

流星電波観測のさらなる有用性を目指して (中間発表)

小川 宏

筑波大学自然科学類 / 日本流星研究会 ogawa@nms.gr.jp

1 はじめに

流星は発光する際に周辺大気を電離し、流星の飛跡に沿って電子密度が高い部分が円柱状に分布する。超短波帯の電波は電離層において通常の電子密度では電離層を突き抜けるが、流星発光などで周辺大気の電子密度が上昇すると、その電子によって散乱される。つまり、流星が発光する際に電波が散乱されるというシステムが構築される。これが「流星電波観測」である。この流星電波観測には、送信局で送信する電波を同じ場所で受信する後方散乱と、送信局の電波を違う場所で受信する前方散乱とがある。後方散乱は自身の観測地点で送信と受信とを行うため、電波の打ち上げ角と送信から受信までにかかる時間が分かれば、流星の速度などを計算することが可能となる。ところがこのシステム構築には莫大なお金がかかるため、レーダー観測で代表されるようにプロの観測者が主に行っている。一方、前方散乱はひとつの送信局に対し、多数の観測サイトを設けることが可能となる。しかも受信局側はアマチュア無線機などの受信機とアンテナがあればよいので、比較的安価に実施することができる。結果的に現在、アマチュアの愛で広がっている流星電波観測は主に前方散乱を利用した観測である。本研究では特に断りのない限り、「流星電波観測」は「前方散乱を用いた流星電波観測」をさすこととする。

流星電波観測は1971年、日本の鈴木和博氏がFMラジオを用いた観測を世界で初めて実施し成功したことに始まる (Suzuki 1976)。その後、アマチュアの間急速に普及し、数々の流星群を確実に観測するようになった。ところが日本では1995年頃からFM放送局が急激に増加し、この観測が難しくなった。そこで、アマチュア無線を利用した観測の試験が始まり、1996年頃からはほぼ定常観測となった (Maegawa 1999)。2000年には大川一彦氏によってWindows環境での自動観測ソフトや専用受信機の開発で、その観測は一気に身近となり、2001年以降は、世界的な流星電波観測プロジェクト「流星電波観測国際プロジェクト」が運用され、23ヶ国172地点の観測サイトがエントリーした (Ogawa et al. 2002)。2002年には、1996年から主流であった福井高専の前川公男氏による53MHzに加えて、長野の矢口徳之氏が28MHzの定常送信がなされるようになり (Usui et al. 2002)、多波長観測 (Miyao 2003) などに大きな成果をもたらしてきている。流星電波観測のメリットは何と言っても「継続性」「安定性」であり、天候にも左右されず、また昼夜にも左右されない。さらに自動観測を行うことで継続した観測が安定して運用されている。これに加えて、国際プロジェクトになることで、地域依存性・サイト依存性を少なくし、輻射点高度や反射特性などの問題を解決した。

1998年頃から世間的に有名となったしし座流星群は、33.3年で太陽を公転する短周期彗星55P/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。光学観測によっても捕らえられてきたが、光学観測の欠点はデータが断片的になる可能性があり、天候に左右されてしまうことがあげられる。ところが流星電波観測では、そのようなことがないため、しし座流星群の経年変化を見るには適した観測方法といえる。

そこで本研究では、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。

さらに、他の主要流星群についても経年変化を調べ、最終的には眼視観測で求められるZHRと流星電波観測で得られる活動レベルとの相関まで言及しようと思う。

本研究は流星電波観測のこれからのさらなる有用性と流星天文学としての生き残りをかけた研究の序章である。

2 Activity Level Index

2.1 定義

しし座流星群の経年変化を見るために、今回は地域依存をなくさなくてはならないため、全世界の流星電波観測データを統合する必要性がある。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値 Activity Level: $A(t)$ を採用し、これは以下の式で定義される (Ogawa et al. 2001)。

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A'(t)_i \quad (1)$$

$$A'(t) = \frac{H(t) - H_0(t)}{D_0} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (2)$$

ここで、 $H(t)$ は時間 t における観測エコー数、そして $H_0(t)$ 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。まず、各地のデータを式 (2) で求め、あるサイトにおける Activity Level, $A'(t)$ が求められる。その後、サイト数 N のデータを平均化し、その時間における最終的な Activity Level, $A(t)$ を求める。ここで、標準偏差 $\sigma(t)$ も算出しておく。この Activity Level は、式 (1), (2) より、観測されている流星エコー数が通常レベルに比べて何倍の活動を示しているかという指標が導き出される。

2.2 輻射点高度の考慮

流星群による流星物質の地球に対する流量は、 $\sin \theta$ による。従って、補正としては、式 (2) のように補正項が加えられる。このことから、輻射点高度が低い場合、この補正値は大きくなり、過補正の可能性が高くなってデータの信頼性は落ちる。従って、眼視観測同様、輻射点高度が 20 度以下のデータは切り捨てられている。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 (天頂効果)、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。世界的にこの基準でもデータがとぎれることはないので、継続性という観点では特に問題はない。

2.3 異常データの除去

観測データも時には異常がある。特に海外データは観測からカウントまで自動で行っているケースが多く、他局との混信、E スポ、オーロラなど電離層における現象や、周辺ノイズが含まれる場合は、正常なデータが報告されない。従ってこれらのデータを除去する必要がある。図 1 には、流星群活動が活発ではない、11 月 1 日 ~ 10 日 (1999-2003 年)、12 月 26 日 ~ 31 日 (2000 年 ~ 2002 年) の期間について各地の Activity Level を求め、それぞれしし座流星群、しぶんぎ座流星群の輻射点高度が 20 度以上 80 度未満である時間帯のみをヒストグラムで表示したものである。全データである 14,175 データから求められる平均値と標準偏差は、 -0.00068 ± 0.72248 である。平均値はほぼ 0 であり、流星群活動期間がない時期なので、多くのデータが 0 付近に分布していることが分かる。ところが、中には -2.0 や 2.0 という値もある。これらの意味することは、散在の二倍の活動が見られているということであり、ほとんどが散在流星の出現期間でありながら、これらのデータは明らかに異常値である。

さて、ここで、あるサイトの Activity Level: $A'(t)$ が通常値かどうかは、以下の式 3 で判別することにする。

$$A(t) - n\sigma(t) \leq A'(t) \leq A(t) + n\sigma(t) \quad (3)$$

この条件式で、範囲内におさまっている $A'(t)$ が正常値と見なされ、再度、式 (1), (2) によって計算され、最終的な時間 t における Activity Level: $A(t)$ が求まる。

さて問題は、式 (3) におけるパラメーター n である。平均値から $\pm\sigma$ の範囲では、全体の 81.95%, 11619 データが正常値となる。一見、妥当ではあるがこれには大きな落とし穴がある。それはデータ数が少ないときであり、例えば、各地の Activity Level が、6.5, 0.2, 0.3, 0.3, 0.2, 0.2 11.0 だとすると、平均値は 2.7 で標準偏差は 4.4。この場合、明らかに見た感じで、11.0 と 6.5 の全データ 7 つの内 2 つが平均値を押し上げていることが分かり、これらふたつは多数である 5 データに比べると異常値となる。ここで、 $A(t) \pm \sigma$ を仮に正常値とすると、11.0 は異常値として除去されるが 6.5 は残る。従って、まだこの時間における Activity Level はおかしい。この例はサンプル数が少なくて分布が比較的広いときに生じる。従って、 $n = 1$ では値が大きすぎるのである。さて、それでは半分の $n = 0.5$ ではどうかというと、 $n = 0.5$ では、データは全体の 64.25% となり、前述の例もクリアできるが、半分強のデータが落とされることになるため、データ数が少ない時間帯にはその効果がむしろ多数低下へと悪影響を及ぼしてしまう。特に日本・ヨーロッパ・アメリカの主要観測国を埋めるボタンゾーンが手薄になる。従って $n = 0.5$ ではやや小さい。このように試行錯誤をすると、経験則としてどうやら、 $n = 0.75(3/4\sigma)$ がうまくいく。 $n = 0.75$ の時は、全データの 72.00% が該当し、前述の例についても、正常値が $-1.4 \leq A'(t) \leq 6.0$ となり、6.5 の異常値もカットされて結果的に 0.2, 0.3, 0.3, 0.2, 0.2 となり、質の良いデータ集計ができる。このようにして、今回も異常データ除去を行った。

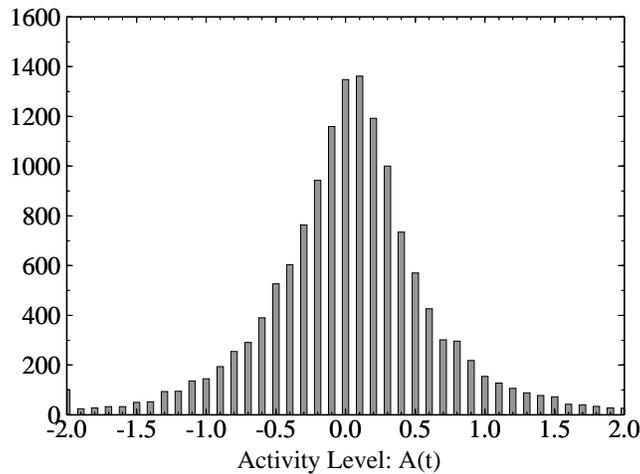


図 1: 非流星群活動期における全サイトの Activity Level のヒストグラム

ここで注意して頂きたいことは、Activity Level を仮に一サイトで行っても、必ずしも正しい流星活動を捕らえているわけではないということである。つまり、一サイトでは何時にピークが検出されたからといって、それが流星群活動のピークではなく、そのサイトでのピークにしか過ぎないためである。この事は、地域性や観測環境・機器に依存してピーク時間が動くことによるものである。本研究では、流星電波観測国際プロジェクトの多くのデータを利用し集計しているため、これらの影響を最低限まで押し下げ、結果的にほぼリアルな流星群活動を見ているといえるのである。その点だけご注意ください。

3 使用データ

本研究では 1998 年～ 2003 年までのしし座流星群の経年変化を解析するために、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。また、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。

4 結果

統合した結果を図 2 に示す．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 [?], 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いだ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．

