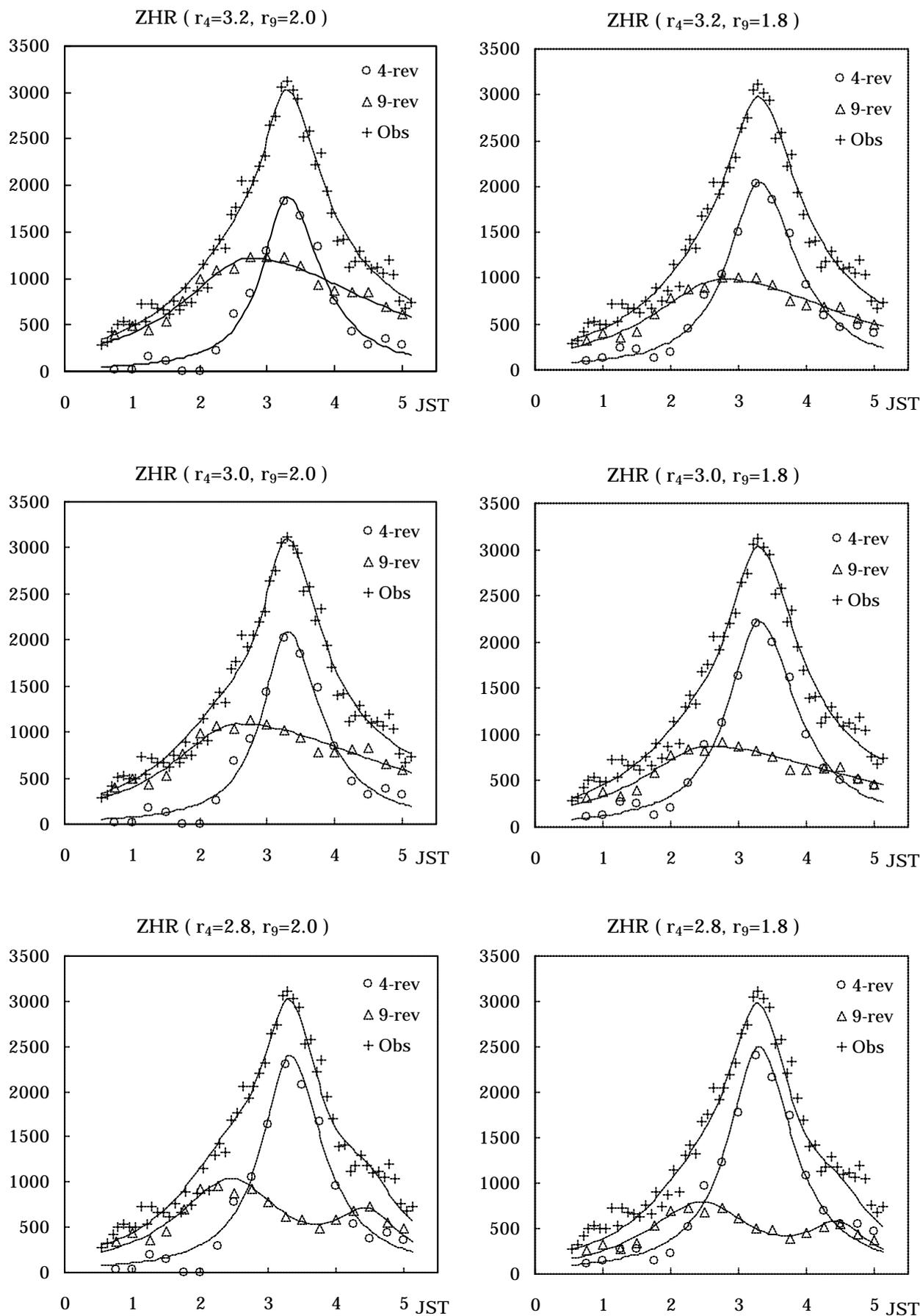


図6 . 4公転トレイルと9公転トレイルの推定ZHR

光度比が確定できないので、4公転トレイルの光度比 r_4 が3.2、3.0、2.8、9公転トレイルの光度比 r_9 が2.0、1.8のケースを示したが、 $r_4=3.0$ 、 $r_9=2.0$ のケースが最も良いだろうと考えている。

