

世界の流星電波観測によるしし座流星群の経年変化

小川 宏

筑波大学自然学類 / 日本流星研究会 ogawa@nms.gr.jp

1 はじめに

流星電波観測は、超短波帯の電波を使用しているため、天候や昼夜に左右されることなく継続的な観測が可能である。ところがこの流星電波観測でも流星群の輻射点が沈んでしまえばその観測地点で流星群を観測することはできない。そこで、2001年しし座流星群において、流星電波観測の国際的なネットワークが構築され、常に世界のどこかの地点が、天候に左右されることなく流星群を観測することに成功した [1]。2001年しし座流星群においては予想されていた極大と共に、予想されていなかった極大も観測された。その後も、各主要流星群に対して観測が行われ、2002年しし座流星群においても着実にその活動を捕らえることができた [2]。

しし座流星群は、33.3年で太陽を公転する短周期彗星 Temple-Tuttle によってもたらされた流星群である。確かな記録としては902年から存在し、1833年や1866年、1966年に1時間に数千~数万という激しい流れ星の嵐をもたらし、人々を驚かせてきた。近年も1998年に彗星が回帰し、1999年、2001年、2002年と世界のどこかで1時間あたりの流星数が千個を超える流星雨となった [3]-[5]。一方で光学観測には天候によって観測量が左右されるという決定的な欠点が存在する。

2 目的

本研究では、天候に左右されずさらに常に流星群を観測している、流星電波観測国際プロジェクトのデータならびに過去の Radio Meteor Observation Bulletin (RMOB) より、しし座流星群の経年変化を研究する。

3 方法

今回は地域依存をなくするために全世界の流星電波観測データを統合しなくてはならない。ところが、各観測地点で得られる流星数は、受信機やアンテナなどの観測機器、送信局の種類や周波数、設置場所などの周辺環境に大きく依存し、得られる流星数は大きく変動する。従って眼視係数観測のデータのように単純に値を平均化する事はできない。そこで、この解析を行うために相対地を用いることにする。この相対地は Activity Level と呼ばれ、以下の式 (1) で定義される [6]。

$$A(t) = \frac{H(t) - H_0(t)}{D_0} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (1)$$

ここで、 $H(t)$ は時間 t における観測エコー数、そして H_0 はその時間におけるバックグラウンドのエコー数を示している。 D_0 は1日あたりの流星エコー数で、相対値にするための値である。これが各サイト毎に異なるため、結果的に各地で観測された流星活動が活動レベルという相対値で導き出されてくる。そしてその後の項は、輻射点高度 θ の変化に伴う流量補正である。また、流星群の輻射点为天頂近くになると流星電波観測の特性上、観測される流星数が減少するため、今回のデータ解析には輻射点高度が20度以上80度未満のデータを使用している。さらに、バックグラウンドデータから、全サイトで全サイト平均値より標準偏差 ± 1.5 以内には全データが入っていることから、各時間において、生データの平均値から ± 1.5 の範囲内を解析データとして採用し、それ以外は異常値として解析からはデータを除外している。ただし、平均値から ± 1.5 ではまだばらつきが大きいので、今回の解析においては、生データの平均値から ± 0.75 範囲内であるデータを使用した。それらのデータを再度平均してその時間の Activity Level を求め、標準偏差でエラーバーをつけた。

データは 1998 年～ 2003 年までのしし座流星群においてデータを使用し，各年ともに，バックグラウンドの期間を 11 月 1 日～ 14 日 (サイトによっては 11 月 20 日～ 25 日) までとしている．データ出典は 1998 年～ 2000 年までは主に Radio Meteor Observaiton Bulletin より，2001 年以降は流星電波観測国際プロジェクトのデータを使用している．