Year	Time (UT)	λ_{\odot}^{**}	Activity Level	Year	Time (UT)	λ_{\odot}^{**}	Activity Level
1998	Nov. 17 02 ^h	234°549	15.5*	2001	Nov. 18 05 ^h	235°915	4.62 ± 1.02
	Nov. 17 19 ^h	235°265	1.23 ± 0.02		Nov. 18 10 ^h	236°167	8.66 ± 1.67
	Nov. 18 04 ^h	235°638	3.14 ± 0.04		Nov. 18 17 ^h	236°419	9.73 ± 1.61*
	Nov. 18 06 ^h	235°729	3.78 ± 0.20		Nov. 18 23 ^h	236°672	5.03 ± 0.88
1999	Nov. 17 08 ^h	234°545	2.36 ± 1.28	2002	Nov. 19 04 ^h	236°631	3.96 ± 2.12*
	Nov. 18 02 ^h	235°301	10.81 ± 0.39		Nov. 19 11 ^h	236°925	6.19 ± 0.64
	Nov. 18 15 ^h	235°846	3.31 ± 1.63	2003	Nov. 19 06 ^h	236°454	0.86 ± 0.10
	Nov. 18 18 ^h	235°977	1.98 ± 0.50		Nov. 19 15 ^h	236°832	2.54 ± 0.35
2000	Nov. 17 07 ^h	235°250	0.93 ± 0.11				
	Nov. 18 03 ^h	236°087	4.95 ± 1.00				
	Nov. 18 07 ^h	236°259	3.97 ± 0.36				

* エコーが飽和しているため値は参考程度

** 本論文で太陽黄経 (λ_{\odot}) はすべて 2000.0 年分点とする

表 1: 流星電波観測で観測された 1998 年～2003 年におけるしし座流星群のピーク時刻

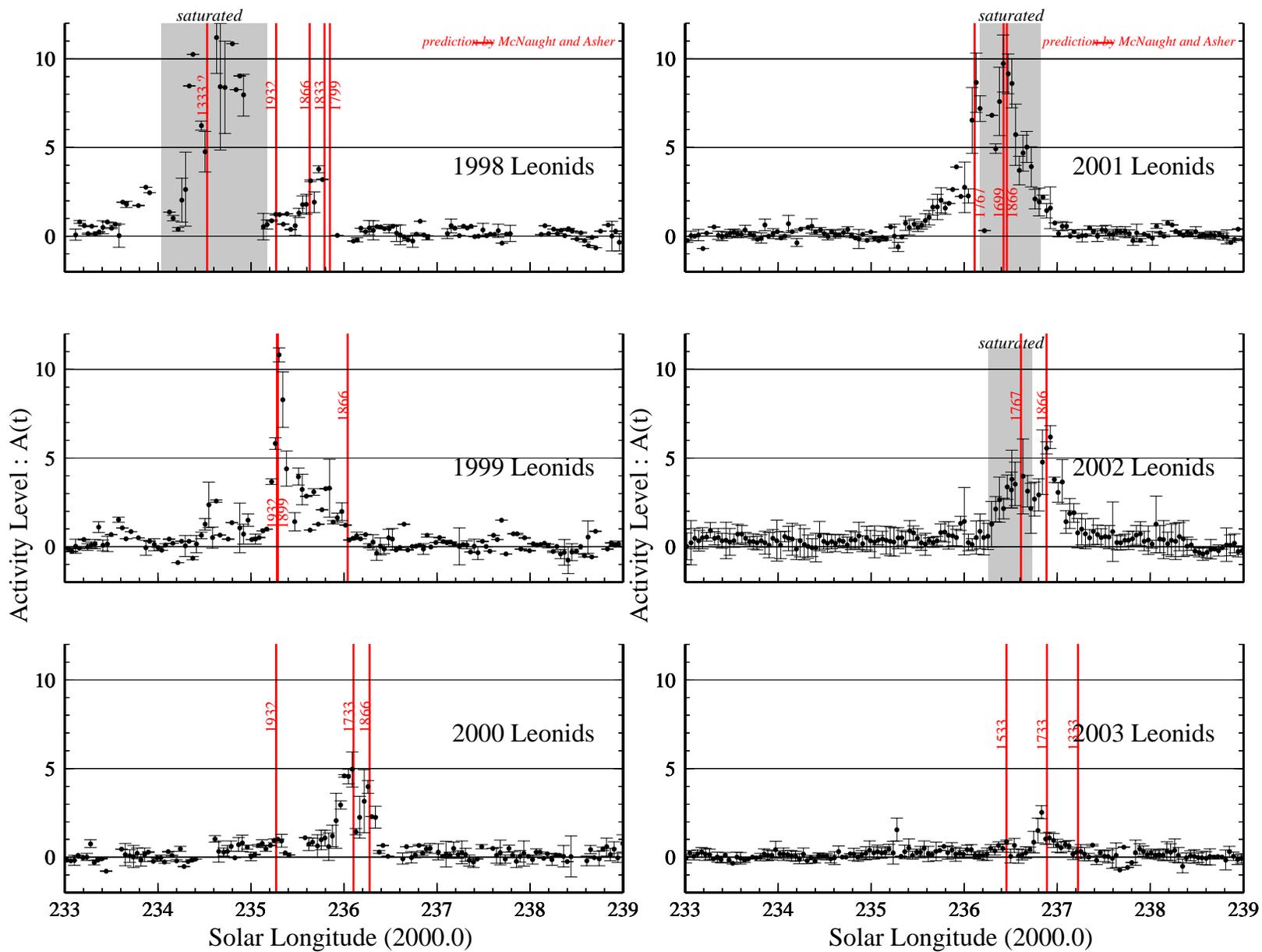
1998 年，17 日 2 時台 (以下すべて UT) に $A(t) = 15.5$ を記録し，この年の最高活動レベルとなっているが，この年は，ロングエコーが多発してカウントが不可能な状態に陥ってしまったので，Activity Level の値がヨーロッパを中心に跳ね上がり，結果的にはこの前後数時間は値が大きくばらつき，最高値が本当に 15.5 なのかも怪しい．この数値そのものの信頼性は低いですが，何らかの大きな活動があったことは確かである．この年はこの他に 18 日 4 時台や 6 時台にも $A(t) = 3$ 程度の活動が観測されている．

1999 年は 18 日 2 時台 ($\lambda_{\odot} = 235^{\circ}301$) に $A(t) = 10.81 \pm 0.39$ の活発な活動が捕らえられている．これはヨーロッパを中心として眼視でも観測された ZHR3700 (by IMO) とほぼ同時刻である．この他にも，17 日 08 時台に $A(t) = 2.36 \pm 1.28$ ，18 日 15 時台に $A(t) = 3.31 \pm 1.63$ のようなサブピークが観測されている．

2000 年は 3 つの極大が観測されているものの，17 日 7 時台に観測されたピークは $A(t) = 0.93$ と，散在レベルよりやや高い程度の活動であり，顕著な活動ではなかった．18 日 03 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}087$) と，18 日 07 時 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}259$) の極大は，それぞれ $A(t) = 4.95$ ， $A(t) = 3.97$ と明瞭な活動が捕らえられている．この年はアメリカのデータがなかったためデータがとぎれているが，幸運にも極大はすべてヨーロッパで検出されたため，活動の推定は行うことができた．

2001 年は，大きな極大が二つ観測されており，ひとつは 18 日 10 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}167$) の $A(t) = 8.66$ であり，アメリカを中心に観測された．そしてふたつめは，18 日 17 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}419$) の $A(t) = 9.73$ で日本やオーストラリアなどアジア全域で観測されている．17 時台の極大付近では，エコーが 1998 年同様に飽和となったため，Activity Level の値には不確定性が残る．1998 年とは異なり，2001 年は日本で飽和状態となった．日本場合はカウントをマニュアルで実施しているため，実際の値よりも低く見積もられがちである．従ってこの数値はもっと高いかもしれない．この他，18 日 5 時台，18 日 23 時台にもそれぞれサブピークが観測されており，活動そのものは比較的複雑であった．

图 2: ζ 座流星群历年变化 1998 年 ~ 2003 年



2002 年は、ふたつの明瞭な極大のみが観測された。ひとつは 19 日 4 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}631$) の $A(t) = 3.96$ 、ふたつめは 19 日 11 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}925$) の $A(t) = 6.19$ である。4 時台のピークは 1998 年や 2001 年と同じように、ロングエコーによって飽和しているため、エラーバーも大きくなっており、この値の信憑性は低い。この年は特にサブピークは検出されていない。

2003 年は、活動レベルはかなり衰退したが、19 日 15 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}832$) に $A(t) = 2.54 \pm 0.35$ の明瞭な極大を観測している。

5 考察

5.1 Lorentz 曲線を用いた出現状況の構造分析

Jenniskens et al. (2000) において、1999 年のしし座流星群の ZHR 変動が Lorentz 曲線で近似されることを述べた。本研究でも同様に、Lorentz 曲線を用いて、しし座流星群の出現状況を解析する。時刻 T における、Activity Level: $A(T)$ は、Jenniskens et al. (2000) より以下の式で表すことができる。

$$A(T) = \frac{A_{max} W_h^2}{(T - T_{max})^2 + W_h^2} \quad (4)$$

ここで、 T_{max} は、極大時刻 (時)、 A_{max} は時刻 T_{max} における最大 Activity Level、 W_h は半半値幅である。つまり、極大前は W_h が Ascending Branch、極大後が Descending Branch を示しており、 $2W_h$ がいわゆる半値幅 (FWHM) である。

式 (4) を用いて、1999 年～2003 年までのしし座流星群の活動をフィッティングさせた。すると、毎年の活動はいくつかの要素の足し合わせであることがわかる。そのグラフを図 3、図 4 に示した。また、その各要素を表 2 に示した。FWHM は、前者 (+) が Ascending Branch、後者 (-) が Descending Branch であり、 $-1.0/+2.0$ であれば、Ascending Branch が 1 時間、Descending Branch が 2 時間であることを示している。