得られた結果を見ると、次のようなことが言える。

- (1) 4公転トレイルはシャープな増減をしている。
- (2) 9公転トレイルによる出現は高原状のピークで、2時30分～3時に極大となっている。
- (3) 4公転トレイルの極大ZHRは2000程度、9公転トレイルの極大ZHRは1000程度

McNaught - Asher は、初期の予測では「公転回数が増えてもトレイルの太さはほとんど変化しない(長くなるだけ)」としていた[6]。それに対し、Lyytinen 等は「公転回数が増えるとトレイルも太くなる」として予測をしていた[2]。2001年の出現の前にMcNaught - Asherも「公転回数とともにトレイルは太くなる」と変更したが[1]、今回得られた結果から見てもやはり「公転回数とともにトレイルが拡散し太くなる」という考えが支持できるといえる。

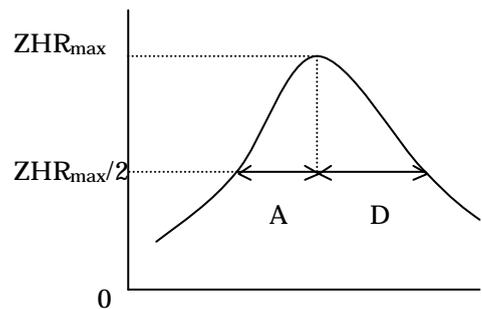
今回、「ずっとたくさん出ていた様に感じた」という声をずいぶん聞いたが、この長時間の出現は9公転トレイルの影響が大きかったようだ。

さて、Jenniskens は、1999年に飛行機で観測した結果から、大出現時のZHR曲線はLorentz Profileによく合うことを見つけた[7]。これは、次の式で示されるものである。

$$ZHR = ZHR_{max} \cdot W_h^2 / ((T - T_{max})^2 + W_h^2)$$

ここで、 ZHR_{max} は極大時のZHR、 T_{max} は極大時刻、 T は時刻、 W_h は半値半幅である。

Lorentz profileは左右対称であり、右図のAとDが等しい。このAやDの値が W_h である。しかし、今回求めた9公転トレイルのZHR曲線は、全く左右対称ではない。したがって、極大前には右図のAを、極大後には右図のDをこの W_h に代入した。こうして、推定された各トレイルのZHR曲線に最もよく合うLorentz profileを最小二乗法により求め、これも図6に描いてある。ただし、 $r_4=2.8$ のケースでは、9公転トレイルでは3～4時にくぼみがあるので、よくフィットするLorentz profileは存在しない。図6に描いたのは、推定値に近くなるように探した適当な曲線である。



A : Ascending branch
 D : Descending branch
 A+D : FWHM

よく一致するLorentz profileを探して見つけると、結果的に最大ZHR (ZHR_{max})、極大時刻 T_{max} 、Ascending branch、Descending branch を求めたことになる。こうして得られた値を、主な予測とともに、表2に示す。

この表2の値は、少し注意してみる必要がある。私の推定した9公転トレイルのZHR曲線は高原状ピークを示している。また、私の推定では、10公転・11公転トレイルが分離できず、結果的に9公転トレイルの推定値に含まれていると思われる。このため、極大時刻は±15分程度の精度しかないかもしれない。また、FWHMとDescending branchにはこの10・11公転トレイルが大きく影響している可能性が高い。そのあたりを考慮して、主な予測と比べると、次のようなことが言えそうである。

	極大時刻	極大ZHR	FWHM
McNaught - Asher	よくあっている	2～4倍多い	(予測なし)
Lyytinen et al.	よくあっている	2倍あまり多い	十分近い
Jenniskens	すこしずれている	やや多いが近い	やや短い