4 結果

統合した結果を図 1 に示す．

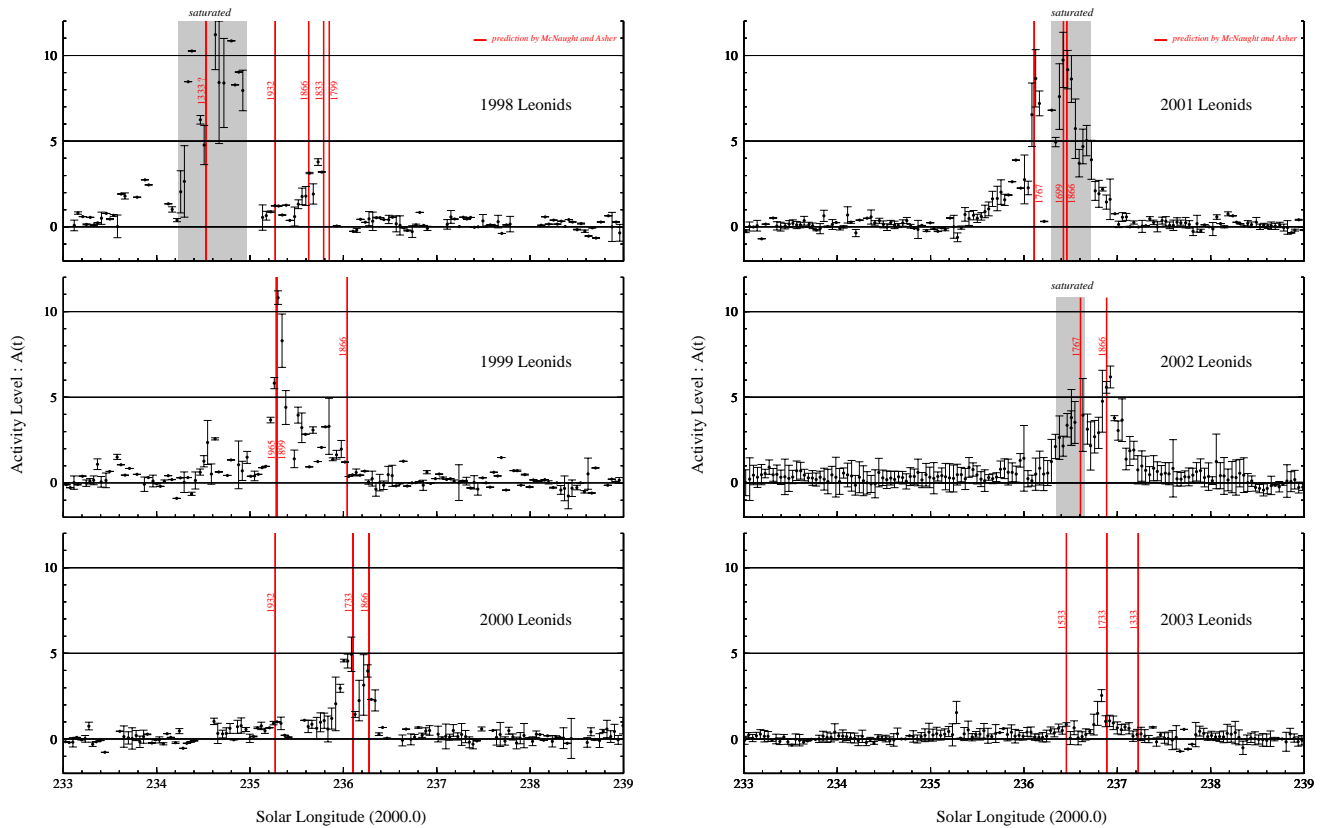


図 1: しし座流星群経年変化 1998 年～ 2003 年

横軸が太陽黄経であり，縦軸がそれぞれ Activity Level を示している．縦線は R.McNaught 氏と D.Asher 氏が計算した [7]，各ダストトレイルによってもたらされる極大を示している．数字はそのダストトレイルの生成年である．灰色で示している部分は，流星電波観測の観測画面がロングエコーの多発で飽和状態となり，正常な流星計数ができない時間帯である．従ってこの灰色の時間帯は実際活動レベルが高いかもしれないし低いかもしれない．

各年において，予想された頃に極大を迎えているケースが多いが，それ以外にも極大を見出すことのできる時間帯も存在することが分かる．また，2001 年以降データのばらつきが小さく，データ数が豊富なのは，流星電波観測国際プロジェクトが組織されたためで，データ数も 4 倍～ 5 倍となった．従って現段階では 1998 年から 2000 年までのデータはサンプル数が十分とは言えない．

