

流星電波観測のさらなる有用性を目指して (Season2)

小川 宏 (日本流星研究会 *h-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、アマチュアの間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(HROFFT)や専用受信機(ITEC HRO-RX1a)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)、多周波数観測(Miyao 2003)などに大きな成果をもたらしてきている。その後も干渉計(大川 2006 他)や観測機材間の補正の試み(中島他 2006)、複数地点受信時同定率の測定(臼居 2006)、流星電波観測で観測できる反射領域の計算(Utsumi 2002 他)、HROFFT自動計測の試み(埜口 2006)など、2005年以降も着実にその進化を遂げている。

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。

本誌では、これまでの研究された内容から、特に主要流星群における経年変化を調べ、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たい。また、日々の流星活動モニターとしての有用性について、毎月、日本各地から寄せられる流星電波観測データを用いて検証、流星活動の完全監視の実用性を問う。また、多周波数解析結果や、反射領域のこれまでの成果についても紹介したい。

この研究は、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(小川 2004)の続編、Season2である。

2 Activity Level Index

2.1 定義

流星電波観測から、流星群の活動を見る手段はこれまでいくつもの方法が試みられてきた。

最もシンプルな方法は、解析対象期間の流星数から、通常の日周変化で観測される流星数を差し引く方法である。これによって、観測地から通常値を引けるので、流星数の増加分が検出できる。この方法は計算上も楽であり、安定した観測が行えている観測地点では有効性が高い。ところが、この方法の大きな欠点は、その結果は1地点のデータでしかないということである。つまり、このサイトで、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。従って、流星群の突発出現や極大時刻決定には、多くの観測データを統計的に処理する必要がある。さらに、日本では観測できなくても世界のどこかで観測できている可能性もあるため、全世界の流星電波観測データを統合する必要がある。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各地点の日周変化と観測数との差分数値を単純に平均化する事はできない。

そこで、世界のデータを統合する際は、相対値「Activity Level: $A(t)$ 」を採用することが多い。この方式は、2001年に思案され(Ogawa et al. 2001)、その後も試行錯誤が行われ、以下の式(1)、(2)による方法が、現在も流星電波観測国際プロジェクト(小川 2001a)においては使用されている。

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

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(t)_i \pm \sigma(t) \quad (2)$$

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。この $H_0(t)$ と D_0 とを導くために、 $H_0(t)$ については、ある時間 t について、前2週間の中央値(MEDIAN)を採用し、 D_0 については、 $H_0(0) \sim H_0(24)$ の平均値を使用している。従って、 $A(t)$ を求めるには、前2週間のデータが重要となってくる。中央値を採用した理由は、異常値が発生した際、平均値を採用すると、全体がそちらへ引っ張られるため、それを避ける意図がある。なお、異常値については、2.3章でその除去方法を説明する。

この結果、あるサイト i で観測された流星活動が、活動レベルという相対値 $A(t)_i$ で導かれる。そして、あとは式(2)より全サイトのある時間 t における、流星活動度 $A(t)$ が導かれる。この時の標準偏差を $\sigma(t)$ とする。

ここで、流星群の活動解析の際には、 H_0 について、サンプルとなるデータは、流星群活動期間の前後1週間の合計2週間分を使用している。これは、上記の解析方法では、流星群活動期間のデータが通常値のサンプルに入ってくるため、2.3章から異常値として除去される可能性は高いが、サンプルに残ると、流星活動後の値がマイナス寄りとなるため、流星群活動解析という目的の際は、サンプル期間を前後とし、極大日を挟んで前後数日間をサンプルに加えないで解析を行う。また、2.2章に示す輻射点高度の考慮も、流星群活動を解析する際には実施する。その他、ふたご座流星群では別の考慮をしているが、これは該当章で個別に説明する。

2.2 流星群解析時考慮事項1：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、各地点の $A(t)_i$ に対する補正は、式(3)となる。この補正された $A(t)_i$ について、式(2)を用いて流星群における活動度として算出する。

$$A(t)_i = \frac{H(t)_i - H_0(t)_i}{D_0}_i \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (3)$$

眼視観測同様、この補正は、輻射点高度が低い場合、補正値が大きくなり、過補正の可能性が高くなってデータの信頼性が落ちてしまう。従って、扱うデータとして、輻射点高度が20度以下の場合には、その地点のデー

タを採用しないこととする．また，流星電波観測の特性上，輻射点が天頂近くに達すると，観測される流星数が減少する現象が起きる（天頂効果：詳細は後章参照）．この効果は輻射点高度が 70 度を越えたあたりから顕著となる．従って，輻射点高度が 70 度を越えた場合も，同様にデータを採用しないこととする．このことから，流星群解析時には，式 (3) の補正を行うが， θ の範囲は， $20^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ とする．

2.3 流星群解析時考慮事項 2：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．また，流星群活動期間がある場合も同様である．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，2001 年以降の 2 月，3 月及び 9 月の期間について各地の存在する観測データから Activity Level を求め，ヒストグラムで表示したものである．海外も含め集計してある．

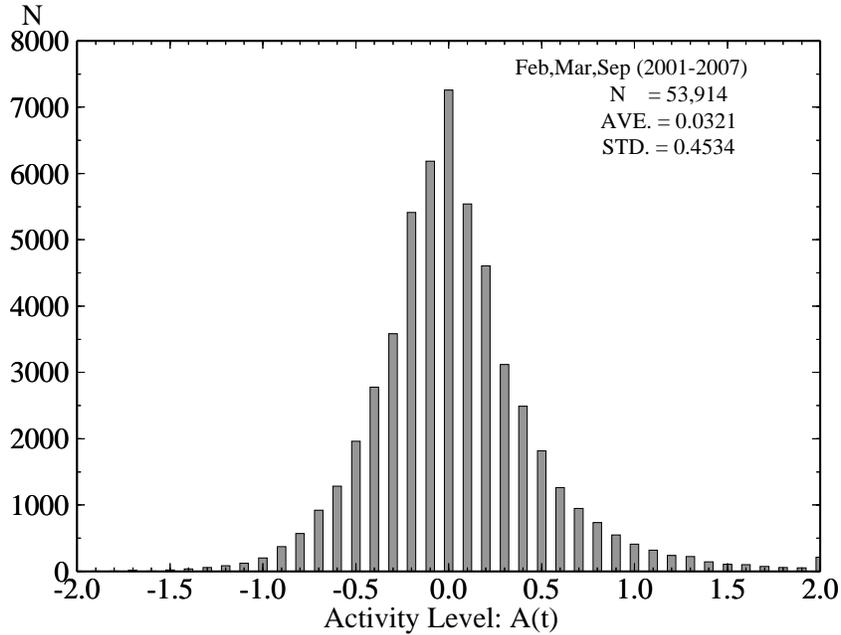


図 1: 非流星群活動期における全サイトの Activity Level のヒストグラム

全データである 53,914 データから求められる平均値と標準偏差は， 0.0321 ± 0.4534 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: $A(t)_i$ が通常値かどうかは，以下の式 (4) で判別することにする．

$$A(t) - n\sigma(t) \leq A(t)_i \leq A(t) + n\sigma(t) \quad (4)$$

この条件式で，範囲内におさまっている $A(t)_i$ が正常値と見なされ，再度，式 (1) または式 (3) から，(2) によって計算され，最終的な時間 t における Activity Level: $A(t)$ を求めるとする．この数値がある時間帯における流星群の活動レベルを示す指標として使用する．

さて問題は，式 (4) 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，全体の約 76%，41,018 データが正常値となる．データ数が少ないときに弊害がでる可能性はあるが， $n = 0.75(3/4\sigma)$ では，毎月のデータ解析にはサンプルが少なくなりすぎるので，それはそれで問題である．従って，通常時（流星群活動解析ではない時）については， $n = 1$ つまり $\pm\sigma$ の範囲内を正常値とする．

一方，流星群活動解析時は，サンプル数そのものが多く集まることから，精度をあげるため， $n = 0.75(3/4\sigma)$ を正常範囲とする．

3 流星群経年変化の解析

3.1 しし座流星群

3.1.1 観測結果

1999年と2002年にヨーロッパで、2001年に日本を含むアジアで大出現を見せたしし座流星群の経年変化を解析した。この解析のために、1998年から2006年までの世界の観測データを用いた。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日を含む)までとしている。

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 (McNaught and Asher 1999)、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、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かもしれない。また、表1には、流星群のピークが観測された時刻を示してある。

Year	Time (UT)	λ_{\odot}^{**}	Activity Level	Year	Time (UT)	λ_{\odot}^{**}	Activity Level
1998	Nov. 17 02 ^h	234°549	15.5*	2003	Nov. 19 06 ^h	236°454	0.86 ± 0.10
	Nov. 17 19 ^h	235°265	1.23 ± 0.02		Nov. 19 15 ^h	236°832	2.54 ± 0.35
	Nov. 18 04 ^h	235°638	3.14 ± 0.04	2004	Nov. 17 21 ^h	235°798	1.13 ± 0.23
	Nov. 18 06 ^h	235°729	3.78 ± 0.20		Nov. 19 12 ^h	237°463	1.20 ± 0.25
1999	Nov. 17 08 ^h	234°545	2.36 ± 1.28		Nov. 18 01 ^h	235°707	0.57 ± 0.42
	Nov. 18 02 ^h	235°301	10.81 ± 0.39	2006	Nov. 19 05 ^h	236°617	1.15 ± 0.50
	Nov. 18 15 ^h	235°846	3.31 ± 1.63				
	Nov. 18 18 ^h	235°977	1.98 ± 0.50				
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				
2001	Nov. 18 05 ^h	235°915	4.62 ± 1.02				
	Nov. 18 10 ^h	236°167	8.66 ± 1.67				
	Nov. 18 17 ^h	236°419	9.73 ± 1.61*				
	Nov. 18 23 ^h	236°672	5.03 ± 0.88				
2002	Nov. 19 04 ^h	236°631	3.96 ± 2.12*				
	Nov. 19 11 ^h	236°925	6.19 ± 0.64				

* 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～2006 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きばらつき、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、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