1999 年は、ふたつのケースに分けてみた。全体的に見ると、18 日 02 時頃にメインピークを迎え、その後ゆっくりとした減少を見せている。ここで、このゆっくりとした減少は、メインピークの裾であるのかそれとも別のトレイルであるのかの問題である。“1999A” は Activity Level の値の変動にできるだけ忠実にフィッティングさせた結果である。そのため、実際の観測結果と極めて近い変動を見せている。この時特徴的なトレイル要素は、Trail4 と Trail5 である。この二つのトレイルが極大後のゆっくりとした減少ならびにその時間帯での増減を生み出している。この他、メインピーク前の凸凹もきれいにフィッティングされる。メインピークは“1999A”でも“1999B”でも 18 日 02^h30^m ($\lambda_{\odot} = 235^{\circ}31$) に極大を持つトレイルがもたらしていることになる。1999A では、FWHM が $-1.0/+1.5$ (時) であるが、1999B では、FWHM が $-1.0/+2.0$ と、Descending Branch がやや長い。さて、1999A において、Trail4 や Trail5、そして Trail1 や Trail2 は、データ数が少ないケースもあり、この変動がどこまで正しいのかは正直疑問がある。そこで、これらをなだらかな活動だと推測したものが“1999B”である。1999B だと、1999A で Trail1 と 2 がもたらしたメインピーク前の凸凹が 1999B では Trail1 に相当し、Trail4 と 5 に相当するものが Trail3 である。どちらのトレイルも FWHM は比較的長い。1999A と 1999B とどちらの方がより現実に近いのかを考えることは非常に難しいが、Trail4 と 5 の谷間のデータ数は少ないことから、1999B のフィッティングの方が妥当といえる。もちろん今後、新たなデータが入手できればこれらの結果は変わる事となる。

2000 年は、比較的シンプルなフィッティング結果となった。幅広いトレイルがひとつと、短い FWHM を持つトレイルふたつとで構成されていることがわかる。幅広い活動は、活動レベルも高くなく、 $A_{max} = 1.0$ で FWHM = ± 6.0 となっている。極大は 17 日 9 時台 ($\lambda_{\odot} = 235^{\circ}3$) である。メインは 18 日 02^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}05$) で、 $A_{max} = 5.0$ である。

2001 年は、ロングエコー多発で飽和状態となったため、日本を中心としたアジアのデータはほぼ壊滅状態となった。その中でまず、結果に忠実にフィッティングさせた結果が“2001A”である。アメリカのピークは 18 日 10^h45^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}14$) において $A_{max} = 8.5$ 、FWHM = $-1.7/+1.0$ となって比較的鋭い極大となっている。続いて、第二極大は、18 日 17^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}43$) の $A_{max} = 10.0$ で FWHM = $-1.5/+3.4$ と、Descending

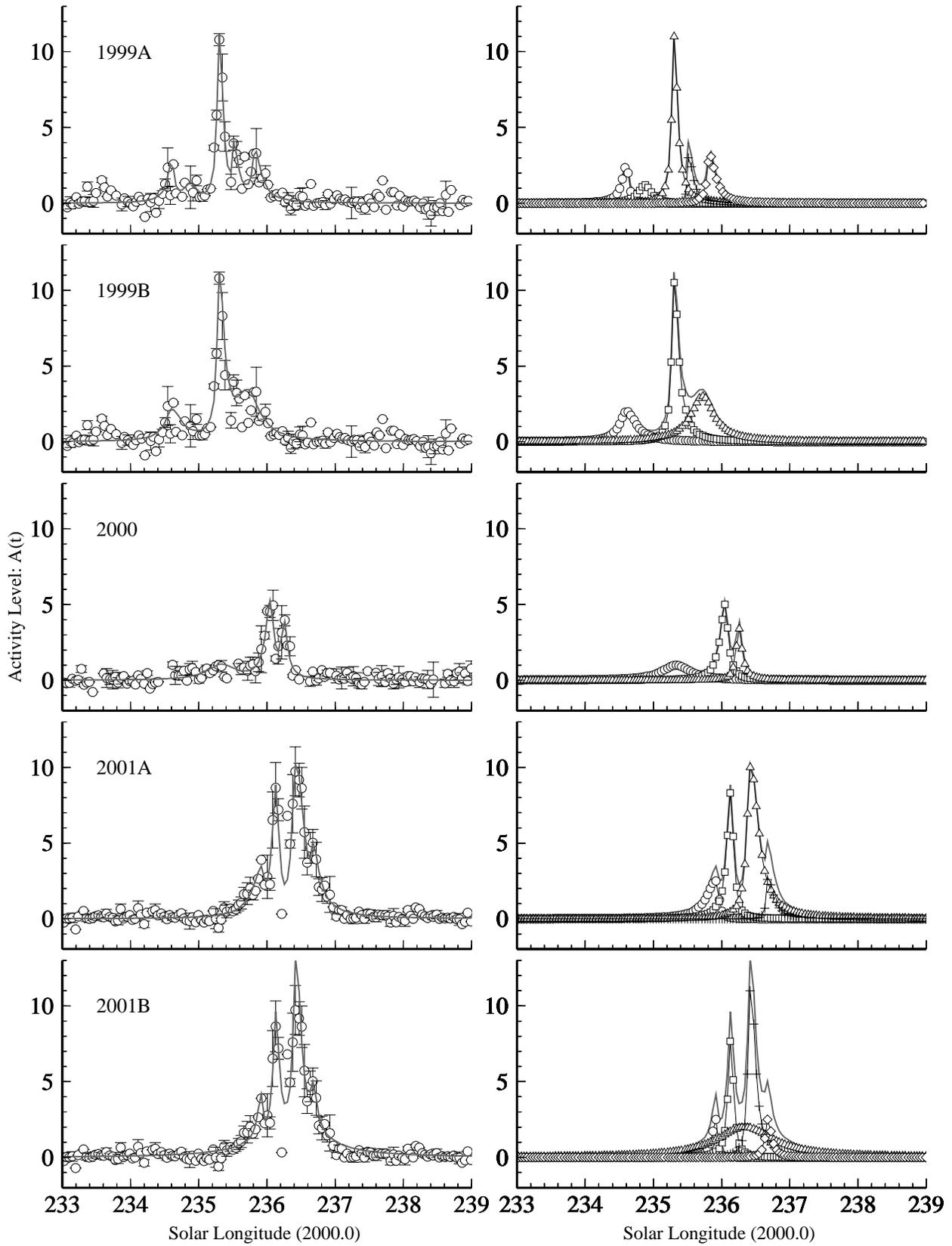


図 3: Lorentz 曲線を用いたし座流星群の構造 (1999 年 ~ 2001 年): (左) Activity Level が , 曲線が全トレイルの合計値 (右) 曲線が全トレイルの合計値, Trail1,2,3,4,5 がそれぞれ , , , + ,

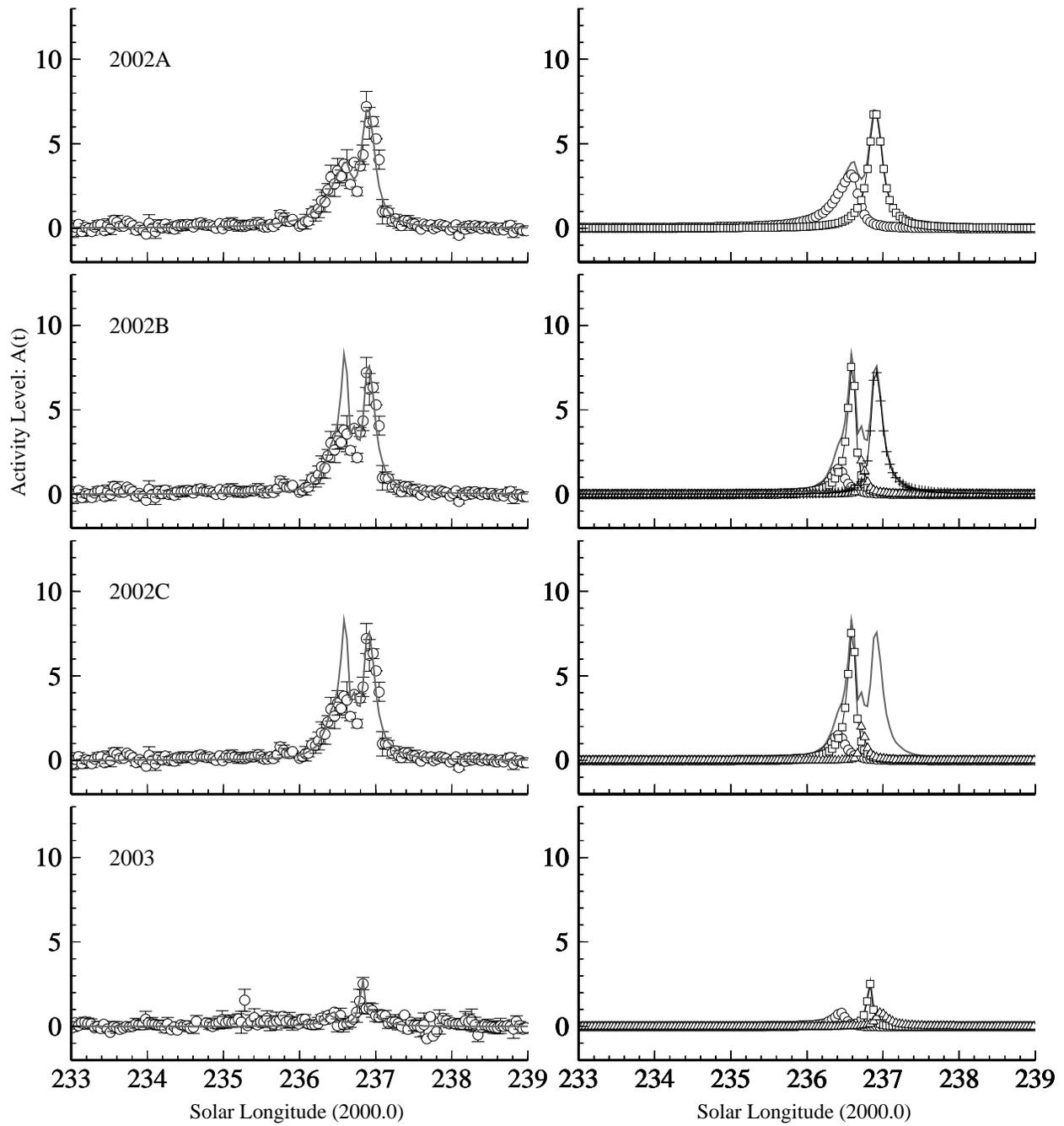


図 4: Lorentz 曲線を用いたしし座流星群の構造 (2002 年 ~ 2003 年)