5 考察

5.1 流星電波観測による観測結果と予報との比較・各年の状況

まずは各年の流星電波観測で観測されている極大と，予想された極大を比較した結果を表 1 に示す．

西暦	電波で観測された極大			計算された極大 (McNaught-Asher)			
	時刻 (世界時)	太陽黄経	Activity Level	時刻 (世界時)	太陽黄経	生成年	$r_E - r_D$
1998	Nov. 17 02h	234.549?	15.5*	-	-	1333	-
	Nov. 17 19h	235.265	1.23 ± 0.02	Nov. 17 04:34	235.27	1932	+0.0055
	Nov. 18 04h	235.638	3.14 ± 0.04	Nov. 18 04:08	235.63	1866	+0.0040
	Nov. 18 06h	235.729	3.78 ± 0.20	Nov. 18 07:56	235.79	1833	+0.0044
				Nov. 18 09:22	235.85	1799	+0.0044
1999	Nov. 17 08h	234.545	2.36 ± 1.28				
	Nov. 18 02h	235.301	10.81 ± 0.39	Nov. 18 01:43	235.29	1932	+0.0019
				Nov. 18 02:07	236.04	1899	-0.0007
	Nov. 18 15h	235.846	3.31 ± 1.63				
	Nov. 18 18h	235.977	1.98 ± 0.50	Nov. 18 19:59	236.04	1866	+0.0016
2000	Nov. 17 07h	235.250	0.93 ± 0.11	Nov. 17 07:53	235.27	1932	-0.0012
	Nov. 18 03h	236.087	4.95 ± 1.00	Nov. 18 03:44	236.10	1733	+0.0008
	Nov. 18 07h	236.259	3.97 ± 0.36	Nov. 18 07:51	236.28	1866	+0.0008
2001	Nov. 18 05h	235.915	4.62 ± 1.02				
	Nov. 18 10h	236.167	8.66 ± 1.67	Nov. 18 09:55	236.11	1767	-0.0004
	Nov. 18 17h	236.419	$9.73 \pm 1.61^*$	Nov. 18 17:24	236.42	1699	-
				Nov. 18 18:13	236.46	1866	+0.0002
	Nov. 18 23h	236.672	5.03 ± 0.88				
2002	Nov. 19 04h	236.631	$3.96 \pm 2.12^*$	Nov. 19 03:56	236.61	1767	-
	Nov. 19 11h	236.925	6.19 ± 0.64	Nov. 19 10:34	236.89	1866	0.0000
2003	Nov. 19 06h	236.454	0.86 ± 0.10	Nov. 19 06:30	236.45	1533	-
	Nov. 19 15h	236.832	2.54 ± 0.35	Nov. 19 15:50	236.89	1733	-
				Nov. 20 00:50	237.22	1333	-

* エコーが飽和したため正確な計測困難な時間帯

表 1: 流星電波観測で得られた極大と計算された極大との比較

極大が観測された時間については，時間集計が 1 時間単位であるため，表記は”時台”の表記になっている．太陽黄経は 17 時台であれば 17:30 の時の太陽黄経である．従って前後 30 分の幅があることをご承知頂きたい．計算で求められている極大は McNaught-Asher の文献 [7] ならびにその後の改訂された値を使用している．1998 年の 17 日 2 時の極大については，彼らは 1333 年のダストトレイルが共鳴によってもたらされた結果であると述べてはいるが，実際のダストトレイルがいつ接近あるいは遭遇するのかが不明であったため，時刻については掲載していない．

1998 年の活動については，前述のように 17 日 2 時の前後数時間は活動レベルが全体的に高いが，Activity Level の最高値は 2 時に 15.5 を記録している．ただし，火球が多発したことで，エコー数の測定が正常になされていないことが推測される．特にこの時間帯はヨーロッパのデータが中心となり，彼らのデータの大半は自動解析にかけられている．従って，エコーを過剰にカウントしている可能性もあり，Activity Level は低い可能性もある．どちらにしてもこの時間帯の Activity Level を求めることは難しい．その後の 17 日 19 時台には日本