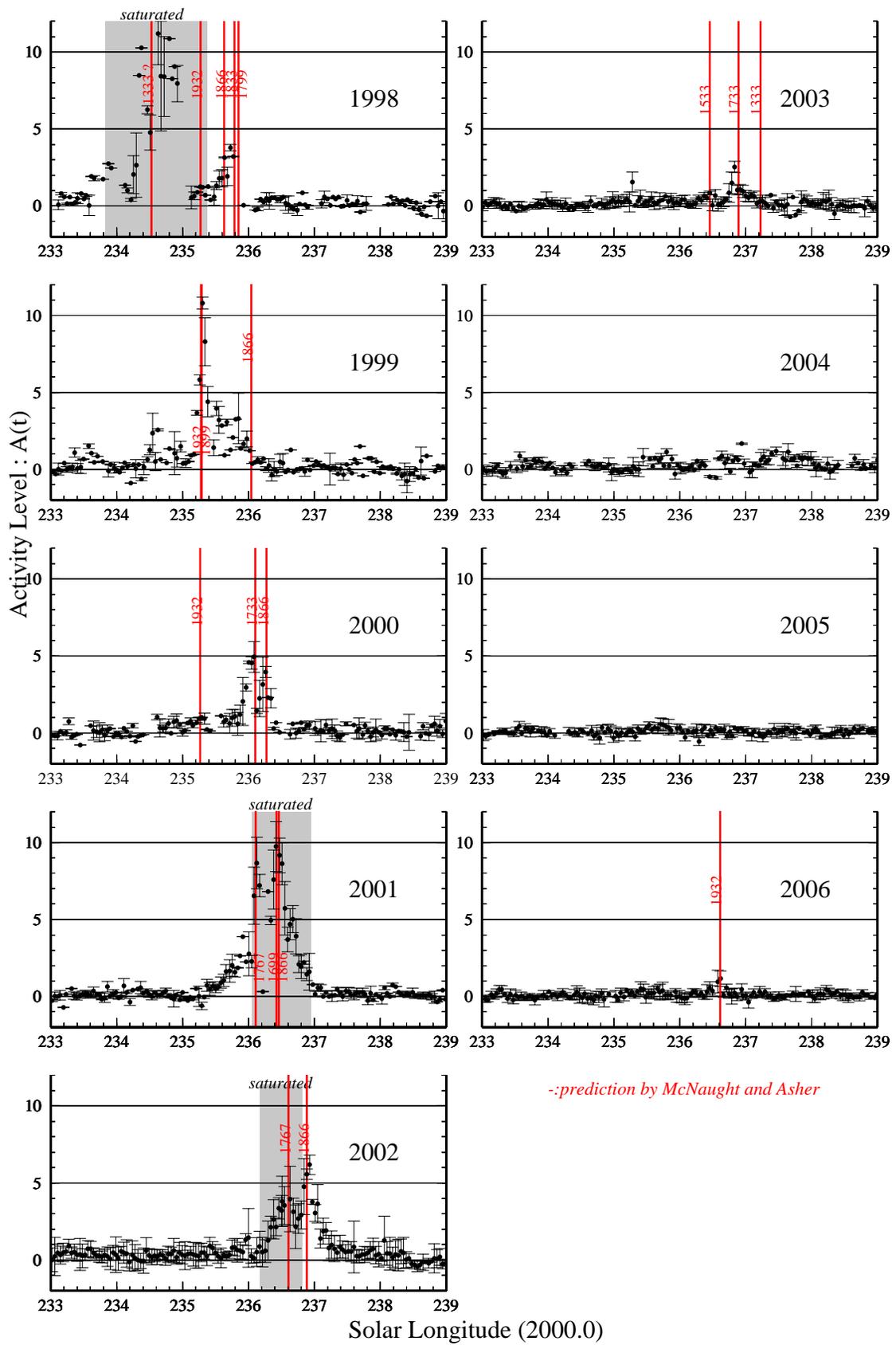


図 2: しし座流星群経年変化 1998 年 ~ 2006 年

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 の値には不確実性が残る。1998 年とは異なり、2001 年は日本で飽和状態となった。日本の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。

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。2004 年も $A(t) = 1$ 付近の活動は見せているが、活動レベルは高くなく、活発な活動として捕らえることは難しい。また、2005 年も同様の傾向が続き、 $A(t)$ も 1 を割っているので、通常レベルが図 1 より 0.03 ± 0.45 であること、そして誤差範囲から考えると、ほぼ通常値となってしまっていることがわかる。2006 年には、19 日 5 時台 ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}617$) 付近で $A(t) = 1.15$ となっているが、エラーバーも ± 0.5 あるので、何とも言いえないが、極大として観測されている。

3.1.2 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。

$$A(T) = \frac{A_{max} W_h^2}{(T - T_{max})^2 + W_h^2} \quad (5)$$

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、 $2W_h$ が半値幅 (FWHM) である。

式 (5) を用いて、1999 年～2006 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。その結果を表 2 に示し、グラフを図 3 及び図 4 に示す。なお、1998 年は、データ数が少なかったことと、飽和していた時間帯が長かったことから今回は割愛する。ただし、表 2 には、予報と比較するためにも、観測された極大のみ記載しておく。トレイル No. は、L99T1 であれば、1999 年の電波観測から検出された Trail1 という意味である。