		Trail 1	Trail 2	Trail 3	Trail 4	Trail 5
1999	Time(UT)	Nov. 17 10 ^h 00 ^m	Nov. 17 16 ^h 30 ^m	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	Nov. 18 07 ^h 30 ^m	Nov. 18 15 ^h 00 ^m
A	A_{max}	2.5	1.2	11.0	3.0	3.2
	FWHM(hr)	-2.0/+1.0	-3.0/+2.5	-1.0/+1.5	-0.5/+2.0	-1.2/+2.5
1999	Time(UT)	Nov. 17 10 ^h 00 ^m	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	Nov. 18 12 ^h 30 ^m		
B	A_{max}	2.0	10.5	3.0		
	FWHM(hr)	-3.0/+4.0	-1.0/+2.0	±5.0		
2000	Time(UT)	Nov. 17 09 ^h	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	Nov. 18 07 ^h 15 ^m		
	A_{max}	1.0	5.0	3.5		
	FWHM(hr)	±6.0	-2.0/+1.5	-1.0/+1.5		
2001	Time(UT)	Nov. 18 05 ^h 30 ^m	Nov. 18 10 ^h 45 ^m	Nov. 18 17 ^h 30 ^m	Nov. 18 23 ^h 30 ^m	
A	A_{max}	2.5	8.5	10.0	2.6	
	FWHM(hr)	-4.0/+1.0	-1.7/+1.0	-1.5/+3.4	-0.6/+2.5	
2001B	Time(UT)	Nov. 18 05 ^h 30 ^m	Nov. 18 10 ^h 45 ^m	Nov. 18 15 ^h	Nov. 18 17 ^h 30 ^m	Nov. 18 23 ^h 30 ^m
B	A_{max}	2.5	8.0	2.0	11.0	2.5
	FWHM(hr)	-1.5/+0.5	-1.2/+1.0	±12.0	-1.0/+2.0	-1.0/+1.5
2002	Time(UT)	Nov. 19 04 ^h 00 ^m	Nov. 19 11 ^h 30 ^m			
A	A_{max}	3.2	7.0			
	FWHM(hr)	-6.0/+2.0	±2.5			
2002	Time(UT)	Nov. 19 03 ^h 30 ^m	Nov. 19 03 ^h 45 ^m	Nov. 19 11 ^h 00 ^m		
B	A(t)	1.5	5.0	7.0		
	FWHM(hr)	-10.0/+6.0	-1.6/+0.6	-1.2/+2.5		
2002	Time(UT)	Nov. 18 23 ^h 30 ^m	Nov. 19 04 ^h 00 ^m	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	Nov. 19 11 ^h 00 ^m	
C	A(t)	1.5	8.0	2.0	7.5	
	FWHM(hr)	-3.0/+2.5	-2.0/+1.0	-0.5/+1.5	-1.5/+2.5	
2003	Time(UT)	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	Nov. 19 15 ^h 30 ^m	Nov. 19 18 ^h 30 ^m		
	A_{max}	0.8	2.5	0.8		
	FWHM(hr)	-3.0/+1.5	-1.2/+0.8	-1.5/+3.0		

表 2: 1999 年 ~ 2003 年しし座流星群活動を構成している各要素

Branch がやや長い。この他、第一極大前の 18 日 05^h30^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}01$) に $A_{max} = 2.5$ 、第二極大後の 18 日 23^h30^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}68$) に $A_{max} = 2.6$ のトレイルをそれぞれ見いだすことができる。ところが、先ほども述べたが、2001A のトレイルは全体的に半値幅が長い。特に第二極大はエコーが飽和していることから、半値幅を考えるともう少し A_{max} の値が大きければ半値幅が小さくなり、眼視観測結果とも結果が近くなる。従って、第二極大の A_{max} を半値幅から推測し、さらに、全体的に半値幅を押さえるために、幅広いトレイルを想定してフィッティングさせた結果が“2001B”である。2001B では、しし座流星群のバックグラウンド活動として、18 日 15 時台が極大となるように、半値幅 ± 12 時間という幅広いトレイルを敷く。これによって全体の活動の裾がうまくフィッティングする。そしてそれに加えて、Trail1,2,4,5 が活動しているとする。第一極大は $A_{max} = 8.0$ となり、半値幅もやや狭くなる。そして肝心の第二極大は、半値幅が $-1.0/+2.0$ とすると、 A_{max} は 11.0 なくては説明がつかない。従って、エコーの飽和によってカウント値が押さえられ、実際はカウント結果よりも高かったと推測ができる。この他、“2001A”で検出されている Trail1 や Trail4 も、“2001B”で同様に同時刻に検出されているが、半値幅がやや短くなっている。さて、2001A と 2001B のどちらが妥当かを考えると、他の論文などを参考にすると、さすがに半値半幅で 3 時間は見られないので、2001B のフィッティングが妥当であると考えられる。従って、2001 年はしし座流星群のバックグラウンド活動あるいは古いダストトレイルの活動に、FWHM が短いシャープなトレイルが存在したと考えられる。

2002 年の活動は全体的には明瞭なピークふたつきが存在していないため、フィッティングは比較的容易だと

思われる．“2002A”は結果に忠実にフィッティングさせた結果であり，19日04^h00^mにピークを迎える Trail1 と，19日11^h30^mにピークを迎える Trail2 でフィッティングすることができてしまう．ところが，大きな問題として，FWHM が非常に大きな数値となってしまう．Trail1 の FWHM は， $-6.0/+2.0$ ，Trail2 は ± 2.5 と，非常に広い．加えて，19日4時頃はエコーが飽和しているため，Activity Level の値は低く抑えられている可能性があり，半値幅からするとともに値が高い可能性がある．19日4時のピーク前と後には比較的幅広い活動が観測されていることから，“2002B”では，比較的広めな活動をもつトレイルを想定した．2001B のように，しし座流星群のバックグラウンド活動を 2002B の Trail3 として示した．19日03^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}59$) に $A_{max} = 1.5$ で FWHM = $-10.0/+6.0$ となっている．このバックグラウンド活動を背景として，19日03^h45^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}60$) に $A_{max} = 5.0$ ，FWHM = $-1.6/+0.6$ の Trail1 と，19日11^h00^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}90$) に $A_{max} = 7.0$ ，FWHM = $-1.2/+2.5$ の Trail2 とが活動している．半値幅も 2002A に比べると眼視観測結果に近づき，2002A よりも 2002B の方が良いフィッティング結果といえそうである．ところで，2002B での Trail3 は，裾の広い活動ではなく，活動を細かくわけることもできる．それが 2002C である．19日04^h00^m のピークの前の 18日23^h30^m に極大を迎える Trail1 によって，活動が始まり，ピーク後は Trail3 が活動を引き継ぐような形となっている．こちらも比較的きれいな結果となるが，2002B のようにバックグラウンド的な活動があると考えた方が自然な感じもするのが事実で，2002B が現時点では最も妥当なフィッティングであると言える．

2003 年の活動の主体は，Trail2 によって生み出されている．Trail2 は，19日15^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}83$) に $A_{max} = 2.5$ ，FWHM = $-1.2/+0.8$ の極大を迎えている．そしてこの前後に FWHM がやや広めの Trail1 と Trail3 が検出されるが，Activity Level の値は低く，とても活発なトレイルがあるとは言い難い．フィッティングそのものはよい結果となっている．

5.2 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 3 に示す．

1998 年はエコーの飽和している時間が長かったことと，データ不足のため，フィッティング作業が困難であった．従って今回は 1999 年以降しかフィッティング作業は行っていない．表 3 には 1998 年のみ，極大時刻を示している．1999 年以降は，すべてトレイルを示し，フィッティングパターンがいくつもある場合は，前章で一番妥当と示したフィッティングパターンを参照している．トレイル No. は，R99T1 であれば，1999 年の電波観測から検出された Trail1(表 2 より) という意味である．

1998 年について，17日2時付近に観測されている極大は，ロングエコーの多発であるが，McNaught-Asher は 1333 年という古いダストトレイルによってもたらされたとしている．ただし，極大時刻などのデータが現在手元にないため，実際どのくらいの時間にどのくらいの規模で起こったのかはわからない．またこの年は共鳴の効果も加わってより一層明るい流星が豊富であったことが考えられる．18日04時台の極大は 1866 年，18日6時台は 1833 年生成のダストトレイルの極大時刻と近くなっていることがわかる．活動レベルもはっきりしており，予報と結果とが良く一致している．ただし，1932 年トレイルはダストトレイルとの距離が $+0.0055\text{AU}$ と遠かったため Activity Level の値はあまり上昇していないため，このトレイルに相当する極大があったのかどうかはいささか不明瞭なところがある．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，メインピークを構成した R99T2 が 1932 年や 1899 年トレイルと良い一致を示している．特に 1899 年トレイルは，地球との距離が 0.0007AU とかなり接近したため，R99T2 は 1899 年トレイルに相当する可能性が高い．他の R99T1 や R99T3 は現段階では似た傾向となる予報は発表されていない．ひとつの解釈としては，半値幅が非常に大きいことから，しし座流星群のバックグラウンド的な活動であることも考えられる．

2000 年は，見事に観測から検出された，R00T1，R00T2，R00T3 がそれぞれ 1932，1733，1866 年生成ダストトレイルに該当すると言える．若干時間が離れているものもあるが，R00T3 などは 1866 年生成のダストトレイルと見事な一致といえる．

2001 年について，まず，1767 年生成のダストトレイルに相当するのは R01T2 である．極大時刻と 1 時間近い差があるが，Lyytinen et al. (2001) では，このトレイルは 18日10^h28^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}133$) に遭遇し，