を中心に Activity Level が若干上昇しているが、 1.23 ± 0.02 と、そこまで高いわけではない。ただ、この年は全体的にダストトレイルとの地球軌道との距離が長いので、活動規模がそれほど上昇していないことも考えられる。1998 年は 1932 年、1866 年、1833 年、1799 年のダストトレイルに遭遇するという計算結果になってはいるが、各ダストトレイルと地球軌道間距離がそれぞれ、 $+0.0055\text{AU}$ 、 $+0.0040\text{AU}$ 、 $+0.0044\text{AU}$ 、 $+0.0044\text{AU}$ と遠い。17 日 19 時台の極大は、その結果を反映しているのかもしれない。ただ、18 日 6 時台には 3.78 ± 0.20 の明瞭な極大が観測されており、このあたりは議論の余地があるといえる。もちろんこの年はデータ数が多くはないのでデータの信頼性の面でも要検討である。

1999 年はヨーロッパで大出現となった。この年は暗い流星の割合が多かったためか、流星エコーそのものは飽和しなかった地点が多く、エコーカウントは正常に行われたと考えられる。そのためかデータの精度は比較的良く、18 日 2 時台に 10.81 ± 0.39 となった。ヨーロッパや日本のデータが解析に使用されている。この他、この主極大に先駆けて 17 日 8 時台にもエコー数の増加が認められている。若干誤差範囲が大きいので、データ不足による見かけの産物の可能性もある。ただし、それを考慮してもこの時間の付近ではデータがざわついている。同様に表には含めなかったが太陽黄経 233.7 度付近でも Activity Level の増加が見られる。主極大後はデータ数が少なくなるため Activity Level の値は上下するが、Activity Level は徐々に下がっている。この上下のためか、日本で主に観測された 18 日 18 時頃の極大は不明瞭で、主極大後のデータの上下が押さえられると、18 日 18 時に 1.98 ± 0.50 の副極大が見られる。ただし、主極大後のデータはアメリカにほとんど依存しており、アメリカのデータが皆無に等しいことから、この付近のデータ精度向上は難しいかもしれない。

2000 年は Dust Trail モデルが有名となった年で、McNaught-Asher の論文は注目を浴びた。その中で、3 つの予報はすべて高い精度で観測された。流星電波観測でもこれらのピークは観測されているが、この年、アメリカのデータが欠けた事によってアメリカの観測時間帯のみデータが欠落している。しかし、幸いにも極大はほとんどヨーロッパで観測されたため、予報通りの極大が観測されている。

2001 年、メインピークは 18 日 10 時台と 17 時台にそれぞれ観測されている。これらふたつのピークは計算結果通りとなったが、18 日 16 時台 ~ 19 時台は、日本各地の流星電波観測地点でエコーが飽和したため、カウント値はかなり曖昧である。従って実際はこれらの計算結果よりも値は大きいかもしれないし小さいかもしれない。よって、ピーク時刻が 17 時台とはなっているが、18 時台もほぼ活動レベルは同じであるため、18 時台がメインピークだった可能性も高い。結果的には、エコーの総継続時間を測定したところ 18:20 頃に極大が観測されていたことが分かっている。おそらくこれはロングエコーの多発によってカウントが正常に行われなかったためであろう。この他、メインピーク後の 18 日 23 時台にサブピークが見られている。メインピーク前にも同様に 18 日 5 時台にサブピークが観測された。これらに該当するダストトレイルは今のところ発表されていない。18 日 23 時台については、Esko Lyytinen 氏によって 10 公転や 11 公転トレイルが 19 時頃に広い半値幅を持つ活動として予測がされているが、Activity Level の値が 5.03 ± 0.88 と、2000 年の極大並みに高いことから、これらのトレイルによる活動であるとは言い難い。

2002 年は月明かりの中で光学観測では不利な状況となったが、流星電波観測ではヨーロッパとアメリカでピークが起こるため、ヨーロッパサイトは両方のピークをカバーできるというむしろ好条件であった。メインピークの最初は 19 日 4 時台にヨーロッパで観測された。この時、各地でエコーが飽和したため、Activity Level は、 3.96 ± 2.12 と伸び悩み、エラーバーも大きかった。これは 1998 年や 2001 年同様、ロングエコーの多発によるものであった。従って 1998 年や 2001 年同様、Activity Level の値には不確実性が残る。その後のアメリカピークは、飽和は真逃れたがその直前となりこちらも Activity Level の信頼性が危うい。ただ幸いにもヨーロッパは輻射点高度が下がってきていたためか飽和はせず、輻射点高度の補正をして集計に加えると、 6.19 ± 0.64 となり、比較的良好な結果が出ている。極大は 11 時台に観測されているが、同様に 10 時台も高く、一方 12 時台は急降下していることから、11 時台前半に極大が起こったものと考えられる。