なお、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。

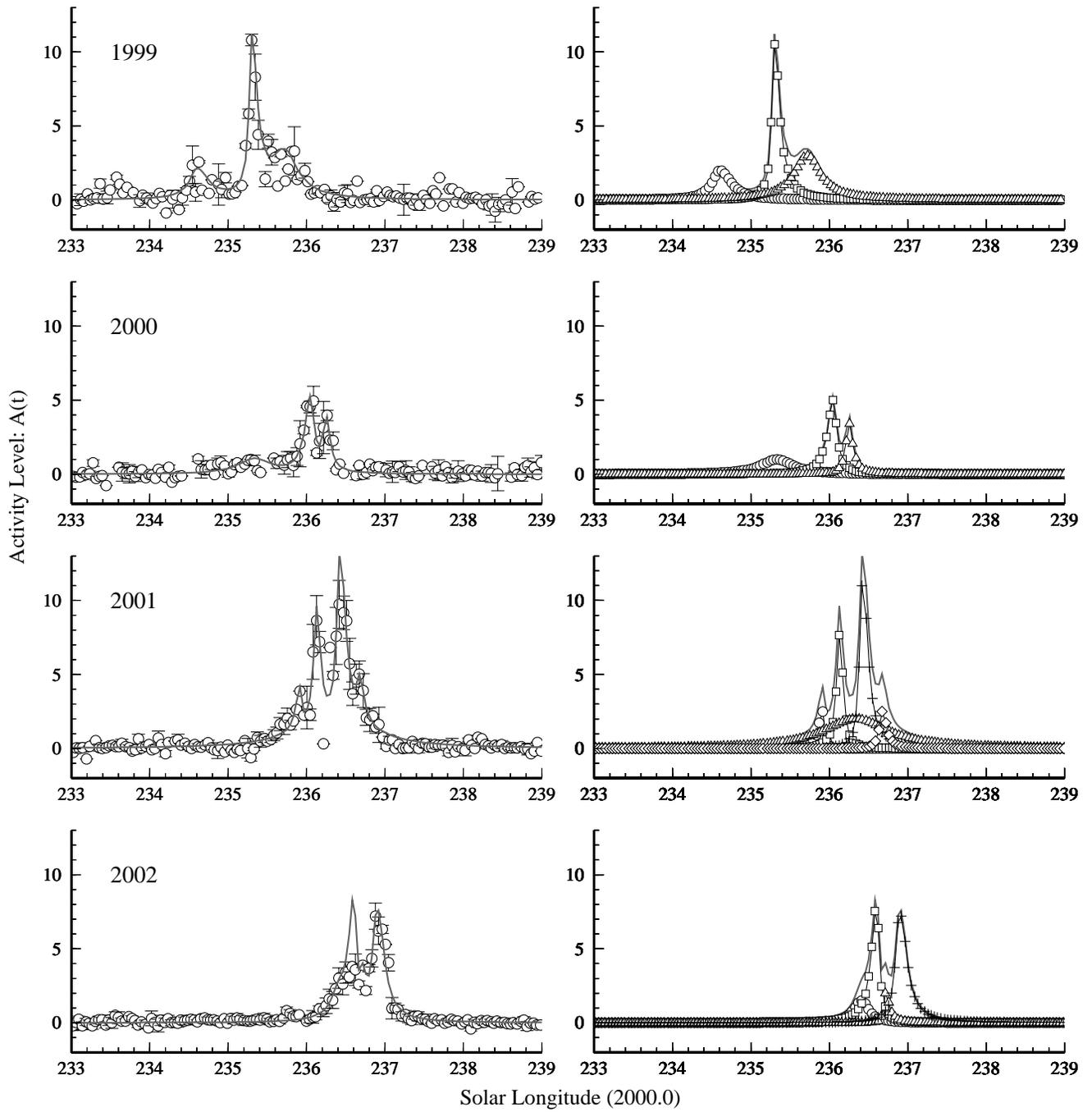


図 3: しし座流星群経年変化 1999 年 ~ 2002 年

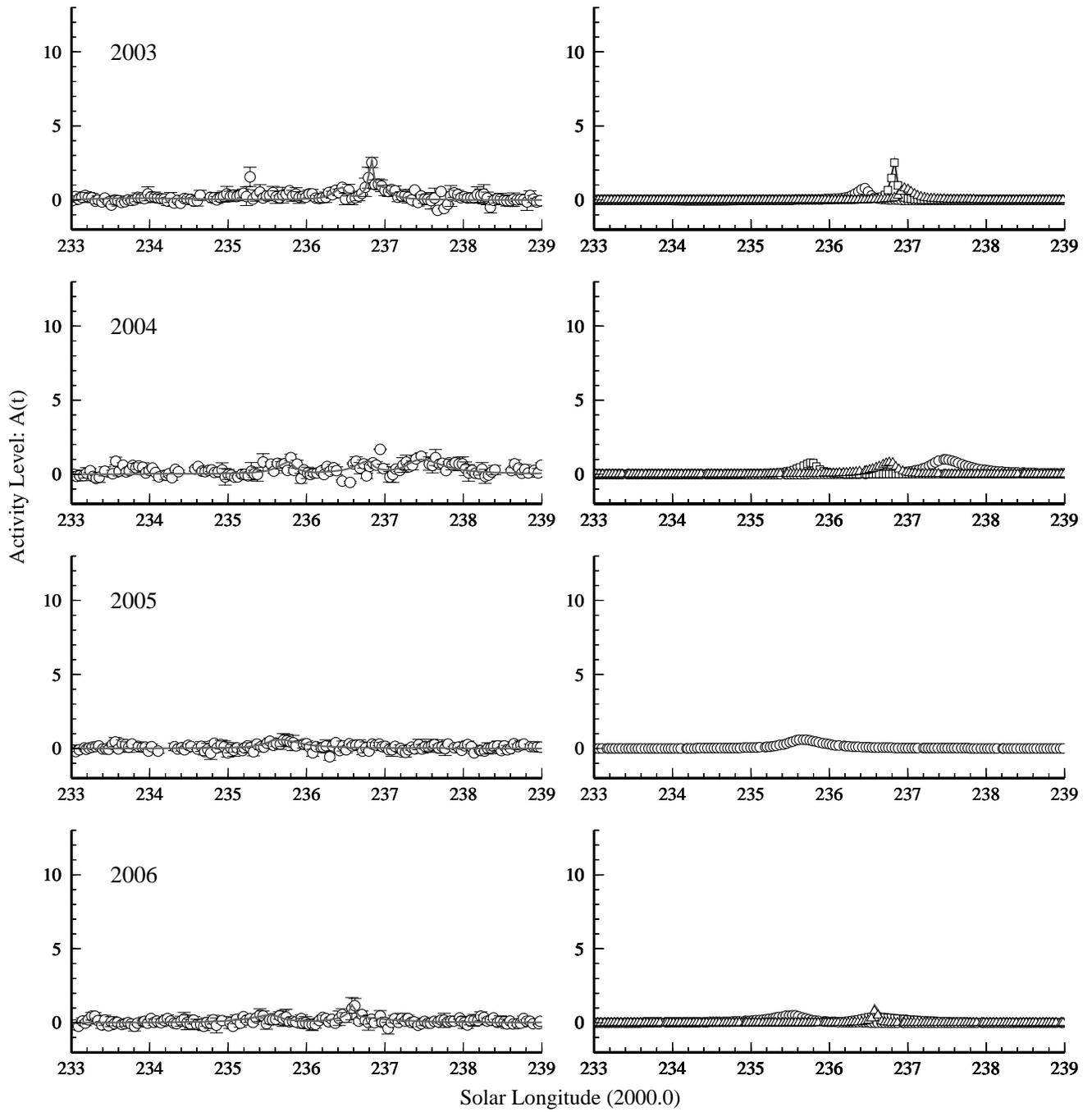


図 4: しし座流星群経年変化 2003 年 ~ 2006 年

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
1999	L99T1	Nov. 17 10 ^h 00 ^m	234°62	2.0	-3.0/+4.0			
	L99T2	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
	L99T3	Nov. 18 12 ^h 30 ^m	235°73	3.0	±5.0			
					Nov. 18 19 ^h 59 ^m	236°04	1866	
2000	L00T1	Nov. 17 09 ^h	235°3	1.0	±6.0	Nov. 17 07 ^h 53 ^m	235°27	1932
	L00T2	Nov. 18 02 ^h 30 ^m	236°05	5.0	-2.0/+1.5	Nov. 18 03 ^h 44 ^m	236°10	1733
	L00T3	Nov. 18 07 ^h 15 ^m	236°25	3.5	-1.0/+1.5	Nov. 18 07 ^h 51 ^m	236°28	1866
2001	L01T1	Nov. 18 05 ^h 30 ^m	236°01	2.5	-1.5/+0.5			
	L01T2	Nov. 18 10 ^h 45 ^m	236°14	8.0	-1.2/+1.0	Nov. 18 09 ^h 55 ^m	236°11	1767
	L01T3	Nov. 18 15 ^h	236°3	2.0	±12.0			
	L01T4	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
	L01T5	Nov. 18 23 ^h 30 ^m	236°68	2.5	-1.0/+1.5			
2002	L02T1	Nov. 19 03 ^h 30 ^m	236°59	1.5	-10.0/+6.0			
	L02T2	Nov. 19 03 ^h 45 ^m	236°60	5.0	-1.6/+0.6	Nov. 19 03 ^h 56 ^m	236°61	1767
	L02T3	Nov. 19 11 ^h 00 ^m	236°90	7.0	-1.2/+2.5	Nov. 19 10 ^h 34 ^m	236°89	1866
2003	L03T1	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	236°45	0.8	-3.0/+1.5	Nov. 19 06 ^h 30 ^m	236°45	1533
	L03T2	Nov. 19 15 ^h 30 ^m	236°83	2.5	-1.2/+0.8	Nov. 19 16 ^h 50 ^m	236°89	1733
	L03T3	Nov. 19 18 ^h 30 ^m	236°96	0.8	-1.5/+3.0	Nov. 20 00 ^h 50 ^m	237°22	1333
2004	L04T1	Nov. 17 21 ^h 00 ^m	235°80	0.8	-4.0/+2.0			
	L04T2	Nov. 18 21 ^h 00 ^m	236°81	0.8	-5.0/+2.0			
	L04T3	Nov. 19 13 ^h 00 ^m	237°48	1.0	-5.0/+8.0			
2005	L05T1	Nov. 18 00 ^h 00 ^m	235°67	0.6	-5.0/+8.0			
2006	L06T1	Nov. 18 04 ^h 00 ^m	235°57	0.5	-8.0/+4.0			
	L06T2	Nov. 19 04 ^h 00 ^m	236°58	0.4	-5.0/+12.0			
	L06T3	Nov. 19 05 ^h 00 ^m	236°63	1.0	-1.0/+0.5	Nov. 19 04 ^h 45 ^m	236°61	1932

表 2: 電波で観測された極大と McNaught-Asher の予報との比較

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 L99T2 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、L99T2 は 1899 年トレイルに相当する可能性が高い。他の L99T1 や L99T3 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、L00T1, L00T2, L00T3 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、L00T3 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 L01T2 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 $10^{\text{h}}28^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}133)$ に遭遇し、 $\text{FWHM} = -53\text{min}/+62\text{min}$ と予想されていることから、L01T2 は、すばらしい一致といえる。次に L01T4 のトレイルだが、18 日 $17^{\text{h}}30^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}43)$ 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、L01T4 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、L01T4 のトレイルをふたつに分離するのは不可能に近い。L01T4 のトレイルの活動規模は、半値幅から $A_{\text{max}} = 11.0$ と推測されており、結果的には 1999 年の L99T2 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、L01T1 トレイルが L01T2 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 $05^{\text{h}}30^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}01)$ に極大を迎えている。そして、18 日 $23^{\text{h}}30^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}68)$ で極大を迎える L01T5 トレイルも予報は出ていない。これは Ogawa and Uchiyama (2001) でもピークの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 $21^{\text{h}}30^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}639)$ に $\text{FWHM} = -45\text{min}/+40\text{min}$ のピークが検出されている。よってこの L01T5 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 $19^{\text{h}}10^{\text{m}}$ 頃に極大を迎えると予想された。そこで L01T5 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、 $\text{FWHM} = -1.0/+1.5$ という L01T5 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、L01T3 トレイルについてだが、このトレイルは $\text{FWHM} = \pm 12.0$ 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、L02T2 と L02T3 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、L02T1 トレイルは特に該当するものはない。L02T1 トレイルは、2001 年の L01T3 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、L02T2 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、Vaubailon (2002) や、Lyytinen et al. (2002) などとも比較的近い結果となっている。Vaubailon (2002) では 1767 年のトレイルは、19 日 $04^{\text{h}}04^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}613)$ 、 $\text{FWHM} = 2$ と予想され、Lyytinen et al. (2002) では 19 日 $04^{\text{h}}03^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}612)$ 、 $\text{FWHM} = 1.76$ と予想されている。L02T2 トレイルは、19 日 $03^{\text{h}}45^{\text{m}}(\lambda_{\odot} = 236^{\circ}60)$ 、 $\text{FWHM} = -1.6/+0.6$ 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 L02T3 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、L02T2 トレイルと L02T3 トレイルとを比べると、L02T3 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、L02T2 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 L03T2 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、L03T2 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、L03T1 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、L03T3 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。

2004 年は、L04T1 ~ L04T3 まで 3 種類のトレイル成分で構成されていることとなるが、McNaught and Asher(1999) では、特に予報はされていない。Vaubaillon et al.(2004) によると、19 日 21^h49^m に 1733 年のトレイルが遭遇すると計算しており、少し前の 6^h42^m にも 1333 年のトレイル遭遇が計算されている。いずれも ZHR の値は大きくはない。この事を考えると、L04T3 が最も近い値とはなるが、予想された時間帯とは少し違う。

2005 年は、ほとんど通常レベルに近い活動しか見られず、しし座流星群の出現そのものを検出するのも難しい。 $A(max) = 0.6$ と値も小さく、半値幅も広い。以前からの通常ピーク時刻 (母彗星の降交点通過時刻) は、17 日 14 時 ($\lambda_{\odot} = 235^{\circ}27$) であるため、この値とも離れており、活動のどこに極大があったのか判断は難しい。

2006 年は、McNaught and Asher らが予報した最後の年にあたった。1932 年のトレイルが、19 日 4^h45^m と予報されたが、観測からは、L06T3 として、19 日 05^h00^m ($\lambda_{\odot} = 236^{\circ}63$) に $A(max) = 1.0$ で観測されている。グラフからは明瞭に突出しているが、表 1 からわかるように、誤差範囲が大きいのはいささか気になる。それ以外の L06T1 及び L06T2 については、活動レベルそのものが低いのに加え、半値幅も広いため、明瞭な活動とは言えなさそうだ。

1998 年から 2006 年まで、多くの観測データからここまで経年変化を追跡することができたことは、大きな成果といえる。2004 年以降は、活動レベルそのものが低く、誤差範囲等を考えるとデータの信頼性がどこまであるかはわからないが、細かな変動も何らかの活動の意味あつてのことかもしれないため、記録として残し、今後も活動がどのようになるか追いつける必要がある。

3.2 しぶんぎ座流星群

3.2.1 観測結果

三大流星群の一つ「しぶんぎ座流星群」は、年始の流星観測を楽しませてくれる流星群だ。流星電波観測においても同様、鋭いピークと豊富な流星エコー数は、観測しがいのあるものだ。一方で極大が短いことから、輻射点が沈んだ状態でピークを迎える年は、その数が減ってしまうのも実情だ。さて、今回は 2001 年から 2007 年までのデータを解析し、観測結果としては、表 3 の通りとなった。