Year	Estimated Trails by Radio Meteor Observation					Predictions by McNaught and Asher		
	Trail No.	Time (UT)	λ_{\odot}	$A(t)$	FWHM(hr)	Time (UT)	λ_{\odot}	Dust Trail
1998	-	Nov. 17 02 ^h	234°55	15.5	-	-	-	1333
	-	Nov. 17 19 ^h	235°27	1.23 ± 0.02	-	Nov. 17 19 ^h 34 ^m	235°27	1932
	-	Nov. 18 04 ^h	235°64	3.14 ± 0.04	-	Nov. 18 04 ^h 08 ^m	235°63	1866
	-	Nov. 18 06 ^h	235°73	3.78 ± 0.20	-	Nov. 18 07 ^h 56 ^m	235°79	1833
						Nov. 18 09 ^h 22 ^m	235°85	1799
1999B	R99T1	Nov. 17 10 ^h 00 ^m	234°62	2.0	-3.0/+4.0			
	R99T2	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	235°31	11.0	-1.0/+1.5	Nov. 18 01 ^h 43 ^m	235°27	1932
						Nov. 18 02 ^h 07 ^m	235°29	1899
	R99T3	Nov. 18 12 ^h 30 ^m	235°73	3.0	±5.0			
					Nov. 18 19 ^h 59 ^m	236°04	1866	
2000	R00T1	Nov. 17 09 ^h	235°3	1.0	±6.0	Nov. 17 07 ^h 53 ^m	235°27	1932
	R00T2	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	236°05	5.0	-2.0/+1.5	Nov. 18 03 ^h 44 ^m	236°10	1733
	R00T3	Nov. 18 07 ^h 15 ^m	236°25	3.5	-1.0/+1.5	Nov. 18 07 ^h 51 ^m	236°28	1866
2001B	R01T1	Nov. 18 05 ^h 30 ^m	236°01	2.5	-1.5/+0.5			
	R01T2	Nov. 18 10 ^h 45 ^m	236°14	8.0	-1.2/+1.0	Nov. 18 09 ^h 55 ^m	236°11	1767
	R01T3	Nov. 18 15 ^h	236°3	2.0	±12.0			
	R01T4	Nov. 18 17 ^h 30 ^m	236°43	11.0	-1.0/+2.0	Nov. 18 17 ^h 24 ^m	236°42	1699
						Nov. 18 18 ^h 13 ^m	236°46	1866
	R01T5	Nov. 18 23 ^h 30 ^m	236°68	2.5	-1.0/+1.5			
2002B	R02T1	Nov. 19 03 ^h 30 ^m	236°59	1.5	-10.0/+6.0			
	R02T2	Nov. 19 03 ^h 45 ^m	236°60	5.0	-1.6/+0.6	Nov. 19 03 ^h 56 ^m	236°61	1767
	R02T3	Nov. 19 11 ^h 00 ^m	236°90	7.0	-1.2/+2.5	Nov. 19 10 ^h 34 ^m	236°89	1866
2003	R03T1	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	236°45	0.8	-3.0/+1.5	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	236°45	1533
	R03T2	Nov. 19 15 ^h 30 ^m	236°83	2.5	-1.2/+0.8	Nov. 19 16 ^h 50 ^m	236°89	1733
	R03T3	Nov. 19 18 ^h 30 ^m	236°96	0.8	-1.5/+3.0	Nov. 20 00 ^h 50 ^m	237°22	1333

表 3: 電波で観測された極大と McNaught-Asher の予報との比較

FWHM = $-53min/+62min$ と予想されていることから, R01T2 は, すばらしい一致といえる. 次に R01T4 のトレイルだが, 18 日 17^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}43$) に極大が観測されているが, 前述の通り飽和しているため, この時刻は参考程度である. 予想では 1699 年と 1866 年のダストトレイルが連続的に遭遇することになっており, R01T4 のトレイルはこれらふたつの集合体と言えそうである. ただし, R01T4 のトレイルをふたつに分離するのは不可能に近い. R01T4 のトレイルの活動規模は, 半値幅から $A_{max} = 11.0$ と推測されており, 結果的には 1999 年の R99T2 と同じ活動レベルであったことが伺える. この他この年は, R01T1 トレイルが R01T2 トレイルの極大前に活動している. このトレイルは今のところ予報で該当するものがないが, 18 日 05^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}01$) に極大を迎えている. そして, 18 日 23^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}68$) で極大を迎える R01T5 トレイルも予報は出ていない. これは Ogawa and Uchiyama (2001) でもピークが存在が指摘されており, Ogawa et al.(2002) では, 日本国内の電波観測結果より, 18 日 21^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}639$) に FWHM = $-45min/+40min$ のピークが検出されている. ただし規模はわからない. よってこの R01T5 トレイルはこれと同様であると考えられる. さて, Lyytinen et al. (2001) では, 1599 年や 1633 年といった古いダストトレイルが 18 日 19^h10^m 頃に極大を迎えると予想された. そこで R01T5 トレイルがこのトレイルに該当するかどうかを考えるが, Lyytinen et al. (2001) では, これらの古いトレイルは幅広い活動を持っており, FWHM が 280 分より長いと予想している. 従って, FWHM = $-1.0/+1.5$ という R01T5 トレイルとはあまり似ておらず, 結果としてはこれらの古いトレイルではないと考えられる. 最後に, R01T3 トレイルについてだが, このトレイルは FWHM = ± 12.0 という幅広い活動を持っている. もちろんこれに該当するダストトレイルは予想されていないが, しし座流星群のバックグ

ラウンド的活動であるかもしくは古いダストトレイルによる活動である可能性がある。古いダストトレイルはあまり計算されていないことから、このような活動が、しし座流星群のバックグラウンド活動かどうか興味深いところである。

2002 年は、プロファイル B を採用したため、R02T2 と R02T3 はそれぞれ 1767 年、1866 年生成のダストトレイルと近い一致を示し、R02T1 トレイルは特に該当するものはない。R02T1 トレイルは、2001 年の R01T3 トレイルと同様に幅広い活動を供給しており、これが古いダストトレイルによるものなのか、それともしし座流星群のバックグラウンド活動なのか興味深いところである。さて、R02T2 トレイルは、予想された極大よりもやや早い結果ではあるが、Vaubaillon (2002) や、Lyytinen et al. (2002) などとも比較的近い結果となっている。Vaubaillon (2002) では 1767 年のトレイルは、19 日 04^h04^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}613$)、FWHM= 2 と予想され、Lyytinen et al. (2002) では 19 日 04^h03^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}612$)、FWHM= 1.76 と予想されている。R02T2 トレイルは、19 日 03^h45^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}60$)、FWHM= -1.6/ + 0.6 と予報よりやや極大が早くやや半値幅が広いが、比較的良い一致となった。時刻の不一致はやはりエコーの飽和によるものだと考えられる。次に R02T3 トレイルは、1866 年生成のダストトレイルと近い一致を示している。予想された半値幅は、Vaubaillon (2002) では 3 時間、Lyytinen et al. (2002) では 2.03 時間と比較的長い。実際は -1.2/ + 2.5 時間と、極大後の減少時間がゆっくりとしているが、ほぼ予想通りの結果となった。極大時刻も、Vaubaillon (2002) では、19 日 10^h47^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}895$)、Lyytinen et al. (2002) では 19 日 10^h40^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}890$)、McNaught-Asher は 19 日 10^h34^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}89$) と、予想より若干遅めの結果となった。ただしこれは IMO の眼視観測結果と同傾向であり、1866 年生成のダストトレイルによる極大そのものが実際はもう少し遅かった可能性が考えられる。注目されるヨーロッパとアメリカピークとどちらの方が活動度が高かったかということであるが、全体のプロファイルとしてはほぼ同等だが、R02T2 トレイルと R02T3 トレイルとを比べると、R02T3 トレイルの方が規模としては大きい活動であったという結果になっている。従って、明るい流星はヨーロッパ方面で多かったが、流量そのものはアメリカピークの方が多かった可能性が高い。ただし、R02T2 トレイルの極大は半値幅から推測されているため、不確定な要素ではある。

2003 年は、1733 年生成のダストトレイルによる活動が R03T2 トレイルとして 19 日 15^h30^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}83$) 明確に観測されている。ただしこのダストトレイルは McNaught-Asher によると、19 日 16^h50^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}89$) と予想されているが、Lyytinen らによると、19 日 0^h25^m($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}197$) と予想されており、R03T2 トレイルが 1733 年生成のダストトレイルかどうかは確定することができない。ただ、活動レベルとしては比較的高く、はっきりとした極大であることは間違いない。この他、1533 年生成のダストトレイルと思われる活動が、R03T1 トレイルに見られるが、Activity Level の値が低く、しし座流星群のバックグラウンド活動の一部かもしれない。また、R03T3 トレイルには該当するダストトレイルは今のところ特に見受けられない。半値幅は比較的広く、Activity Level の値も低いのが特徴的である。

6 他の主要流星群における経年変化

6.1 しぶんぎ座流星群

しし座流星群の経年変化を調べたように、他の流星群においても調べてみた。まずはしぶんぎ座流星群である。集計方法はしし座流星群と同様である。2001 年から 2004 年までのデータを解析し、その結果を図 5 に示す。図中には求められた Activity Level の値と、その結果から Lorentz 曲線でフィッティングさせた結果を示している。2002 年においては、極大期のデータがあまりそろっていないので推定でプロファイルを決めている。これらのプロファイルの各要素を表 4 に示す。

2001 年から 2004 年まで 3 つから 4 つのトレイルで構成されていることが分かる。また、バックグラウンド活動のような比較的幅広い活動が存在していることも分かる。しぶんぎ座流星群は鋭い極大というイメージがつきまわっているが、Activity Level の値が高いトレイルでも比較的その半値幅は長いことが見て取れる。

2004 年は前年に比べて活動が活発であったのは、トレイル Q04T4 と半値幅が広い Q04T3 がうまく重なったためである。トレイル毎に比較すると、2003 年は Q03T2 と同じ活動レベルであるため、決して大量のダストをもたらすトレイルがぶつかったわけではないこともわかる。2002 年は Q02T2 や Q02T3 トレイルの Activity