トータルで見るとLyytinen等の予測が最も近かったといえそうである。ただし、ZHRの値は予測が難しく、まだ2倍以上の開きが出てしまっている。

表 2. 推定された 4 公転トレイルと 9 公転トレイルの各種値と主な予測

	トレイル	仮定 光度比	極大時刻 JST	ZHR _{max}	FWHM	Asc. branch	Desc. branch
今回の 推定値	4-rev	$r_4 = 3.2$	3h18m	1880	62m	27m	35m
	9-rev	$r_9 = 2.0$	2h45m	1220	212m	75m	137m
	4-rev	$r_4 = 3.2$	3h18m	2050	73m	33m	40m
	9-rev	$r_9 = 1.8$	2h46m	990	216m	78m	138m
	4-rev	$r_4 = 3.0$	3h18m	2090	62m	27m	35m
	9-rev	$r_9 = 2.0$	2h33m	1090	231m	71m	160m
	4-rev	$r_4 = 3.0$	3h18m	2230	73m	33m	40m
	9-rev	$r_9 = 1.8$	2h33m	870	236m	73m	163m
McNaught and Asher [1]	4-rev		3h13m	8000			
	9-rev		2h24m	2000			
	10-rev		3h43m	40			
	11-rev		2h36m	40			
Lyytinen et al. [2]	4-rev		3h20m	5000	86m	58m	65m
	9-rev		3h03m	2600	123m		
	10-rev		4h10m	150	280m 以上		
	11-rev		4h10m	150	180m 以上		
Jenniskens [3]	4-rev		2h55m	2700	49m		
	9-rev		2h08m	1800	74m		
	10-rev		2h01m	170	123m		
	11-rev		2h21m	510	76m		

光度比に関する議論

4 公転トレイルの光度比は 3.0~3.2 程度、9 公転トレイルの光度比は 1.8~2.0 程度と推定した。4 公転トレイルの光度比がさらに大きくても、9 公転トレイルの光度比がさらに小さくても、それぞれの推定 ZHR 曲線は不自然にならない。しかし、4 公転トレイルと 9 公転トレイルでそれほど光度比が違うのであろうか。IMO がまとめた主要流星群の極大時の光度比は 2.2 程度のものが多い。したがって、9 公転トレイルの光度比が 2.0 ならそれほど不自然ではないかもしれない。しかし、4 公転トレイルの光度比が 3.0 としても、これは散在流星並で、非常に大きい値（暗い流星が多い）である。きちんとした理論的根拠があるわけではないが、光度比が 2.0 と 3.0 というだけでもちょっと差が大きすぎるな、という印象を持っている。ましてや、2 つのトレイルの光度比にそれ以上の差があるというのはあまり適切ではないと考えている。したがって、私は光度比の差が少なくて、計算結果が不自然ではない「4 公転トレイルの光度比は 3.0、9 公転トレイルの光度比は 2.0」が最も良い推定ではないかと考えている。

さて、観測結果がどこまで正しいのかについても疑問が残る。まず、流星の各等級の認識率として [8] の値を使用した。これが、今回のしし座流星群では少しずれる可能性がある。しし群の流星はとても速い。また、長時間観測を続けた観測者には、疲労による流星数の減少も見られた。このため、しし群の大出現時には暗い流星の認識率がやや低かった可能性がある。事実、図 4 を見ても、4 等の流星数は回帰直線よりもわずかに下にある。これは、見落としが増加していることを示しているのかも

しれない（暗い流星が本当にこのあたりから頭打ちになっているのかもしれないが）では、4等の流星の認識率が低かったとしたらどうなるか。これは、最微星がやや明るくなるのと似た効果があるだろうと考えて、出現数に応じて最微星を変化させる補正を試してみた。その結果、各トレイルのZHRの形はあまり変化しなかった。ただし、4公転トレイルの適切な光度比が3.5程度とさらに大きくなった。光度比が3.0というだけでも、主要流星群としては大きな値である。さらにこれよりも大きな値というのは、ちょっと信じがたい。とにかく、4公転トレイルの光度比が3.0より小さい可能性は低いということはいえそうである。

では、9公転トレイルの場合はどうであろうか。今回は、各トレイルの推定ZHRを求める過程で、それぞれのトレイルの ZHR_m （等級別ZHR）も求めている。 $r_4=3.0$ 、 $r_9=2.0$ の場合の計算結果を図7に示す。

図7を全体的に見ると、4公転トレイルと9公転トレイルの貢献度では、3~4等級の暗めの流星は主として4公転トレイルの流星であるが、明るい流星では9公転トレイルの方が多いいえそうである。もし、9公転トレイルがなければ、流星数の減少以上にさびしく感じたかもしれない。