毎年、安定した活動を見せており、 $A(max) = 5 \sim 6$ で推移している。個別に観測地点を見ると、 $A(max)_i = 10$ を超える地点もある。特に 2002 年は活発な活動を捕らえた年である。また、ピークを複数回迎えていることも特徴的である。3.2.2 章でも言及するが、しぶんぎ座流星群と言えば極大が鋭く、短時間で終わるというイメージが強いが、表 3 のように、極大を何度も観測できる活動であったことは、とても興味深い結果である。

Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level	Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level
2001	Jan. 3 15 ^h	283°320	6.40 ± 0.79	2005	Jan. 3 13 ^h	283°213	5.96 ± 0.34
	Jan. 3 21 ^h	283°575	4.81 ± 1.98		Jan. 3 19 ^h	283°467	4.34 ± 0.61
2002	Jan. 3 15 ^h	283°056	6.20 ± 0.35	2006	Jan. 3 18 ^h	283°167	4.87 ± 0.98
	Jan. 3 21 ^h	283°310	9.24 ± 0.40		Jan. 4 03 ^h	283°545	2.51 ± 0.04
2003	Jan. 3 11 ^h	282°623	1.58 ± 0.59	2007	Jan. 3 22 ^h	283°066	4.51 ± 0.65
	Jan. 3 20 ^h	283°010	6.42 ± 1.72		Jan. 4 03 ^h	283°280	4.64 ± 0.57
	Jan. 4 02 ^h	283°265	3.56 ± 0.73				
	Jan. 4 09 ^h	283°561	3.42 ± 0.48				
2004	Jan. 3 17 ^h	282°616	3.61 ± 0.96				
	Jan. 4 05 ^h	283°126	6.74 ± 1.70				

表 3: 流星電波観測で観測された 2001 年 ~ 2007 年におけるしぶんぎ座流星群のピーク時刻

また、しぶんぎ座流星群は、観測地が北へ行けばいくほど輻射点高度が高くなるため、天頂効果が発生する。ただし、この後で紹介するふたご座流星群と比べるとその効果は小さく、比較的忠実に活動を観測できる流星群である。一点、何故かはわからないが、28MHz の観測結果からでは、しぶんぎ座流星群の活動が捕らえられない。若干の増加傾向は見られるものの、日本の 53MHz や海外の結果 (海外もほとんどが 45MHz 以上) のように活発な活動が見られない。この傾向は日本で 28MHz が始まった 2002 年以降、2003 年しぶんぎ座流星群以来、一貫して同様である。おそらくは、周波数による何かがあるものとは思うが、詳細は不明だ。

3.2.2 Lorentz 曲線を用いた出現状況の構造分析

しし座流星群と同様、式 (5) を用いて、出現状況の構造分析を行った。2001 年から 2007 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 2007 年まで 2 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。これは、Lorentz 曲線による近似の際、比較的長い半値幅を持つ要素を加えないと説明のつかないプロファイルとなるためである。しぶんぎ座流星群は鋭い極大というイメージがつきまとっているが、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。この傾向は、本研究 Season1 を発表した頃に提唱したが、2005 年以降も同様の傾向が続き、 $\pm 10^h$ 前後の長い半値幅を持つ要素が検出されている。

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 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。

2005 年以降、観測されたピークの規模に差はあっても、活動プロファイルに分けると、差がほとんどないことがわかる。ピーク時の構成要素は Q05T1, Q06T1, Q07T2 で構成されており、それぞれの $A(max)$ は、4.7 ~ 4.8 と差がない。また、半値幅もほぼ同じである。ピークを起こしている時刻についても、太陽黄経で $\lambda_{\odot} = 238^{\circ}16$ 及び $\lambda_{\odot} = 238^{\circ}19$ となっており、従来から観測されているしぶんぎ座流星群の極大 $\lambda_{\odot} = 283^{\circ}16$ と、極めて近い一致を示している。2004 年も $\lambda_{\odot} = 283^{\circ}11$ で極大を迎えており、メインとなるピークは、眼視観測同様、 $\lambda_{\odot} = 283^{\circ}16$ 付近で起きていることがわかる。

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。

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
2005	Q05T1	Jan. 03 13 ^h 00 ^m	283°19	4.7	-3.0/+2.5
	Q05T2	Jan. 03 15 ^h 00 ^m	283°28	1.0	-12.0/+12.0
	Q05T3	Jan. 03 20 ^h 00 ^m	283°49	2.8	-2.0/+2.0
2006	Q06T1	Jan. 03 19 ^h 00 ^m	283°19	4.8	-5.0/+3.0
	Q06T2	Jan. 04 03 ^h 00 ^m	283°53	2.0	-1.0/+3.0
2007	Q07T1	Jan. 04 00 ^h 00 ^m	283°14	1.5	-12.0/+12.0
	Q07T2	Jan. 04 00 ^h 30 ^m	283°16	4.7	-5.0/+4.0

表 4: 2001 年 ~ 2007 年におけるしぶんぎ座流星群の各トレイル成分

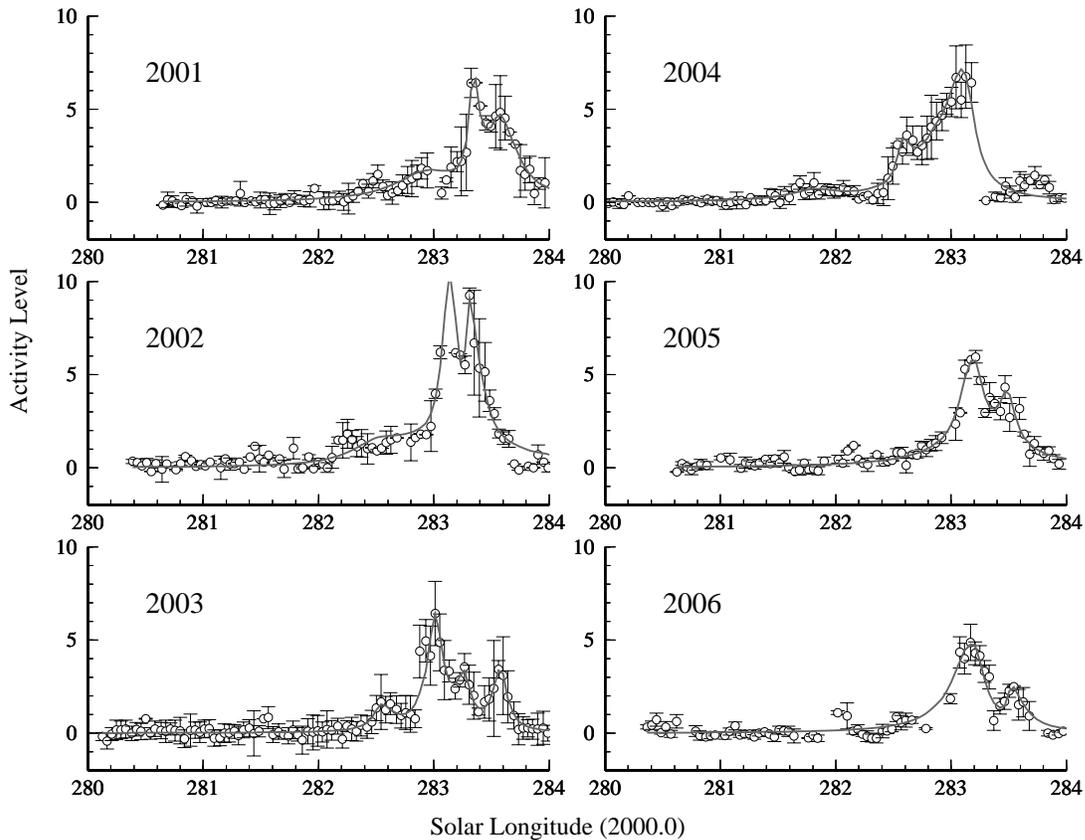


図 5: しぶんぎ座流星群経年変化 2001 年 ~ 2007 年: 曲線は Lorentz 曲線フィッティング結果

3.3 ペルセウス座流星群

3.3.1 観測結果

「夏の風物詩」とも呼ばれ、三大流星群のひとつであるこの流星群、夏休みと重なることもあり、流星観測をはじめの方にはもってこいの流星群である。流星電波観測でも同様に、ロングエコーが多く捕らえられるなど、しぶんぎ座流星群とはまた違った楽しみ方がある。さて、今回は 2001 年から 2006 年までのデータを解析し、観測結果としては、表 5 の通りとなった。

Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level	Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level
2001	Aug.12 16 ^h	140°000	2.13 ± 0.08	2004	Aug.11 22 ^h	139°499	2.53 ± 0.39
	Aug.13 15 ^h	140°922	1.98 ± 1.47				
2002	Aug.12 19 ^h	139°822	1.86 ± 0.87	2005	Aug.12 01 ^h	139°380	1.68 ± 0.46
	Aug.13 22 ^h	140°957	0.88 ± 0.38			Aug.12 23 ^h	140°253
2003	Aug.12 23 ^h	139°787	2.01 ± 0.35	2006	Aug.13 00 ^h	140°058	1.48 ± 0.58

表 5: 流星電波観測で観測された 2001 年～2006 年におけるペルセウス座流星群のピーク時刻

眼視観測でよく知られている、ペルセウス座流星群の極大は、太陽黄経 $\lambda_{\odot} = 140^{\circ}1$ であり、2002 年と 2003 年以外はほぼそれに近い値が極大として観測されている。2002 年と 2003 年は何が問題かはよくわからないが、微妙な結果ではある。また、眼視観測では 1 時間あたりの流星数 (HR) は 50 程度、ZHR で 100 近くに達する流星群ではあるが、電波観測では、最大でも $A(max) = 2$ 程度と、比較的低い結果が導かれている。