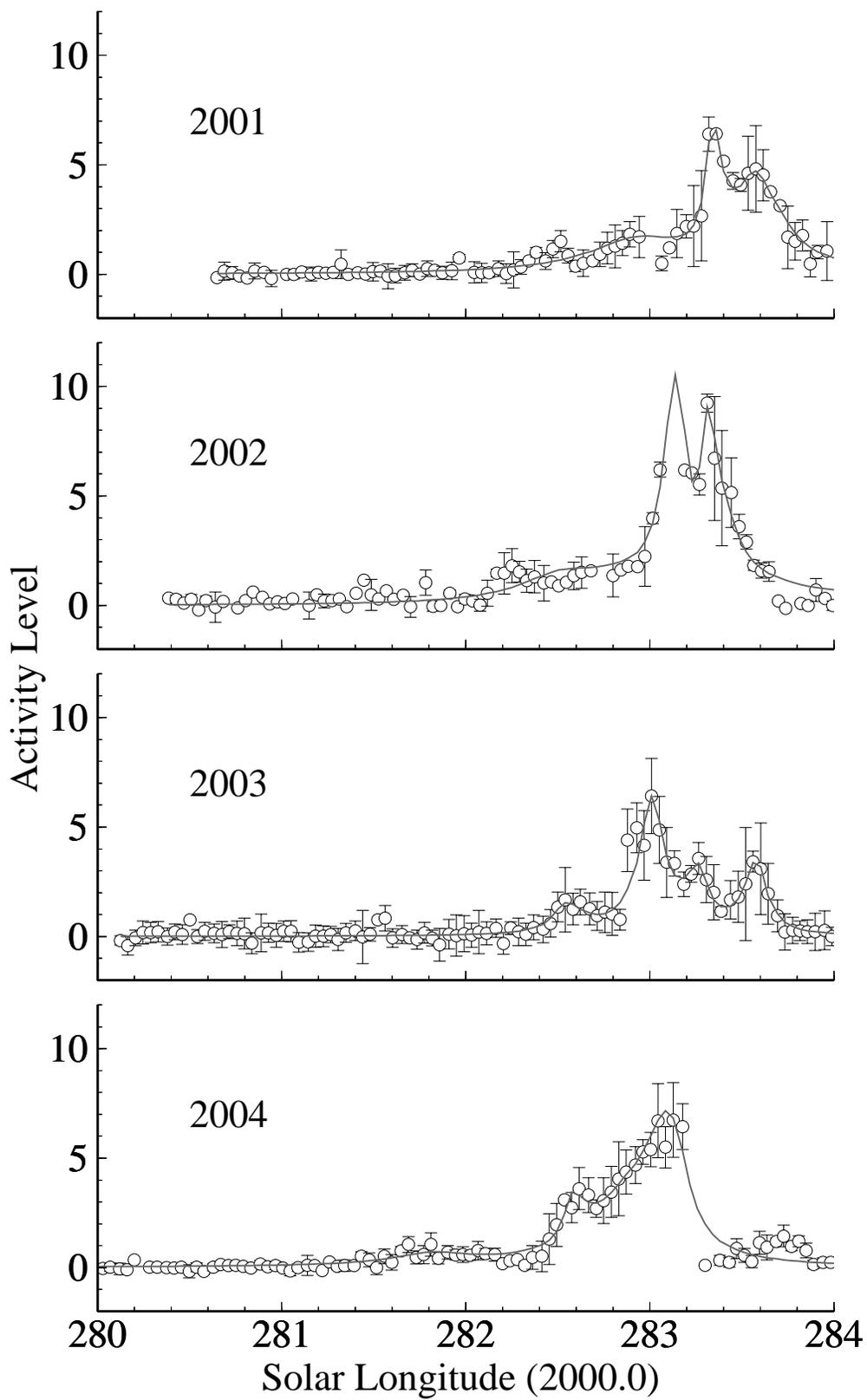


図 5: しぶんぎ座流星群経年変化 2001 年 ~ 2004 年 : 曲線は Lorentz 曲線フィッティング結果

Year	Trail No.	Time (UT)	λ_{\odot}	A_{max}	FWHM(hr)
2001	Q01T1	Jan. 03 06 ^h 30 ^m	282°94	1.5	-8.0/+8.0
	Q01T2	Jan. 03 16 ^h 00 ^m	283°35	5.5	-1.1/+1.5
	Q01T3	Jan. 03 21 ^h 30 ^m	283°58	4.0	-3.0/+4.0
2002	Q02T1	Jan. 03 03 ^h 30 ^m	282°55	1.5	-7.0/+24.0
	Q02T2	Jan. 03 17 ^h 30 ^m	283°15	9.0?	-1.8/+1.5
	Q02T3	Jan. 03 21 ^h 30 ^m	283°32	7.0	-1.0/+2.5
2003	Q03T1	Jan. 03 09 ^h 30 ^m	282°55	1.3	-2.0/+3.0
	Q03T2	Jan. 03 20 ^h 30 ^m	283°01	6.0	-2.0/+2.0
	Q03T3	Jan. 04 02 ^h 30 ^m	283°27	2.5	-2.0/+1.5
	Q03T4	Jan. 04 10 ^h 00 ^m	283°59	3.3	-2.0/+1.5
2004	Q04T1	Jan. 02 22 ^h 30 ^m	281°82	0.5	-6.0/+6.0
	Q04T2	Jan. 03 16 ^h 30 ^m	282°58	2.0	-1.2/+2.0
	Q04T3	Jan. 03 23 ^h 30 ^m	282°88	2.0	-6.0/+6.0
	Q04T4	Jan. 04 05 ^h 00 ^m	283°11	6.0	-4.0/+2.5

表 4: 2001 年 ~ 2004 年におけるしぶんぎ座流星群の各トレイル成分

Level の値がかなり大きく出ているが、データが不足していることから、参考程度として見て頂きたい。

ここ数年間の経年変化を見てみると、合計された全活動の極大レベルには差が生じているが、各成文に分けてトレイル毎にみると、そこまで大きな変化はないことが分かる。従って、ここ数年間のしぶんぎ座流星群の活動はほぼ横ばいであるといえる。ただし、これまで持っていたイメージよりも半値幅が広いので、今後の追跡解析などに期待が寄せられる。

6.2 ペルセウス座流星群

ペルセウス座流星群についても同様に 2001 年以降の経年変化を調べてみた。Lorentz 曲線にフィッティングしたのが図 6 で、各要素を表 5 に示した。

図 6 ならびに表 5 より、各ピークならびにトレイル要素が日本の観測時間帯で主に観測されていることが分か

Year	Trail No.	Time (UT)	λ_{\odot}	A_{max}	FWHM(hr)
2001	P01T1	Aug. 12 16 ^h 30 ^m	140°01	2.0	-1.0/+2.5
	P01T2	Aug. 12 22 ^h 30 ^m	140°25	1.0	-1.5/+3.0
	P01T3	Aug. 13 15 ^h 30 ^m	140°93	2.0	-1.0/+5.0
2002	P01T1	Aug. 12 19 ^h 30 ^m	139°88	2.0	-3.0/+3.5
	P01T2	Aug. 13 21 ^h 30 ^m	140°92	1.0	±3.0
2003	P01T1	Aug. 12 18 ^h 30 ^m	139°60	1.0	-4.0/+2.0
	P01T2	Aug. 12 23 ^h 30 ^m	139°80	2.0	-2.0/+1.5
	P01T3	Aug. 13 18 ^h 30 ^m	140°56	1.0	-2.0/+4.0

表 5: 2001 年 ~ 2003 年におけるペルセウス座流星群の各トレイル成分

る。これが真か否かはかなり問題であるが、今後世界のデータを増やすことによってこれらの問題は解決されるであろう。また、すべてに共通することは、ペルセウス座流星群の場合、Activity Level の値が全く上昇しないということである。算出式において、バックグラウンドの定義が難しいこともひとつの要因ではあるが、ペルセウス座流星群の対地速度が速いこともこれに効いてきているものと考えられる。