2003 年、しし座流星群の活動はかなり衰退したことがわかる。日本で話題となった 1499 年のダストトレイルは、13 日夕刻 (日本時:14 日早朝) に出現があると予想されたが、流星電波観測では顕著な活動を捕らえていない。13 日 18 時前後はサイトによっては Activity Level が 1.0 を超えているが、全体的には 0.5 前後で推移し、特別な活動は今のところ見られていない。その後、1533 年のダストトレイルが遭遇する 19 日 6 時頃には、一応 0.86 ± 0.10 の活動はあるが、活発な活動とは言えず、むしろ通常レベルを推移したと言った方が正しい。Esko Lyytinen 氏は 19 日 8 時台、Vaubailon 氏は 7:30 頃に極大を予想しているが、その時間帯は Activity

Level が一度下がるので、極大は見いだすことができない。その後、19 日 15 時台少し手前からアメリカのサイトでエコー数が増加し始め、日本でも輻射点が昇ってきた、19 日 15 時台に 2.54 ± 0.35 という 2003 年の最大ピークを観測した。1733 年のダストトレイルにしては若干時刻が早かった。このダストトレイルの予報は当初 McNaught-Asher はしていなかったが、その後 web で公開した値である。Lyytinen 氏らはこのダストトレイルについて 19 日 0:25 と全く違った時刻となっている。日本で観測された 19 日 15 時台の 2003 年のメインピークとも呼べる活動は何によるものなのだろうか。その後は徐々に活動レベルが低下した。1333 年トレイルや、Lyytinen 氏ら、Vaubaillon 氏によって計算された 22 日 21 時 ~ 22 時頃の 736 年ダストトレイルに伴う活動も明瞭な活動は見られていない。ただし、日本では輻射点が低く、アメリカのデータが入っていないため信憑性は薄い、22 日 15 時台 (太陽黄経 239.862 度) に Activity Level で 1.20 ± 0.62 を観測している。

ここまで各年の活動状況と予報との検証結果を見てきたが、今回のこの研究から、一番に言えることは世界の流星電波観測結果を統合することで予報を検証するだけの材料になるということである。特に 2001 年以降はサイト数が飛躍的に増加し、平均的にサンプルとなる観測地点数が 5 地点以上あり、日本の観測時間帯は 20 地点近くもあるため、エラーバーも小さく良好な結果が出てきている。また、予報に含まれていない極大についてもひょっとしたら何らかのダストトレイルによるものかもしれないし、そうでないかもしれない。その確認をしし座流星群の構造を解明するためにも実施して頂きたいものだ。

5.2 しし座流星群の電波観測からみる経年変化

今回の解析から、しし座流星群の経年変化を見てみると、1999 年や 2001 年には非常に高い活動が観測されていることが分かる。その活動レベルは母彗星が回帰してから経過した年数で決まるのではなく、ダストトレイルに地球が遭遇するかどうかであることもこれらの結果から分かる。従来は母彗星が回帰した年かその翌年に活発な活動が観測されていたため、ダストトレイルの考えは重要視されてこなかったが、今回帰の結果からはダストトレイルの考えの重要性を物語っている。2001 年以降は確実にその活動は衰退している。2003 年ではほぼ活動は終息してきているように見えるため、活動期の終息を見るためにも 2004 年の観測が非常に重要であると言える。また、同時に活動期の始まりがいつであるのかさらにデータを積み重ねる必要があると言える。