おそらくこれは、流星群の対地速度が速ければ速いほど、そして周波数が高ければ高いほど、明るい流星のみを検出するようになる「Ceiling Hight」という効果が効いているものと考えられる (McKinly 1961)。Miyao and Ogawa(2003) では、53MHz において、アンダーデンスエコーの最暗流星等級はふたご座流星群では 7 等級、しぶんぎ座流星群では 6 等級であるのに対し、ペルセウス座流星群では 4 等級となり、ほぼオーバーデンスエコーに近い状態である。流星数は、光度比に応じて、暗くなればなるほど流星数が増えるため、1 等級の差は光度比分だけ差が出てしまうことになる。おそらくこの事から、ペルセウス座流星群では、流星電波観測における流星検出数は少なく、Activity Level としてもあまり上がらないものと推測できる。

3.3.2 Lorentz 曲線を用いた出現状況の構造分析

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 6 に示した。

図 6 ならびに表 6 より、毎年 2,3 のトレイルによって構成されていることがわかる。極大時刻は、観測地としては、太陽黄経 $\lambda_{\odot} = 140^{\circ}1$ に近かったが、トレイル成分として分析すると、若干前後してしまう。半値幅等を考えた際、どうしてもこのような結果になる。また、前述の通り、眼視観測で捕らえられる流星数の割に、エコー数は少ないため、しし座流星群やしぶんぎ座流星群のようにあまり多くのトレイルが検出できない。また、半値幅も短く、2004 年と 2006 年は比較的長い、それ以外は短めとなっている。

2004 年は、Esko Lyytinen 氏より、1862 年 (1 公転前) トレイルが 11 日 20^h54^m に遭遇することが予想されていた (Lyytinen 2000)。表 5 及び表 6 より、2004 年は、22 時台に極大が起きていることがわかる。各トレイル成分でも、P04T1 が 11 日 22^h ($\lambda_{\odot} = 139^{\circ}49$) にピークを持つトレイルとして検出されている。

ペルセウス座流星群は、眼視観測では華やかではあるが、なかなか電波観測では捕らえにくい流星群であることがわかる。それでも、毎年ある程度の出現は見せており、ロングエコーが多いなど、華やかであることは間違いない。Lyytinen(2000) では、2028 年に 4 公転トレイル (1479 年) が接近することも計算されており、今後も引き続きペルセウス座流星群の活動を監視することが重要だ。後ほど述べる ZHR との比較においてもサンプル数を集め、精度を高めたい。

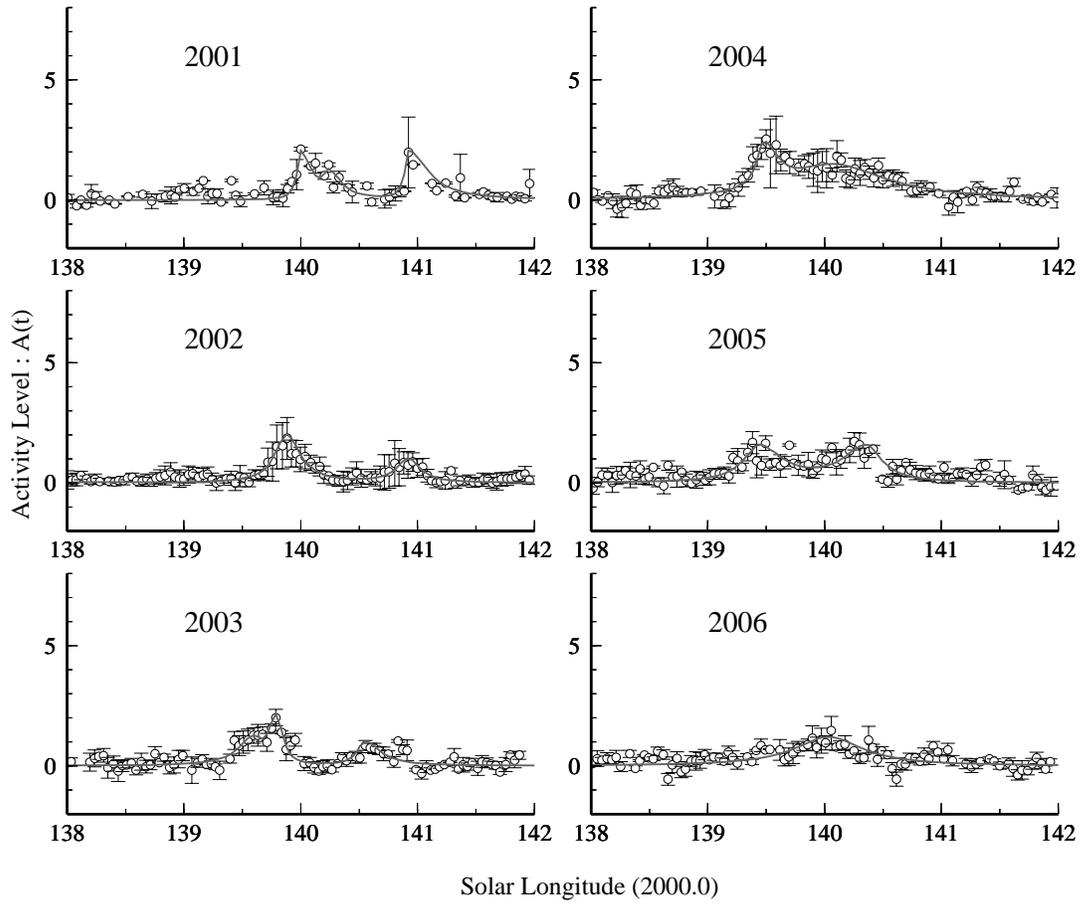


図 6: ペルセウス座流星群経年変化 2001 年 ~ 2006 年 : 曲線は Lorentz 曲線フィッティング結果

Year	Trail No.	Time (UT)	λ_{\odot}	A_{max}	FWHM(hr)
2001	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	P02T1	Aug. 12 19 ^h 30 ^m	139°88	2.0	-3.0/+3.5
	P02T2	Aug. 13 21 ^h 30 ^m	140°92	1.0	-3.0/+3.0
2003	P03T1	Aug. 12 18 ^h 30 ^m	139°60	1.0	-4.0/+2.0
	P03T2	Aug. 12 23 ^h 30 ^m	139°80	2.0	-2.0/+1.5
	P03T3	Aug. 13 18 ^h 30 ^m	140°56	1.0	-2.0/+4.0
2004	P04T1	Aug. 11 22 ^h 00 ^m	139°49	1.9	-2.0/+3.5
	P04T2	Aug. 12 13 ^h 00 ^m	140°09	1.4	-12.0/+14.0
2005	P05T1	Aug. 12 03 ^h 00 ^m	139°44	1.5	-4.0/+6.0
	P05T2	Aug. 13 02 ^h 00 ^m	140°36	1.5	-6.0/+4.0
2006	P06T2	Aug. 13 00 ^h 00 ^m	140°04	1.2	-9.0/+9.0

表 6: 2001 年 ~ 2006 年におけるペルセウス座流星群の各トレイル成分

3.4 ふたご座流星群

ふたご座流星群は、1年の三大流星群の最後を締めくくる流星群である。西暦1950年頃から急速に流星数が伸びてきた流星群であり、21世紀はいる頃には、火球の比率が多く観測され、短痕や永続痕も観測されるなど、比較的活発な活動を見せている。流星電波観測においても例外ではなく、年間で最大規模の活動を見せる流星群である。ほとんどの地点で1時間あたりの流星エコー数は100を突破する。瞬間的にはしぶんぎ座流星群の方がエコー数は多いが、日単位、週単位でエコー総数を見ると、その多さはピカイチである。

3.4.1 考慮事項の追加

2.2章及び2.3章に述べた考慮事項に加え、ふたご座流星群においては、もうひとつ考慮事項を追加することとした。それは、使用する周波数による補正である。Miyao and Ogawa(2003)では、53MHzの周波数を用いた観測で得られるアンダーデンスエコーの最暗流星等級は約7等級となっており、これは、周波数が高まれば明るく、周波数が低くなれば暗い流星まで検出することが可能とされている。ふたご座流星群の眼視観測で得られている光度比は、しし座流星群やペルセウス座流星群と異なり大きく、1等級の違いは、その光度比に影響してくる。従って、今回は眼視観測で用いている最微等級補正の公式を用いて、観測された流星エコー数を6.5等に補正することとした。式(6)によって、通常では大きめにでるActivity Levelが小さめに出てくる。

$$A(t)_{Gem i} = A(t)_i \times \frac{1}{\sin \theta} \times r^{6.5-LM_R} \quad (6)$$

ここで、 r は光度比、 LM_R は、流星電波観測で観測されるアンダーデンスエコーの最暗流星等級、 θ は輻射点高度、 $A(t)_i$ は、式(1)の結果である。 $A(t)_{Gem i}$ を各地で計算し、あとは通常と同じ方法で最終的な $A(t)$ を導き出す。

3.4.2 観測結果

今回は、2002年から2006年までのデータを解析し、観測結果としては、表7の通りとなった。

Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level	Year	Time (UT)	λ_{\odot}	Activity Level
2002	Dec.14 12 ^h	262°305	3.06 ± 0.56	2005	Dec.13 13 ^h	261°545	4.04 ± 1.98
2003	Dec.14 07 ^h	261°806	5.46 ± 1.69	2006	Dec.13 22 ^h	261°656	3.27 ± 1.02
2004	Dec.13 21 ^h	262°142	3.47 ± 0.74				

表 7: 流星電波観測で観測された2001年～2006年におけるふたご座流星群のピーク時刻

眼視観測で得られる通常の極大は、太陽黄経で $\lambda_{\odot}=262^{\circ}0$ である。若干の前後(数時間)の差はあるものの大きな差はない。また、活動度は、 $A(max)=3\sim 5$ 程度となっているが、他の流星群と比べてエラーバーが大きいのが特徴的である。これは、天頂効果の地点差と、使用周波数の差は補正できたとしても、観測地間の補正がしきれていないことによると考えられる。しし座流星群やしぶんぎ座流星群では、観測地点によって、Activity Levelにあまり差がない。これは、通常レベルに対し、増加分のエコー数が地点毎に関連性をもっていることによる。また、他の流星群では、Ceiling Hightの効果から、明るい流星を捕らえていることになるので、光度比の関係から、あまり差がでない。ところが、ふたご座流星群では、観測地点毎に検出できる流星エコーの限界に差があった場合、限界等級が暗いために、その差は大きくなると考えられる。地点間でActivity Levelの差が大きく、集計したとしてもエラーバーが大きくなってしまう原因の一つではないかと思われる。