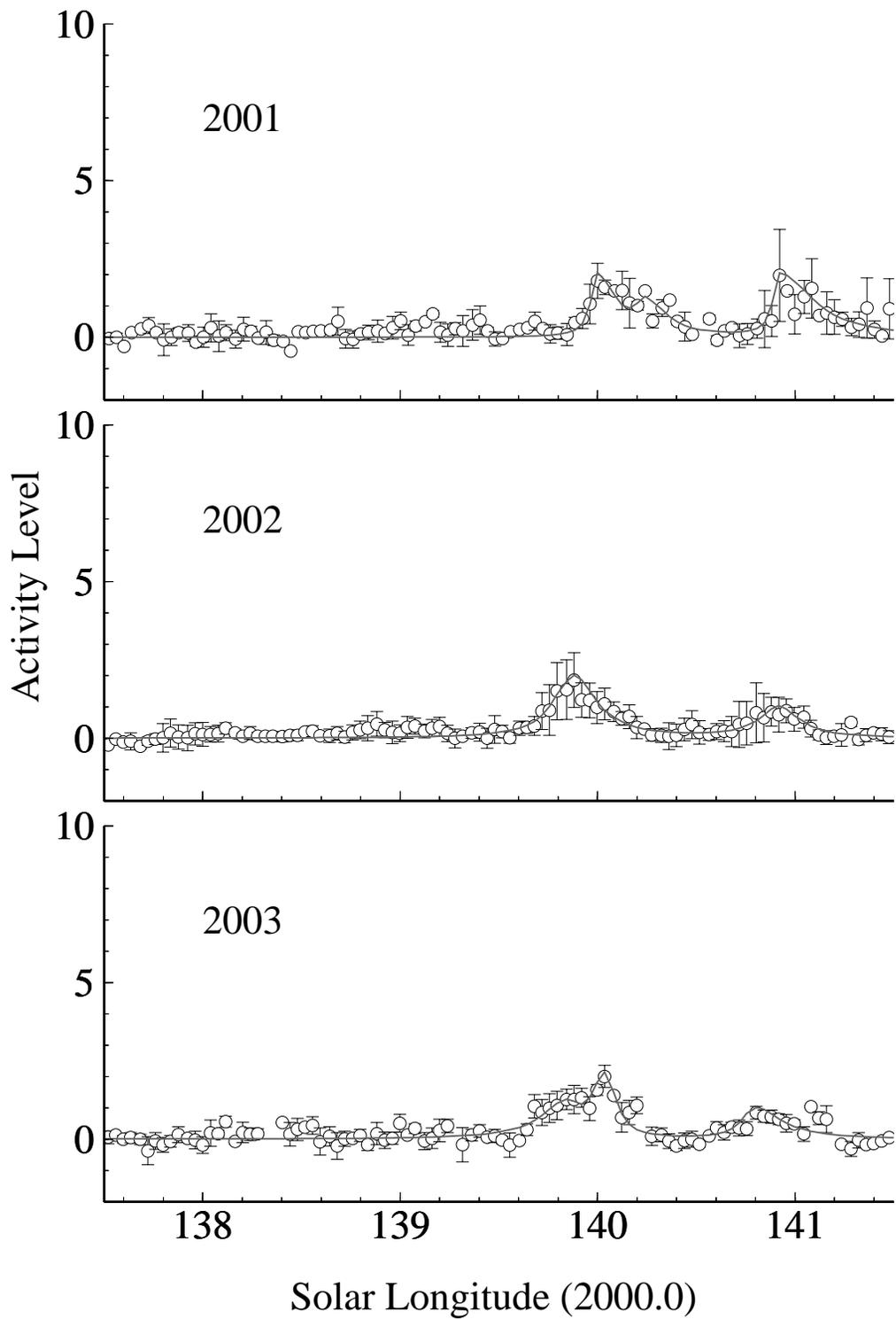


図 6: ペルセウス座流星群経年変化 2001 年 ~ 2003 年 : 曲線は Lorentz 曲線フィッティング結果

6.3 ふたご座流星群

ふたご座流星群でも試みたが、天頂効果が非常に効いてきているため、Activity Level の値の統合が非常に難しい。今後データ数を増やして輻射点高度の制限を 50 度以下などに下げるか、あるいは日本など中緯度のデータを除くなどの処置をしないと、正しいふたご座流星群の活動評価が困難であると思われる。今回はそれ故、フィッティング作業をしての経年変化解析は行っていない。

7 Activity Level と眼視観測 ZHR との関係

7.1 関連を見るための方法

今回は、1999 年～ 2002 年までのしし座流星群、2001 年～ 2003 年までのしぶんぎ座流星群、そして 2001 年と 2002 年のペルセウス座流星群において、眼視で報告されている ZHR(Zenithal Hourly Rate) と、流星電波観測の解析で使用されている Activity Level との関連性を議論する。

まずは、IMO ならびに NMS による ZHR に該当する Activity Level の値を引き出し、分布図を作成、最小二乗法によって線形近似する。

7.2 しし座流星群において

しし座流星群において、1999 年から 2003 年までの ZHR と Activity Level との分布図を図 7 に示す。続い

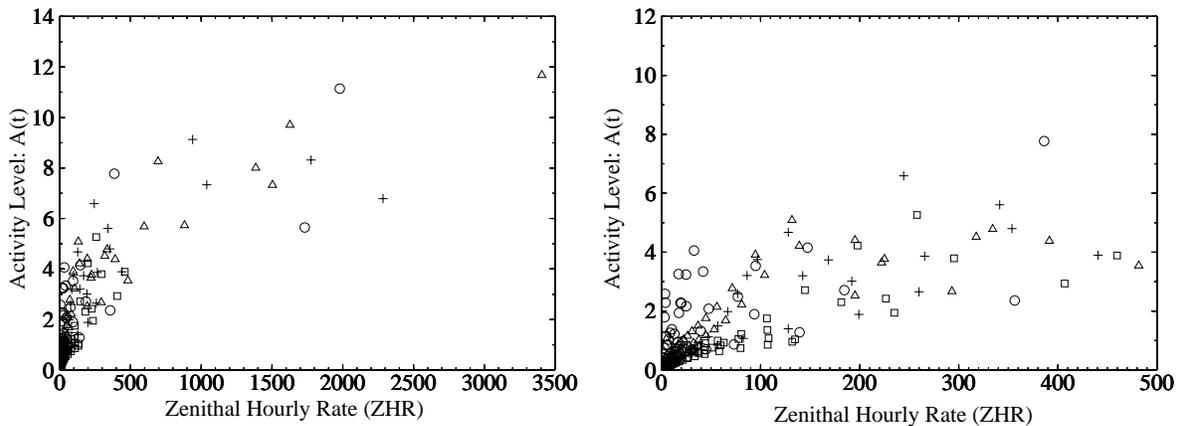


図 7: 1999 年～ 2003 年しし座流星群における ZHR と Activity Level との関係 (右図は ZHR500 以下を拡大):
1999 年: ○, 2000 年: □, 2001 年: △, 2002 年: +

て、図 7 より、最小二乗法を用いて線形近似すると図 8 のようになる。その線形近似された直線は次の式で表される。

$$A(t)_{Leo} = 0.024 \times ZHR(t) \quad (ZHR \leq 162) \quad (5)$$

$$A(t)_{Leo} = 0.003 \times ZHR(t) + 3.405 \quad (ZHR > 162) \quad (6)$$

ZHR162 が境界となっているが、この数値は Activity Level の値に換算すると 3.9 に相当する。従って、Activity Level の値が 3.9 以下の場合には式 (5) を用いて、それより大きい場合は、式 (6) を使用することとなる。ただ、この数値に何の意味があるのかは今のところよくわからない。ただ、この境界を 4.0 とすると実はうまくいかない。また、このように傾きが変化するのは、おそらくしし座流星群で ZHR500 ともなると飽和する可能性が

高くなるからであろう．1998 年は ZHR357 であったにもかかわらず長時間にわたって観測画像が飽和してしまっている．かなりロングエコーの量などの依存されるところもあるが，しし座流星群では比較的毎年同じ値を取っている．

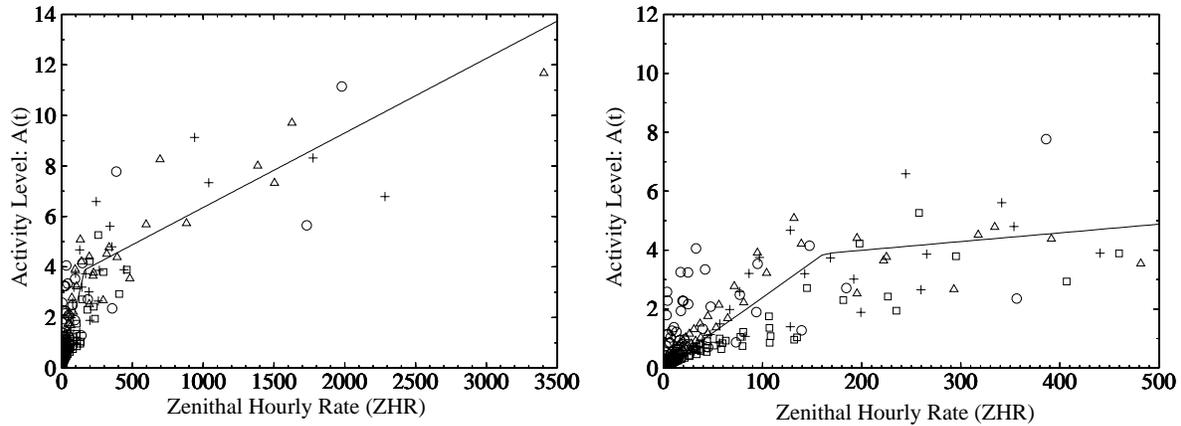


図 8: 図 7 における分布図の最小二乗法による線形近似

7.3 しぶんぎ座流星群において

2001 年～2003 年のしぶんぎ座流星群においても同じように，関係を調べた．その結果の図が図 9 である．図の中でふたつの近似曲線が描かれている．ひとつはしし座流星群の時と同じ線形近似である．ただし，この

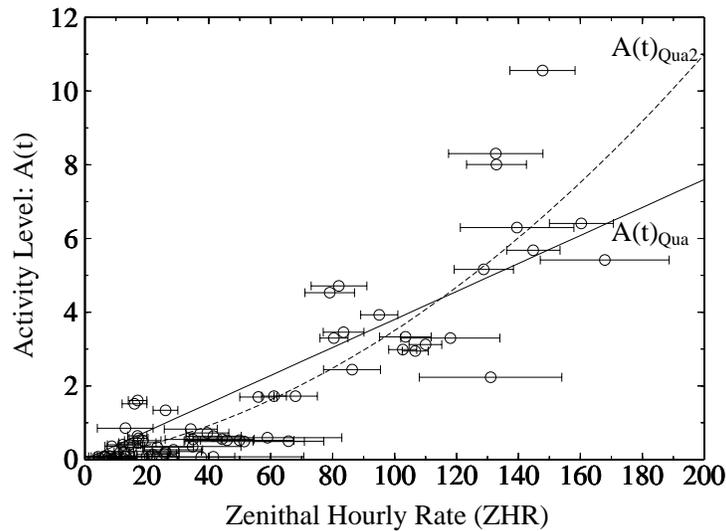


図 9: 2001 年～2003 年しぶんぎ座流星群における ZHR と Activity Level との関係

近似では，ZHR が小さいときと大きいときでばらつきが大きかったので，二次関数でフィッティングさせた．すると比較的よく合う．それらふたつは以下の式 (7)，(8) で示される．

$$A(t)_{Qua} = 0.038 \times ZHR(t) \quad (7)$$

$$A(t)_{Qua2} = 0.0002 \times ZHR(t)^2 + 0.015 \times ZHR(t) \quad (8)$$

近似としては $A(t)_{Qua2}$ の方がよい結果となっている。

7.4 ペルセウス座流星群において

最後にペルセウス座流星群においても同じように、ZHR と Activity Level との関連を調べた。ただし、眼視も電波もデータ数が不足していることから、あまり良好な結果は得られていない。一応、仮結果として以下の式 (9) のように線形近似をすることができる。

$$A(t)_{Per} = 0.028 \times ZHR(t) \quad (\text{preliminary}) \quad (9)$$

このように一応求められるが、あくまで参考として扱って頂きたい。

7.5 全流星群の ZHR と Activity Level との関係

ここまで求めてきた線形近似をひとつのグラフにしたものが図 10 である。図 10 より、対地速度が遅い流星

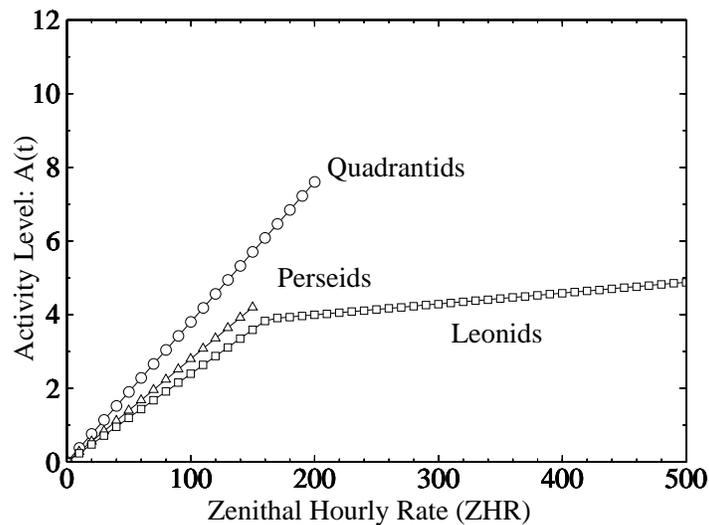


図 10: しし座流星群、しぶんぎ座流星群、ペルセウス座流星群 (仮) における線形近似結果

群の方が急な勾配となっていることが分かる。これは関係あるのかわからないが現時点では断定ができないが、対地速度が速い流星群は流星電波観測にとって受信しにくい。これがハイトシーリングである。やぎ座流星群やみずがめ座 δ 流星群がペルセウス座流星群に匹敵するようなエコー数を記録することは有名である。これらの対地速度はペルセウス座流星群に比べるとかなり遅い。従って、この傾きは対地速度による違いを指し示している可能性がある。