さて、図7で観測値(Obs)の近くの点線は、4公転トレイルと9公転トレイルのLorentz profileの値の和（以下「推定値の和」）を示したものである。2等級では推定値の和と観測値に明らかな差があり、観測値のほうが多い。これは、痕のためではないかと考えている。今回観測していて、2等級のしし群にも多くの痕が残っていることに驚いた。私自身の観測でも、0時から1時45分までは痕の記録もつけていたのだが、この間の2等級の有痕率は60%をわずかに越えている。痕が残った方が認識率は[8]の値よりも高くなるであろう。

4等級、3等級と1等級では、推定値の和と観測値は十分近いといえる。しかし、0等級では、観測値が推定値の和よりも若干少なくなる。1等級では、推定値の和と観測値は近くなるが、その形はやや違い、観測値の方が増減の変化がなだらかになるように見える。そして、2等では推定値の和のピーク値は観測値に近いものの、全体的には近いとは言えない。これらをどのように考えたら良いのであろうか。可能性の1つとして、統計的誤差が実はもっと大きいというものがある。今回、エラーバーは「 $ZHR_m \div \text{観測流星数の平方根}$ 」で求めている。しかしこれは、すべて独立事象の場合の統計的誤差である。ところが今回報告していただいた12名のうち4名は山梨県の清里で観測しており、さらに4名が北関東である。この8名が同じ流星を観測している可能性があり、独立事象とは言えない。ただし、各観測者の5分毎のデータを詳細に見ると、不思議に2等以上の流星数の増減傾向が違っていた。これは、清里で観測していた4名についても言えることである。したがって、ある程度は独立した事象になっていたのかもしれない（眼視観測の不確かさの表れか？）。

私は推定値の和と観測値が明るい流星でやはずれる理由は「大きいダストの供給源の影響」であろうと考えている。この大きいダストの供給源は、共鳴領域かもしれないし、10・11公転トレイルかもしれない。どちらなのか私には現段階で調べる手段がないが、4公転トレイルや9公転トレイル以外にある程度長時間続く明るい流星の供給源があったと考えている。これらの影響を少なくするために0~4等の流星の光度比を解析に利用したが、それでもある程度影響は残っていたかもしれない。9公転トレイルの光度比を2.0と推定したが、もしかしたらもう少し大きいのかもかもしれない。すると、9公転トレイルに含まれる明るい流星の比率が減少する。しかし、明るい流星の供給源からの流星が加わるので、結果的に推定値の和に近い流星が観測されているのかもしれない。明るい流星の供給源からの流星は長時間継続して出現していたと推定しているので、1等や2等以上の明るい流星で増減が少なくなるのが説明できそうである。