いずれにしても、輻射点高度による補正、観測地間の補正の研究が進まないといふたご座流星群の流星活動を見るのは難しいのかもしれない。

3.4.3 Lorentz 曲線を用いた出現状況の構造分析

ふたご座流星群についても同様に 2002 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 7 で，各要素を表 8 に示した．

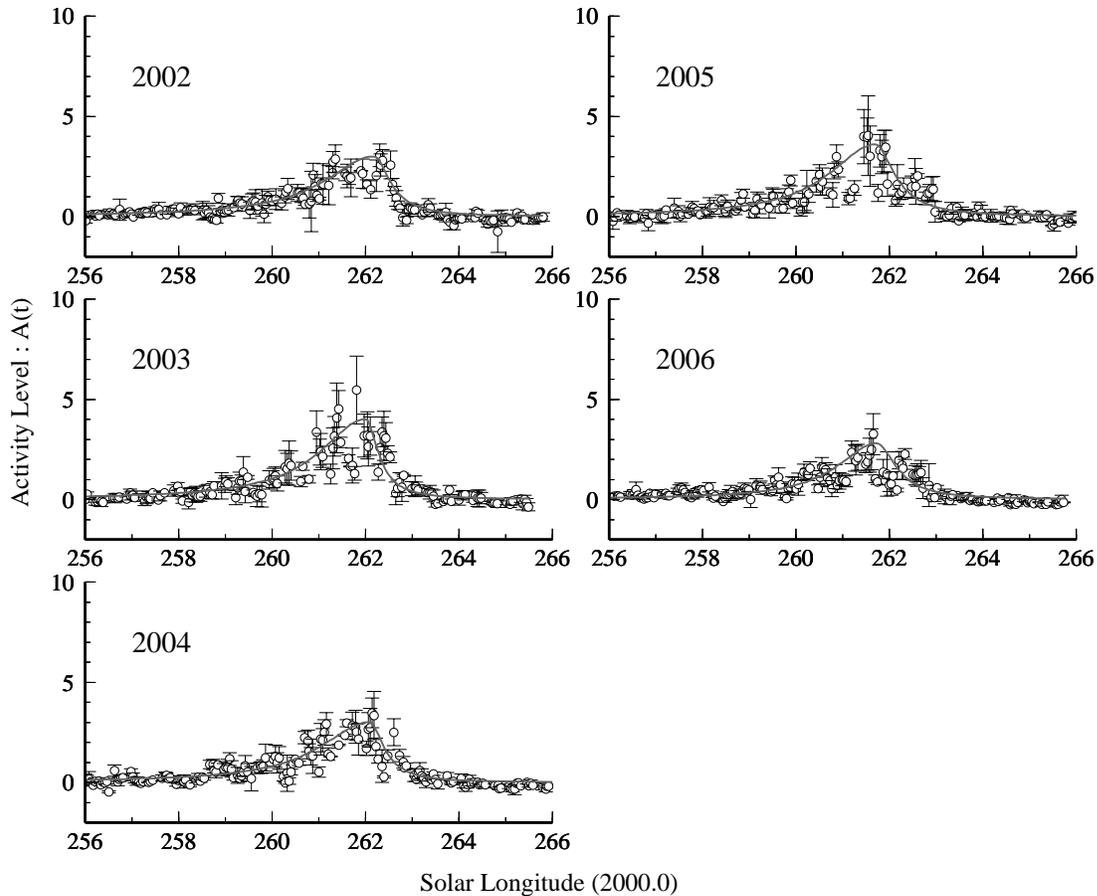


図 7: ふたご座流星群経年変化 2002 年～ 2006 年：曲線は Lorentz 曲線フィッティング結果

Year	Trail No.	Time (UT)	λ_{\odot}	A_{max}	FWHM(hr)
2002	G02T1	Dec. 14 10 ^h 00 ^m	262°20	3.0	-30.0/ + 10.0
2003	G03T1	Dec. 14 12 ^h 00 ^m	262°02	4.0	-28.0/ + 8.0
2004	G04T1	Dec. 13 20 ^h 00 ^m	262°11	3.0	-30.0/ + 9.0
2005	G05T1	Dec. 13 17 ^h 00 ^m	261°72	3.6	-28.0/ + 12.0
2006	G06T1	Dec. 14 00 ^h 00 ^m	261°75	2.8	-24.0/ + 12.0

表 8: 2001 年～ 2006 年におけるふたご座流星群の各トレイル成分

トレイル成分に分解すると，おおそひとつのトレイルで集約することができる．つまり，あまり細かなトレイルが存在しない，もしくは，流星電波観測では得られていないのどちらかであると言える．ふたご座流星群は，極大後の流星数減少が顕著であると眼視観測から言われ，電波観測でも従来からそのような結果となってきた．今回のこの解析でも，極大前の半値幅は 30 時間近くと，1 日少しあることがわかる．それに対し，極大後の半値幅は約 12 時間程と，半分以下で活動が終息していることがわかる．図 7 からそれは顕著にわかる．また，観測されている極大も，眼視観測で得られている太陽黄経 $\lambda_{\odot} = 262^{\circ}0$ とほぼ同じである．式 (6) の補正をすることで，Activity Level を 1 近く下げているが，これが妥当なのかどうかはもちろん別途検討は必要であるが，今回はこの補正をした方が全体としてエラーバーは小さくなる傾向があった．ところで，2006 年の活動が低いのはいささか気になる．

4 Activity Levelと眼視観測 ZHR との関連

眼視観測の ZHR のように流星電波観測で得られたデータを物理的数値に変換できないか、流星電波観測の大きな課題となっていた。厳密には、観測地点の補正や反射領域補正、アンテナの指向性の補正など考えなくてはならないパラメータは山ほどある。また、徐々にこのような研究も進んできている。本研究では、データ量が多い結果から導かれた Activity Level はある程度の信頼性があるものと仮定し、統計的に眼視観測の ZHR との関連性を調べ、相互の変換式を導き出したい。

4.1 関連を見るための方法

今回は、1999 年～ 2006 年までのしし座流星群、2001 年～ 2007 年までのしぶんぎ座流星群、2001 年～ 2006 年のペルセウス座流星群、そして 2002 年～ 2006 年までのふたご座流星群において、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。ただし、流星群によっては線形近似よりも二次関数の方がよりよい場合もあるため、それは適宜流星群毎に補足する。

4.2 しし座流星群

しし座流星群において、1999 年から 2006 年までの ZHR と Activity Level との分布図を図 8 に示す。

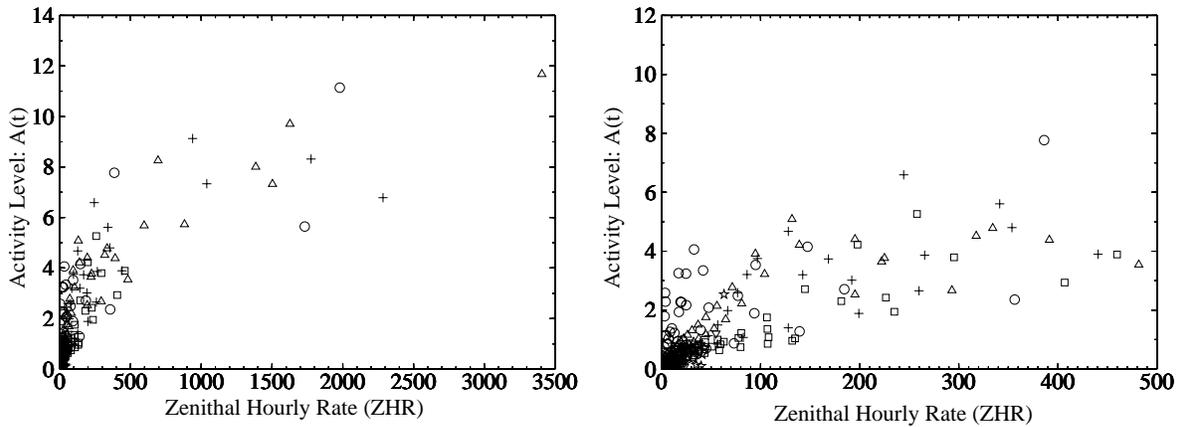


図 8: 1999 年～ 2003 年しし座流星群における ZHR と Activity Level との関係 (右図は ZHR500 以下を拡大):
1999 年: \circ , 2000 年: \square , 2001 年: \triangle , 2002 年: $+$, 2003 年: \times , 2004 年: $*$, 2006 年: \diamond

続いて、図 8 より、最小二乗法を用いて線形近似すると図 9 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。全体の相関係数は 0.82。

$$A(t)_{Leo} = 0.0234 \times ZHR(t) \quad (ZHR \leq 155) \quad (7)$$

$$A(t)_{Leo} = 0.0031 \times ZHR(t) + 3.138 \quad (ZHR > 155) \quad (8)$$

この式 (7), (8) は、前回本研究で発表した値 (小川,2004) からほとんど変わっていない。前回は、式 (7) の場合、 $0.024 \times ZHR(t)$ であり、式 (8) の場合は、 $0.003 \times ZHR(t) + 3.405$ であった。式 (7), (8) それぞれの係数についても、誤差は比較的小さい (0.0234 ± 0.0006 , 0.0031 ± 0.0004 , 3.138 ± 0.362)。この事からも、しし座流星群の ZHR との変換式はどうやらこの 2 式でいけそうである。また、ZHR155 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 3.6 に相当する。従って、Activity Level の値が 3.6 以下の場合には式 (7) を用いて、それより大きい場合は、式 (8) 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．なお，式 (7) の範囲内 (ZHR155 以内) の相関係数は 0.78．統計学での決定係数 R^2 は 0.49．一方，式 (8) の範囲内 (ZHR155 以上) では，相関係数 0.81，決定係数 R^2 は 0.67 である．