7.6 これらの関係を用いた 2003 年しし座流星群と 2004 年しぶんぎ座流星群の ZHR 推定

それでは、式 (5) ~ 式 (8) を用いて、2003 年しし座流星群と 2004 年しぶんぎ座流星群における ZHR を Activity Level の値から推定する。図 11 と図 12 にそれぞれ 2003 年しし座流星群と 2004 年しぶんぎ座流星群における推定結果を掲載する。ここで、Activity Level から導かれた ZHR を ZHR_R とし、実際に IMO が発表しているデータを ZHR_V とする。図 11 より、 ZHR_R の最大値は 19 日 15^h30^m ($\lambda_{\odot} = 236.83$) に $ZHR_R = 105.9$

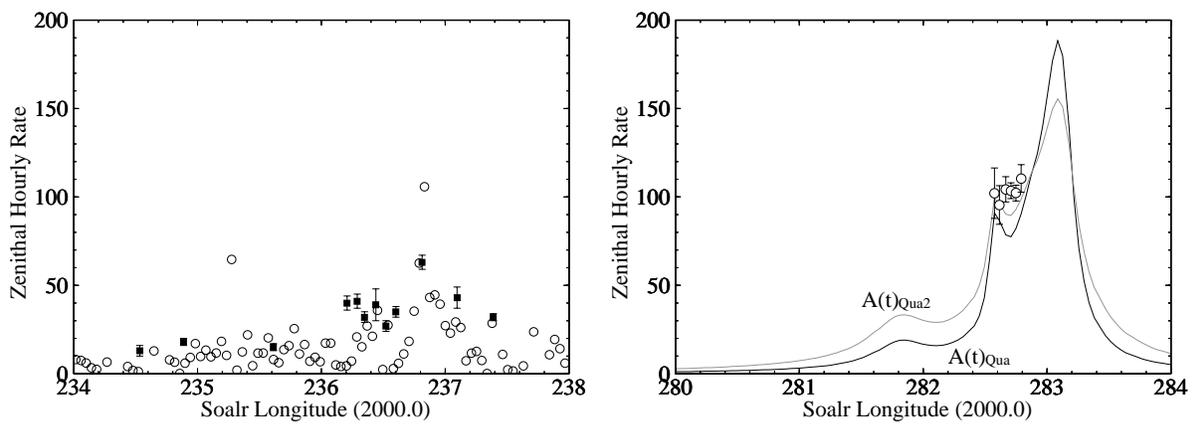


図 11: 左: 2003 年しし座流星群における ZHR の推定結果 (\square : ZHR_R , \circ : ZHR_V)
 図 12: 右: 2004 年しぶんぎ座流星群における ZHR の推定結果 (\circ : NMS による ZHR_V)

と見積もられる．実際の結果は IMO によると，19 日 15^h07^m に $ZHR_V = 63 \pm 4$ となっている．この値の食い違いの原因はおそらく日本ではまだ輻射点高度が 20 度付近なので，電波観測地点の補正が過修正になったことも考えられる．そのためかその後は $ZHR_R 40 \sim 60$ で落ち着いている．これと他の結果からまずまずの一致といえる．

さて一方，2004 年しぶんぎ座流星群については，図 12 より，断片的な眼視データしかないが， ZHR_R はなかなか良い傾向を示している．ここで，式 (7)，(8) の二パターンを比べたところ，結果的にはやはり，式 (8) の方が近い結果となった．式 (7) では， ZHR_R の最大値が 4 日 04^h30^m ($\lambda_{\odot} = 283^{\circ}09$) に， $ZHR_R = 190$ と見積もられる．一方，式 (8) からは， $ZHR_R = 150$ ほどとなる．断片的な眼視データではあるが， $\lambda_{\odot} = 282^{\circ}6 - 282^{\circ}8$ 付近で ZHR_V という結果がある．同時間帯に，式 (7) では， $ZHR_R = 60 - 70$ であるが，式 (8) では $ZHR_R = 90 - 100$ となる．近似については特に線形近似にこだわる必要性はどこにもないので，より適切な近似を行って，ZHR を推定できるようさらなる研究が必要である．

本章では，Activity Level から ZHR へ変換する方法を研究・紹介した．これまで，電波で観測されてきたデータは ZHR にもならないという事で，活動の相対的な面しか見えていなかったが，今後この研究が進めば，流星電波観測から ZHR を求める時が近づくであろう．同時に，使用周波数や反射領域，観測機器の校正なども視野に入れて考えなければならない．

8 まとめ

今回は多岐にわたって研究報告をしたが，流星電波観測も，サイト数が増加したことによって，できることが増えてきたことは確実である．流星電波観測の流星天文学的地位を向上させるためにも，今後さらなる研究が必要であるといえる．流星電波観測の生き残りをかけて，次なるステップを踏んでいければと思う．本研究に際し，流星電波観測国際プロジェクトならびに Radio Meteor Observation Bulletin のデータを大量に使用させて頂いた．観測者の皆様方に深く感謝の意を表したい．

参考文献

- [1] Alrt R. and Brown P. (1998) “Bulletin 14 of the International Leonid Watch: Visual Results and Modelling of the 1998 Leonids”, *WGN*, **27:6**, 267-285.

- [2] Alrt R., Bellot Rubio L., Brown P. and Gyssens M. (1999) “Bulletin 15 of the International Leonid Watch: First Global Analysis of the 1999 Leonid Storm”, *WGN*, **27:6**, 286-295.
- [3] Alrt R. and Gyssens M. (2000) “Bulletin 16 of the International Leonid Watch: Results of the 2000 Leonid Meteor Shower”, *WGN* **28:6**, 195-208.
- [4] Arlt R., Kac J., Krumov V., Buchmann A. and Verbert J. (2001) “Bulletin 17 of the International Leonid Watch: First Global Analysis of the 2001 Leonid Storms”, *WGN* **29:6**, 187-194.
- [5] Arlt R., Krumov V., Buchmann A., Kac J. and Verbert J. (2002) “Bulletin 18 of the International Leonid Watch: Preliminary Analysis of the 2002 Leonid Meteor Shower”, *WGN* **30:6**, 205-212.
- [6] Jenniskens P., Crawford C., Butow S.J., Nugent D., Koop M., Holman D., Houston J., Jobse K., Kronk G. and Beatty K. (2000) “Lorentz Shaped Comet Dust Trail Cross Section from New Hybrid Visual and Video Meteor Counting Technique Implications for Future Leonid Storm Encounters”, *Earth, Moon and Planets*, **82-83**, 191-208.
- [7] Lyytinen E., Nissinen M. and Van Flandern T. (2001) “Improved 2001 Leonid Storm Predictions from a Refined Model”, *WGN*, **29:4**, 110-118.
- [8] Lyytinen E., Van Frandern T. and Nissinen M. (2002) “Leonid Predictions for the Year 2002” , <http://www.ursa.fi/ursa/jaostot/meterit/leoeng02.html>.
- [9] Maegawa, K. (1999) “HRO: A new forward-scatter observation method using a Ham-band beacon”, *WGN* **27**, 64-72
- [10] McNaught R. H. and Asher D. J. (1999) “Leonid Dust Trails and Meteor Storms”, *WGN*, **27:2**, 85-102.
- [11] McNaught R. H. and Asher D. J. (2001) “The 2001 Leonids and Dust Trail Radiants”, *WGN*, **29:5**, 156-164.
- [12] McNaught R. H. and Asher D. J. (2002) “Leonid Dust Trail Structure and Predictions for 2002”, *WGN*, **30:5**, 132-143.
- [13] Miyao, K., Ogawa, H. (2003) “Research for the Characteristics of Meteor Shower from Multi-Frequency Radio Observation”, *International Meteor Conference 2003*
- [14] 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
- [15] Ogawa H., Toyomasu S., Ohnishi K. and Maegawa K. (2002a) “The Leonid 2001 Project by Radio Meteor Observations”, *WGN*, **30:4**, 105-109.
- [16] 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
- [17] Ogawa H., and Uchiyama S. (2001) “The 2001 Leonids Meteor Storm over Japan”, *WGN*, **29:6**, 206-213.
- [18] Suzuki, K. (1976) “Recording Meteor Echoes by FM Radio”, *Sky and Telescope* **51**, 359-362
- [19] Usui, T., Ogawa, H., Hashimoto, T., Ohnishi, K., Yaguchi, N., Maegawa, K. (2002) “The 2002 Leonids Using 28 MHz Ham-band Radio Observations (HRO) over Japan”, *WGN*, **30**, 212-217
- [20] Vaubaillon J. (2002) “Activity Level Prediction for the 2002 Leonids”, *WGN*, **30:5**, 144-148
- [21] Vaubaillon J., Lyytinen E., Nissinen M. and Asher D. J. (2003) “The 2003 Leonid Shower From Different Approaches”, *WGN*, **31:5**, 131-134.