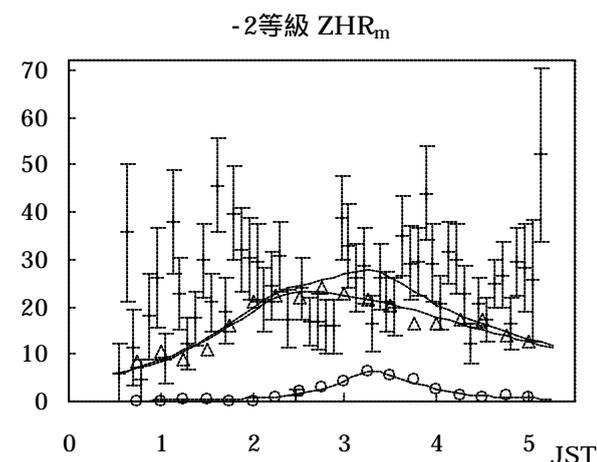
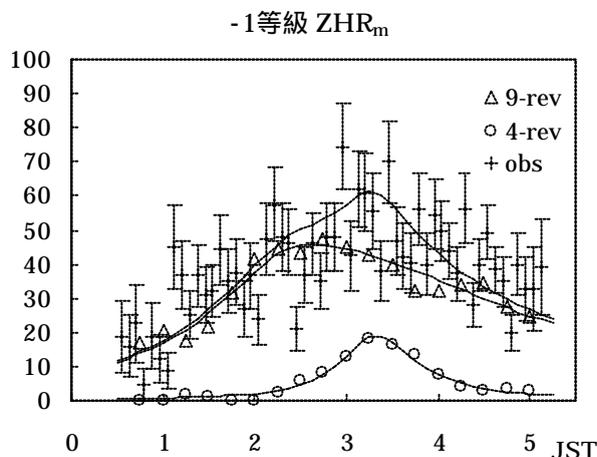
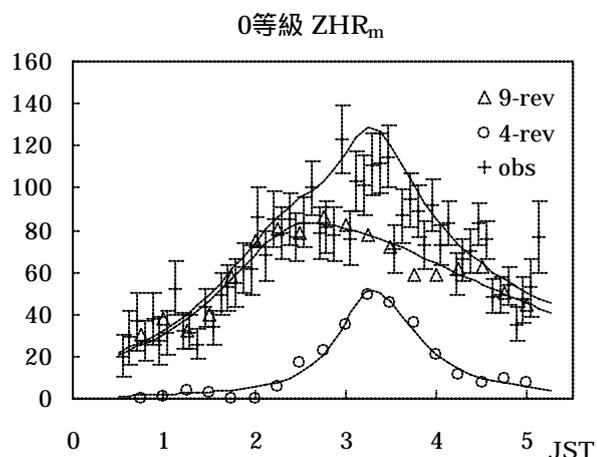
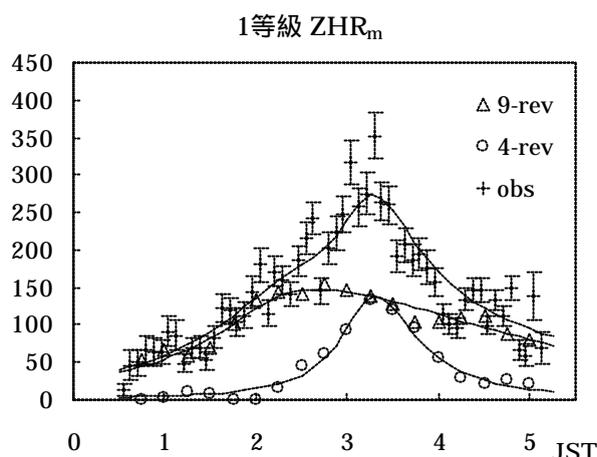
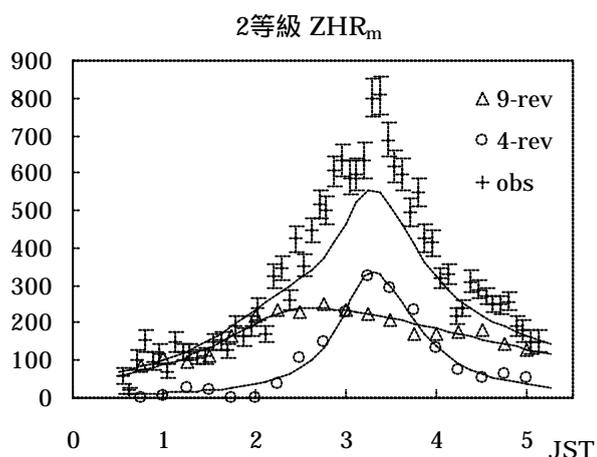
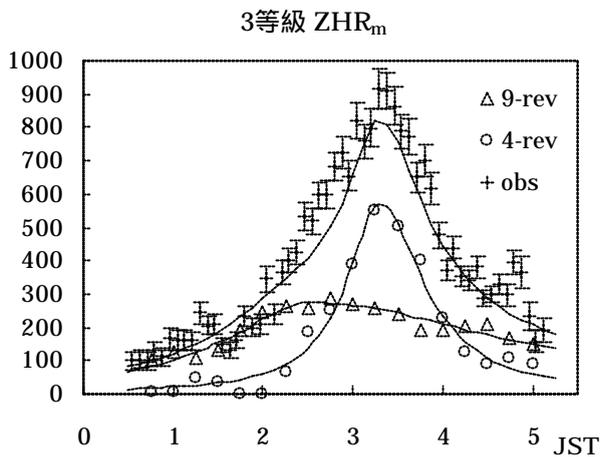
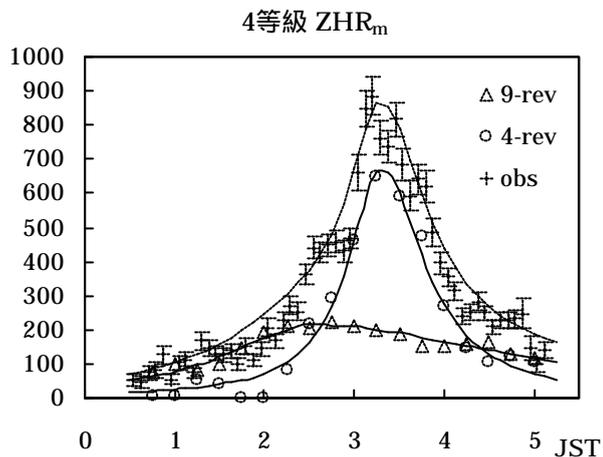