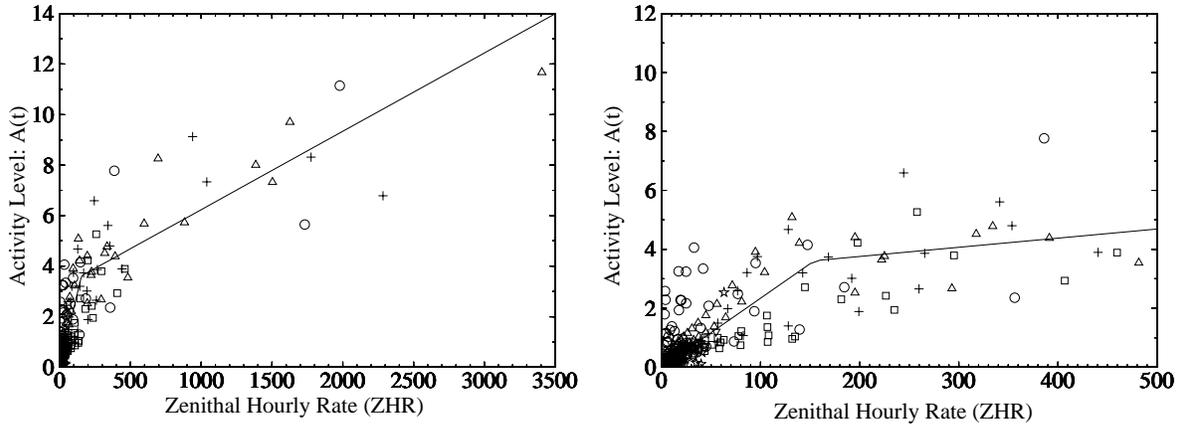


図 9: 図 8 における分布図の最小二乗法による線形近似

4.3 しぶんぎ座流星群

2001 年～2006 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 10 である．

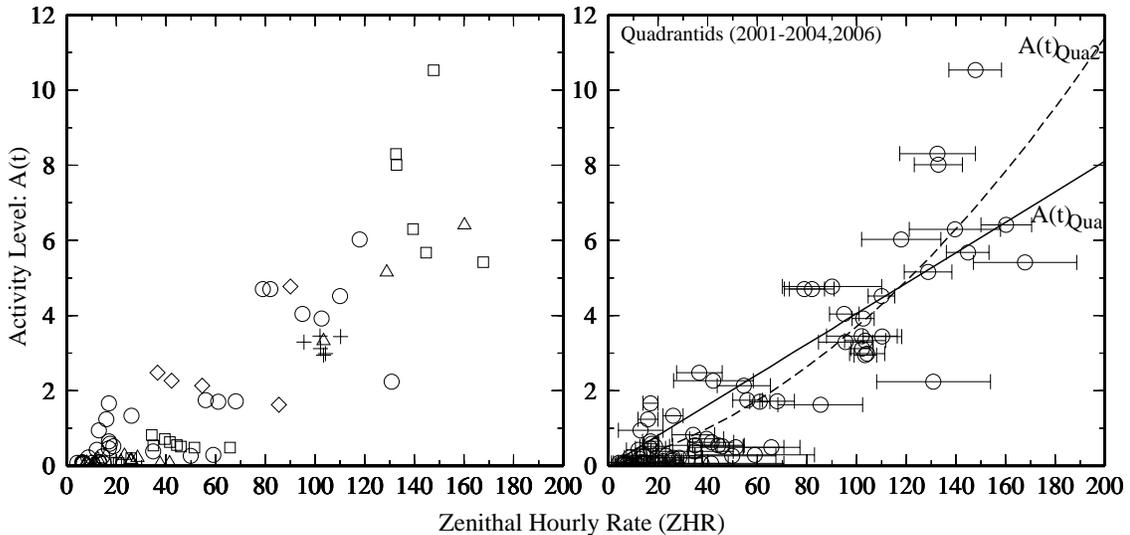


図 10: 2001 年～2006 年しぶんぎ座流星群における ZHR と Activity Level との関係 (左が分布図，右が近似結果): 2001 年: \circ , 2002 年: \square , 2003 年: \triangle , 2004 年: $+$, 2006 年: \times

図 10 右の中で，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 (9)，(10) で示される．なお，図 10 の相関係数は 0.88 である．

$$A(t)_{Qua} = 0.0405 \times ZHR(t) \quad (9)$$

$$A(t)_{Qua2} = 0.0002 \times ZHR(t)^2 + 0.017 \times ZHR(t) \quad (10)$$

近似としては $A(t)_{Qua2}$ の方がよい結果となっている．これは，統計学での決定係数からも同様の事が言え，式 (9) では， $R^2 = 0.782$ であるのに対し，式 (10) では， $R^2 = 0.824$ である．通常，決定係数が大きいほど，近似としては適合していると判断できるので，式 (10) の方がよりよい結果となる．

一点留意事項がある．Activity Level から ZHR を求めた場合，Activity Level そのものに誤差が ± 1.0 あったとすると，算出される ZHR では， ± 20 の誤差が発生することとなる．従って，Activity Level の値を慎重に集計しないと，求められる ZHR にも大きな差が出てくる．これは，あとのふたご座流星群でも同様であるが，今後の大きな課題となりそうだ．

4.4 ペルセウス座流星群

ペルセウス座流星群において，ZHR と Activity Level との関連を調べた結果が図 11 である．

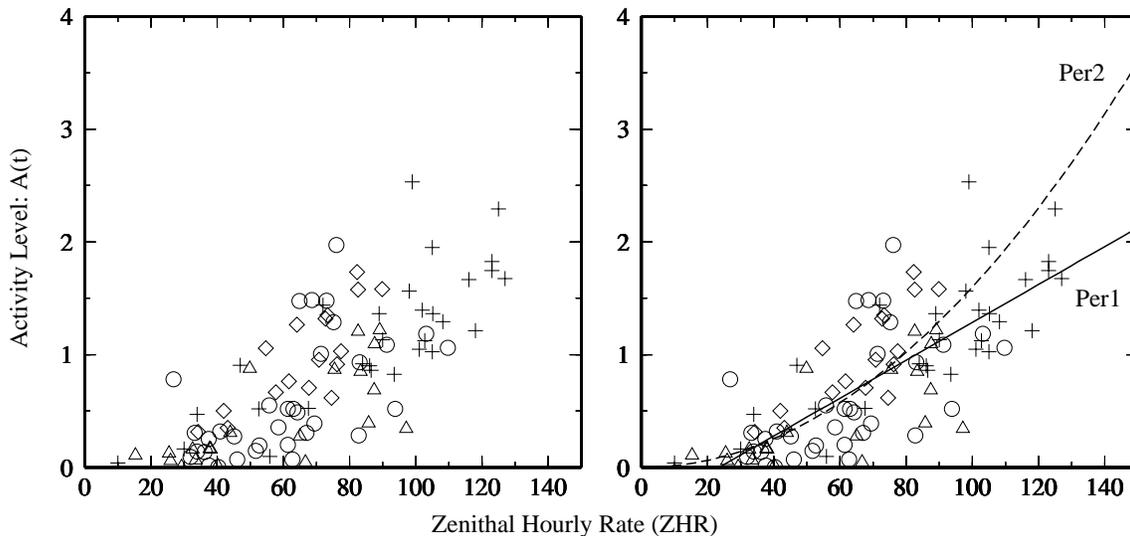


図 11: 2001 年～ 2005 年ペルセウス座流星群における ZHR と Activity Level との関係 (左が分布図，右が近似結果): 2001 年: \circ , 2002 年: \triangle , 2004 年: $+$, 2005 年: \times

図 11 右側に，先ほど同様 2 つの近似線がかかっている．式 (11) は，線形近似である．そして式 (12) は二次関数である．なお，図 11 の相関係数は， 0.77 である．

$$A(t)_{Per1} = 0.0168 \times ZHR(t) - 0.393 \quad (11)$$

$$A(t)_{Per2} = 0.00016 \times ZHR(t)^2 \quad (12)$$

式 (11) をご覧になってお気づきとは思いますが，切片が -0.393 となっており，Activity Level が 0.393 を超えないと ZHR の値はずっと ZHR22 程度の値となってしまう．従って，仮にペルセウス座流星群の活動が ZHR20 付近にしかならないと，その年は，まったくペルセウス座流星群の活動が検出できないということになってしまう．また，常に ZHR20 程度があるため，解析的にも難しい．しし座流星群のように，ある部分で線形近似の場合は式を分ける必要がありそうだ．ただし，現段階でどこで区切るのか，明確なことはわからない．

一方，式 (12) を用いた場合，極大付近は割とよく合うが，極大以外の期間ではあまり合わない．Activity Level から導き出した ZHR の方が，眼視観測で得られる ZHR よりも低く出てくる．これもやはり，なんらかの対策は必要になると思うが，極大の ZHR を推測する上では式 (12) がよく合う．また，これは統計学的にも言及でき，統計学での決定係数をそれぞれ求めてみると，式 (11) については， $R^2 = 0.586$ ．そして式 (12) については， $R^2 = 0.594$ である．この事からも，式 (12) の方がより適した近似と言えそうである．ただし，お互い決定係数が大きいわけでもないのだから，今後のさらなる解析が期待される．

4.5 ふたご座流星群

ふたご座流星群において、ZHR と Activity Level との関連を調べた結果が図 12 である。

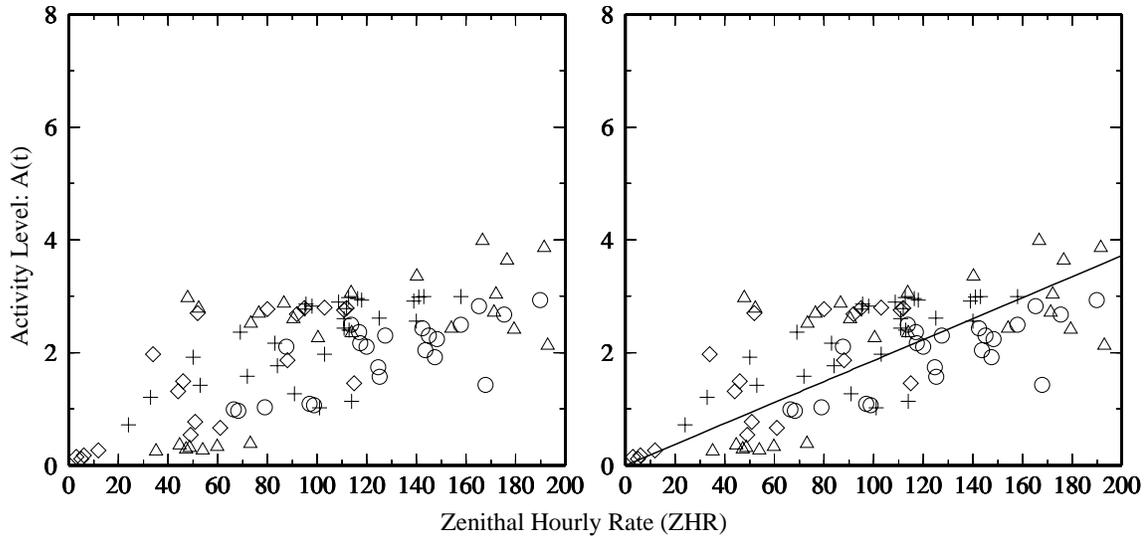


図 12: 2002 年～2006 年ふたご座流星群における ZHR と Activity Level との関係 (左が分布図, 右が近似結果): 2002 年: \diamond , 2003 年: $+$, 2004 年: \triangle , 2006 年: \circ