6 Activity Level の問題点

今回、指標として用いてきた Activity Level であるが、いくつか問題点がある。まずひとつはエコーが飽和したときに指標としての信頼性が下がってしまうという点である。これは、近年、大川一彦氏作成の HROFFT が主流となってきており、そのサンプリングが 0.5 秒で 1 秒の 2 コマで強い信号を積分して表示しているため、1 秒以下の分解能は現状もっていない。それゆえ、流星雨のような状況になりロングエコーが頻発すると、エコーとエコーが重なり正常なカウントができなくなる。さらに自動カウントの場合はどこがエコーの切れ目かの判断を誤り過剰カウントする可能性も出てくる。その場合、Activity Level はダイレクトにその値を返してくるので、結果にばらつきが生じる。従って、Activity Level というカウント主体の指標だけではなく、エコーの総時間を測定するなど別の解析方法も並行して行う必要がある。そういう意味では 1999 年のメインピークは、ロングエコーが少なく継続時間の短い流星、すなわち比較的暗い流星が主体の流星雨であったことが推測できる。反対に 1998 年や 2001 年、2002 年は比較的明るい流星の割合が多かったことも見て取れる。

続いて、今回のしし座流星群では直接的には関係ないが、例えば朝から夕方に欠けて活動が観測される流星群では、Activity Level の算出式の性質上、夕方の値の評価が夜半から明け方の活動評価にくらべて高くなる。昼間群やしぶんぎ座流星群などでは考える必要がある。

最後に、これはデータ数が少ないときに生じる問題だが、サイト特有の反射条件に左右される事である。通常 Activity Level は 10 地点 ~ 20 地点のデータが統合されているため、結果的にサイト特有の反射条件でエコー数が増減する場合は、エラー値の除外で除外されるが、データ数が 5 地点を切ると、天頂効果の影響などが Activity Level に現れてくる。従って、反射領域の総面積を計算し補正しなければならないことになる。ただしこれは反射領域そのものが未だ確立していないだけに、補正をかけない方が無難であるのが現状である。

7 まとめ

今回の解析にあたって、世界の流星電波観測結果を Activity Level という指標で統合することは制約はあるものの、近年主流になったダストトレイルの予報を検証するに値する観測であることがわかった。それと同時に、観測された極大が予報と良い一致を示していることもわかり、予報精度の高さを伺い知ることができる。ただし、予想されていなかった極大も観測されていることから、予報を計算している方と連絡を取り、他に該当するようなトレイルがないかどうか、あるいはもっとよりよい予報ができるかどうか研究してもらう必要性がある。今回の解析データはそれを依頼するに値する結果となったのではないだろう。

8 謝辞

この解析を進めるにあたって、Radio Meteor Observation Bulletin(RMOB) ならびにその発行者の Christian Steyaert 氏、上田昌良氏には多くのデータを提供して頂いた。また、個人サイトとして鈴木和博氏の Radio Meteor Data, Japan から毎年のデータを使用させて頂いた。そして 2001 年以降は流星電波観測国際プロジェクトのデータを使用している。以上の方々ならびにプロジェクト参加者に対して深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Ogawa, H., Toyomasu, S., Ohnishi, K., Maegawa, K., 2002: The Leonid 2001 Project by Radio Meteor Observations, *WGN* **30**, 105-109
- [2] Ogawa, H., Toyomasu, S., Ohnishi, K., Amikura, S., Maegawa, K., Jenniskens, P., 2002: The 2002 Leonids as Monitored by the International Project, *WGN*, **30**, 225-231
- [3] Arlt, R., Rubio, B., L., Brown, P., Gyssens, M., 1999: Bulletin 15 of the International Leonid Watch: First Global Analysis of the 1999 Leonid Storm, *WGN* **27**, 286-295
- [4] Arlt, R.; Kac, J.; Krumov, V.; Buchmann, A.; Verbert, J., 2001: Bulletin 17 of the International Leonid Watch: First Global Analysis of the 2001 Leonid Storms, *WGN* **29**, 187-194
- [5] Arlt, R.; Krumov, V.; Buchmann, A.; Kac, J.; Verbert, J., 2002: Bulletin 18 of the International Leonid Watch: Preliminary Analysis of the 2002 Leonid Meteor Shower, *WGN* **30**, 205-212
- [6] Ogawa, H., Toyomasu, S., Ohnishi, K., Maegawa, K., 2001: The global monitor of meteor streams by Radio Meteor Observation all over the world, *Proceeding of the Meteoroids 2001 Conference*, 189-191
- [7] McNaught, R. H.; Asher, D. J., 1999: Leonid Dust Trails and Meteor Storms, *WGN* **27**, 85-102