図7. 推定した4公転トレイルと9公転トレイルの等級別ZHR (ZHR_m)

4公転トレイルの光度比は3.0、9公転トレイルの光度比は2.0と仮定して求めた値。
 点線は各トレイルのLorentz profileの値を加えた値である。

さて、ここまで読んで、10・11公転トレイルや共鳴領域(?)による流星の光度比をある程度仮定することによって、より現実に近い推定値が求められるのではないかと考えた人がいるであろう。しかし、この方法には問題点がある。全体を4公転トレイルと9公転トレイルの2つに分けるだけなら、光度比さえ決まれば解は1つだけである。しかし、3つ以上の成分に分けようとする、解は1つではなく多数存在し、推定値を自由に作る事が可能になってしまうのである。

2 時台の暗い流星

図2や図7には観測されたZHR_mが示されているが、2時台の様子に注目してみよう。1~3等級は実に美しいラインにのって、出現数が増加している。ところが4等級の出現はきれいなラインに乗っていない。2時30分頃に急上昇し、その後ほとんど一定な出現を保つ。そして、3時台に入ると急上昇するのである。これが、3等級には全く見られず4等級にだけ見られるということは、眼視観測の等級判定精度を考えると不自然である。しかも、各観測者のデータを詳細に調べて行くと、このような出現傾向は山梨県清里で観測した4名だけに見られることがわかった。今回報告をいただいた12名のうち、2時台をほとんど継続して観測していたのが8名。しかも、観測条件が良い観測データの方が重みがかかる集計方法をしているので、この清里の4名の傾向が全体の傾向にかなり反映されているのだ。このため、当初はこの4等級の流星の不自然な観測結果は、何かの間違いだろうと考えた。しかし、いろいろ調べているうちに、そうとはいえなさそうであることがわかってきた。

まず、この4名が全く同じ場所で観測していたわけではない。したがって、誰かの声に影響されて結果が変化したということは考えられない。しかも、ベテラン観測者ばかりである。ベテラン観測者4名が独立して同じような傾向を報告しているのである。これを簡単に「何かの間違い」とは言えない。さらに、似たような観測結果がWGNにいくつか掲載された。まず、オーストラリア、サイディングスプリングの観測結果のZHRグラフ[9]が、我々の4等級のZHR_mとたいへん良く似ている。また、岡村修氏の飛行機から撮影したII+ビデオによる観測結果[10]には、2時39分頃をピークとし、その後2時50分頃まで減少する様子が示されている。これらの観測に共通するのは「暗い流星まで捕らえる観測」ということである。2時台に連続観測した8名の眼視観測報告のうち、清里の4名は最微星が暗く、4等級の流星の捕捉率も高い。岡村氏の観測の最微星は6.8等程度だという。おそらく、サイディング・スプリングも最微星は暗いであろう。また、IMOの集計結果[11]でも、全観測データから求めたZHRはほぼスムーズに上昇しているのに対し、最微星が5.8等以上だけのデータから求めたZHRはわずかに階段状になり、我々の4等級のZHR_mと少し似た形になっている。すなわち、4等級以下の暗い流星は2時30分過ぎに一つのピークが合ったと考えられるのだ。

これは、9公転トレイルの接近予測時刻に近い。となると、実は9公転トレイルは暗い流星をたくさん含んでいたのだろうか？ 私は、これは9公転トレイルによるものではないと考えている。もしこれが、9公転トレイルによるものだとすると、あまりにも増減が短時間で、そのトレイルの幅は4公転トレイルよりもずっと細いことになる。それはちょっと考えにくい(同様のことが、[10]でも指摘されている)。流星となるダストが母天体から放出されるのは、全く一定のペースというのは考えにくい。間欠的に放出量が変化するであろう。そのムラがどの程度の時間・空間で残るのかわからないが、そのようなダスト放出のムラによるものかもしれないと、個人的には推測している。ただし、これにはきちんとした理論的根拠はない。今後の研究に期待するところであろう。

2002 年の予測

2002 年にも 7 公転トレイルや 4 公転トレイルによる大出現が予測されている [1,3]。しかし、今度は 10・11 公転トレイルには接近しない。また、共鳴領域はダストトレイルと違って短いので、2002 年には地球軌道付近にはないはずである。どちらが 2001 年の火球の供給源であったとしても、2002 年の大出現時には火球はあまり出現しないだろうと予測される。また、2001 年の観測結果から、4 公転トレイルの光度比は 3.0 程度とたいへん大きい値が得られている。2002 年はさらに母天体から遅れたダストが地球に飛びこんでくるのだから、明るいものが増えることは考えにくい。したがって、アメリカで好条件だといわれている 4 公転トレイルによる大出現では、明るい流星が少なく、暗い流星が豊富に出現すると推定している。しかも空には満月が輝いている。ヨーロッパ方面で見られる 7 公転トレイルによる大出現の方がやや明るい流星が多めになるであろう。

謝辞

今回、しし座流星群大出現を観測後、NMS 同報を通じて光度データの提供を呼びかけたところ、多くの方が速やかに詳細なデータを提供してくれました。NMS の幹事でもない私の呼びかけに応じたくれた観測者の皆様に感謝いたします。

付録

1. ZHR_m (等級別 ZHR) および ZHR_{t,m} の求め方

ZHR は、「輻射点为天頂にあり、最微星 6.5 等で視野をさえぎるものがない時に、1 人の観測者が 1 時間あたりに観測する流星数」である。この考え方を等級別の流星数にも適用した。

$$\text{通常の ZHR の求め方: } ZHR = N \cdot k \cdot r^{(6.5-lm)} / (T_{\text{eff}} \sinh_R) \quad (1)$$

$$\text{平均 ZHR の求め方 (観測条件で重み): } \text{AveZHR} = \text{sum}(N_i) / \text{sum}(C_i) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} C = T_{\text{eff}} \sinh_R / (k \cdot r^{(6.5-lm)}) \quad (3)$$

$$k = 1 / (1 - cl / 10) \quad (4)$$

ここで、N は観測流星数、T_{eff} は観測時間[hr]、h_R は輻射点高度、cl は雲量、lm は最微星である。今回の ZHR_m の求め方は基本的には上と同じである。ただし、最微星補正は異なる。

$$\text{光度別平均 ZHR の求め方: } \text{AveZHR}_m = \text{sum}(N_{m,i}) / \text{sum}(C_i) \quad (5)$$

$$\text{ただし、} C = T_{\text{eff}} \sinh_R / (k \cdot P_{6.5,m} / P_{lm,m}) \quad (6)$$

ここで、N_m はその等級の流星数、P_{6.5,m} や P_{lm,m} はそれぞれ、最微星が 6.5 等および観測時のその等級の流星の認識率(可視面積比)である。これは、流星等級 m と最微星 lm の差 m=lm-m の関数であり、表 A の値を用いた。

なお、(6)式のかわりに、

$$C' = T_{\text{eff}} \sinh_R / (k / P_{lm,m}) \quad (7)$$

を用いると、等級別 ZHR_m ではなく、真の等級別出現数 ZHR_{t,m} が得られる。これは光度比を求める際に用いている。

なお、回帰直線から光度比を求める際には、Excel の関数 “logest” を使用した。

表 A. 認識率 ([8]の値をもとにして、間を内挿)

m	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
7	1	1	1	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94
6	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85
5	0.84	0.83	0.82	0.81	0.8	0.79	0.78	0.77	0.76	0.74
4	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.55	0.52
3	0.49	0.46	0.43	0.4	0.37	0.35	0.32	0.29	0.26	0.24
2	0.22	0.20	0.18	0.16	0.145	0.13	0.115	0.10	0.088	0.079
1	0.071	0.063	0.056	0.049	0.043	0.039	0.034	0.030	0.026	0.023
0	0.020	0.018	0.015	0.0122	0.010	0.0081	0.0062	0.0046	0.0032	0.0023

2. 4公転トレイルと9公転トレイルの推定 ZHR 算出法

0等から4等の間では、光度比は一定であると考えられるので、次の式が成り立つ。

$$N_{4,m} = N_{4,0} r_4^m \quad (8)$$

ここで、 $N_{4,0}$ は4公転トレイルの0等の流星数、 $N_{4,m}$ は4公転トレイルのm等級の流星数、 r_4 は仮定した4公転トレイルの光度比である。

m等級の全体の流星数 $ZHR_{t,m}$ は4公転トレイルと9公転トレイルの流星の和だと考えているので、

$$N_{9,m} = ZHR_{t,m} - N_{4,m} \quad (9)$$

$N_{4,0}$ に適切な数値を代入すると、0~4等の $N_{9,m}$ が求まる。これから回帰直線法で9公転トレイルの光度比を計算する。そして、このようにしてもとめた9公転トレイルの光度比が最初に仮定した値(例えば2.0)になるような $N_{4,0}$ をさがす。適切な $N_{4,0}$ が求まると、(8)式を9公転トレイルにも適用し、各トレイルの各等級の流星数も決まる。ここで求めた流星数は、真の流星数である。実際には眼視観測では必ず見落としがある。そこで最微星6.5等のときの認識率 $P_{6.5,m}$ (表A)をかけると、観測される流星数(等級別 ZHR_m)が求まる。そして、各等級の ZHR_m を合計すれば、推定ZHRが求められる。ただし、誤差の見積もり方法は、現在のところ見つけられていない。

参考文献

- [1] R.H.McNaught and D.J.Asher, "The 2001 Leonids and Dust Trail Radiants", *WGN* 29, 2001, pp. 156-164.
- [2] E. Lyytinen, M. Nissinen and T. Van Flandern, "Improved 2001 Leonid Storm Predictions from a Refined Model", *WGN* 29, 2001, pp. 110-118.
- [3] P. Jenniskens, NASA Ames Reserch Center, "Model of a One-Revolution Comet Dust Trail from Leonid Outburst Observations", *WGN* 29, 2001, pp. 165-175.
- [4] R.H. McNaught and D.J. Asher, "Variation of Leonid maximum times with Location of observer", *Meteoritics and Planetary Science* 34, 1999, pp. 975-978.
- [5] H. Ogawa and S. Uchiyama, "The 2001 Leonids Meteor Storm over Japan", *WGN* 29, 2001, pp. 206-213
- [6] R.H. McNaught and D.J. Asher, "Leonid Dust Trails and Meteor Storms", *WGN* 27, 1999, pp.85-102
- [7] P. Jenniskens, C. Crawford, and S. Butow, "Successful Hybrid Approach to Visual and Video Observations of the 1999 Leonid Storm", *WGN* 28, 2000, pp. 58-63.
- [8] R. Koschack and J. Rendtel, "Determination of Spatial Number Density and Mass Index from Visual Meteor Observation", *WGN* 18,1990, pp.44-58, and pp. 119-140.
- [9] P. Jenniskens, SETI Institute at NASA Ames Reserch Center, "The 2001 Storm from 11 kilometers Altitude: First Results", *WGN* 29, 2001, pp.195-199.
- [10] S. Molau, P.S. Gural, and O. Okamura, "Comparison of the "American" and the "Asian" 2001 Leonid Meteor Storm", *WGN* 30, 2002, pp.3-21.
- [11] R. Arlt, J. Kac, V.Krumov, A. Buchmann, and J. Verbert, "Bulletin 17 of the International Leonid Watch: First Global Analysis of the 2001 Leonid Storms", *WGN* 29, 2001, pp. 187-194