図 12 右側に、近似線がかかっている。その線形近似は、式 (13) で表される。

$$A(t)_{Gem} = 0.0186 \times ZHR(t) \quad (13)$$

一見、相関のある形でまとまっているように見えるが、実は誤差が大きい。これは、相関係数からもその理由がわかる。相関係数は 0.66 と、今回解析した流星群の中では最も低い数値となっている。決定係数も $R^2 = 0.431$ と非常に低い数値となっている。これにより、例えば、Activity Level に ± 1 の誤差があると、ZHR の誤差はなんと ± 50 もあることになる。従って Activity Level から導き出された ZHR で 50 だとして、Activity Level そのものに誤差が ± 1 とすると、ZHR は、 $ZHR_{50} \pm 50$ となってあまり意味をなさない。従って、Activity Level そのものの精度が要求される。

4.6 Activity Level と眼視観測 ZHR との関係について総論

しし座流星群は特殊事情があるので、別扱いとするが、しぶんぎ座流星群、ふたご座流星群及びペルセウス座流星群については、各年の極大 (表 3, 表 5, 表 7) について、式 (9) ~ 式 (13) を用いて、極大 ZHR を推定した。その結果を表 9 に示す。

しぶんぎ座流星群については、線形近似した ZHR_{Qua1} では、 $A(t)$ が大きくなると誤差も大きくなる。一方で、 ZHR_{Qua2} については、 ZHR_{Qua1} と比較すると誤差は半分ほどとなり、精度としては、こちらの方が高いと思われる。また、過去に実際観測された数値からしても、 ZHR_{Qua2} の方が眼視観測の ZHR に近い。

ペルセウス座流星群も、しぶんぎ座流星群同様、 ZHR_{Per1} の線形近似は、誤差が大きく、導かれる ZHR も大きめの数値が出てくる。近年の結果からして、この数値は大きすぎる。一方の ZHR_{Per2} は、2006 年の誤差は大きいですが、全体的には ZHR100 前後に落ち着いている。 $A(t)$ に誤差が 1.0 程あると、 ZHR_{Per2} は 30 程の誤差がつく。

ふたご座流星群は、状況はさらに深刻である。傾きが小さいこともあり、Activity Level の少しの誤差が、ZHR の大きな誤差をもたらしてしまう。2003 年は、 $A(t) = 5.5$ にも疑問ではあるが、誤差が ± 1.7 もあると、導き出される ZHR_{Gem} はなんと ± 90 程の誤差が生まれる。全体的に ZHR_{Gem} は 200 弱となっており、2003

Year	Quadrantids			Perseids			Geminids	
	A_{max}	ZHR_{Qua1}	ZHR_{Qua2}	A_{max}	ZHR_{Per1}	ZHR_{Per2}	A_{max}	ZHR_{Gem}
2001	6.4 ± 0.8	158 ± 20	141 ± 11	2.1 ± 0.1	148 ± 6	115 ± 3	—	—
2002	9.2 ± 0.4	227 ± 10	176 ± 5	1.9 ± 0.9	136 ± 54	109 ± 27	3.1 ± 0.6	167 ± 32
2003	6.4 ± 1.8	158 ± 42	141 ± 23	2.0 ± 0.4	142 ± 24	112 ± 11	5.5 ± 1.7	296 ± 91
2004	6.7 ± 0.7	165 ± 42	145 ± 22	2.5 ± 0.4	172 ± 24	125 ± 10	3.5 ± 0.7	188 ± 38
2005	6.0 ± 0.3	148 ± 7	136 ± 4	1.7 ± 0.4	125 ± 24	103 ± 12	4.0 ± 2.0	215 ± 108
2006	4.8 ± 1.0	119 ± 25	120 ± 15	1.5 ± 0.6	113 ± 36	97 ± 20	3.3 ± 1.0	177 ± 54
2007	4.7 ± 0.6	114 ± 12	115 ± 10	—	—	—	—	—

表 9: 各流星群の各年の推定 ZHR

年と 2005 年は異様に高い。 $A(t)$ の誤差を ± 0.5 ほどにおさえないと、 ZHR_{Gem} の誤差が縮まらない。 よりたくさんサンプルから、再度関係式は見直す必要がありそうだ。

4.7 Activity Level の限界

ここまで見てきて、原点の通常レベルの図 1 を見ると、通常値は、 0.03 ± 0.45 となっている。 従って、約 0.0 ± 0.5 の範囲は、通常レベルの誤差がそれとも流星群活動によるものかは判別が付きにくいということになる。 この範囲を超えるには、表 10 に示したとおりの条件が必要となる。

流星群名	前提公式	必要条件
しし座流星群	ZHR_{Leo}	$ZHR_{Leo} = 20$ 以上
しぶんぎ座流星群	ZHR_{Qua1}	$ZHR_{Qua1} = 15$ 以上
	ZHR_{Qua2}	$ZHR_{Qua2} = 20$ 以上
ペルセウス座流星群	ZHR_{Per1}	$ZHR_{Per1} = 50$ 以上
	ZHR_{Per2}	$ZHR_{Per2} = 55$ 以上
ふたご座流星群	ZHR_{Gem}	$ZHR_{Gem} = 30$ 以上

表 10: 通常誤差範囲を超える条件

表 10 より、しし座流星群やしぶんぎ座流星群、ふたご座流星群では $ZHR_{20 \sim 30}$ 以上の活動が見られないと、Activity Level としては、通常の誤差範囲がどうかの判断がつかないということになる。 ペルセウス座流星群では、約 ZHR_{50} と、立派な活動レベルを超えないと、流星電波観測では、Activity Level として流星群活動を認識できないということになる。これが Activity Level で流星群活動を見る限界である。

従って、流星電波観測で突発出現を監視することは重要ではあるが、ある程度の活動が見られないと、通常レベルに埋もれてしまうこととなる。 その場合は、個別サイトあるいは局所的なエリアのみの解析を実施する必要があり、世界的なデータ解析は避けるべきと考える。

また、今回は解析していないが、周波数毎でも流星群の活動期間が異なる。 Miyao and Ogawa(2003)でも取り上げられているが、特にふたご座流星群では、28MHz の流星エコー数増加が、53MHz より早い時期に始まることがわかっている。 また、しぶんぎ座流星群では、第 3.2 章でも述べたように、28MHz では主たる極大が捉えられない。

流星群解析においては、Activity Level という特性を生かしつつも、限界を見極めながら、今後さらに研究していく必要がある。

5 流星活動モニターとしての活用

ここまでは、流星群解析を行ってきたが、式(1)、(2)は、日々の流星活動モニターを実施するために考案された式であり、比較対象となる通常レベルも該当日から2週間前の14日間をサンプルとしている。この解析は、現在、流星電波観測国際プロジェクトにおいて有効に利用されており、毎月の結果がホームページにアップされている。2006年オリオン座流星群の突発や、こと座流星群、みずがめ座 η 流星群、昼間流星群や、みずがめ座 δ 流星群などが顕著に検出されている。今後はこれらの流星群解析も実施したいが、日々の流星活動モニターでも十分に検出でき、解析できるため、これらを有効活用することで、流星群解析も容易にできるものと期待される。

5.1 2006年の集計結果

2006年1月～12月までの統合結果を図13～図15に掲載する。横軸は太陽黄経としている。なお、この結果は、すべて日本のデータだけであり、式(1)、(2)と式(4)($n=1.0$)を考慮した結果である。従って、海外の結果は含まれていないので、流星群活動が輻射点の沈んでいる時間帯であれば、このグラフには反映されていない。また、輻射点高度の補正を行っているわけではないので、ふたご座流星群(図15)等で天頂効果が明瞭になっている。この他にも、該当日から2週間前のデータを使用しているため、マイナスに振れている時期がある等、見方には注意しなければならない。

結果としては、しぶんぎ座流星群(図13)をはじめとし、年内に何度か増加傾向のせている時期がある。図14の太陽黄経32度付近にActivity Level=1を記録しているが、この時期の活動としてはこと座流星群が想定される。その後も太陽黄経45度付近でActivity Levelはプラスへ振れている。みずがめ座 η 流星群の活動であろう。ただ、日本のデータしか統合していないため、あまりはっきりとした活動とはなっていない。ただし、輻射点高度の補正を行い、オーストラリアなど南半球のデータを加えて解析すると、その全容がつかめると推測される。同じ図14において、太陽黄経120度から128度にかけて、Activity Level=2に近い活発な活動を見せている期間がある。みずがめ座 δ 流星群の期間と重なり、ふたご座流星群同様、顕著な活動となって見えている。その後のペルセウス座流星群よりも活発な活動だ。図15では、太陽黄経208度付近で、活発な活動を見せて話題となったオリオン座流星群の活動が見て取れる。

このように、通常モニターでも多くの活動を見て取れるが、課題は海外との統合。ただし、統合すると、どうしても流星群の活動が問題となってくる。例えば、みずがめ座 δ 流星群の活動期間をとって考えるが、日本で輻射点が高まっているときは、当然、ヨーロッパやアメリカでは低い位置が沈んでおり、活動は見られない。つまり、散在レベルだ。海外とのデータを統合するということは、これらを統合することとなり、活動が相殺される危険がある。従って、現時点では、国別あるいは地域別に統合するのが、通常モニターとしては得策であり、流星群解析はまた別途、海外のデータを用いて今回のように実施する必要があるといえよう。いずれにしても、使い方間違えると、とんでもない結果が出てくるため、Activity Levelの特性をよく理解した上で、使用する必要がある。

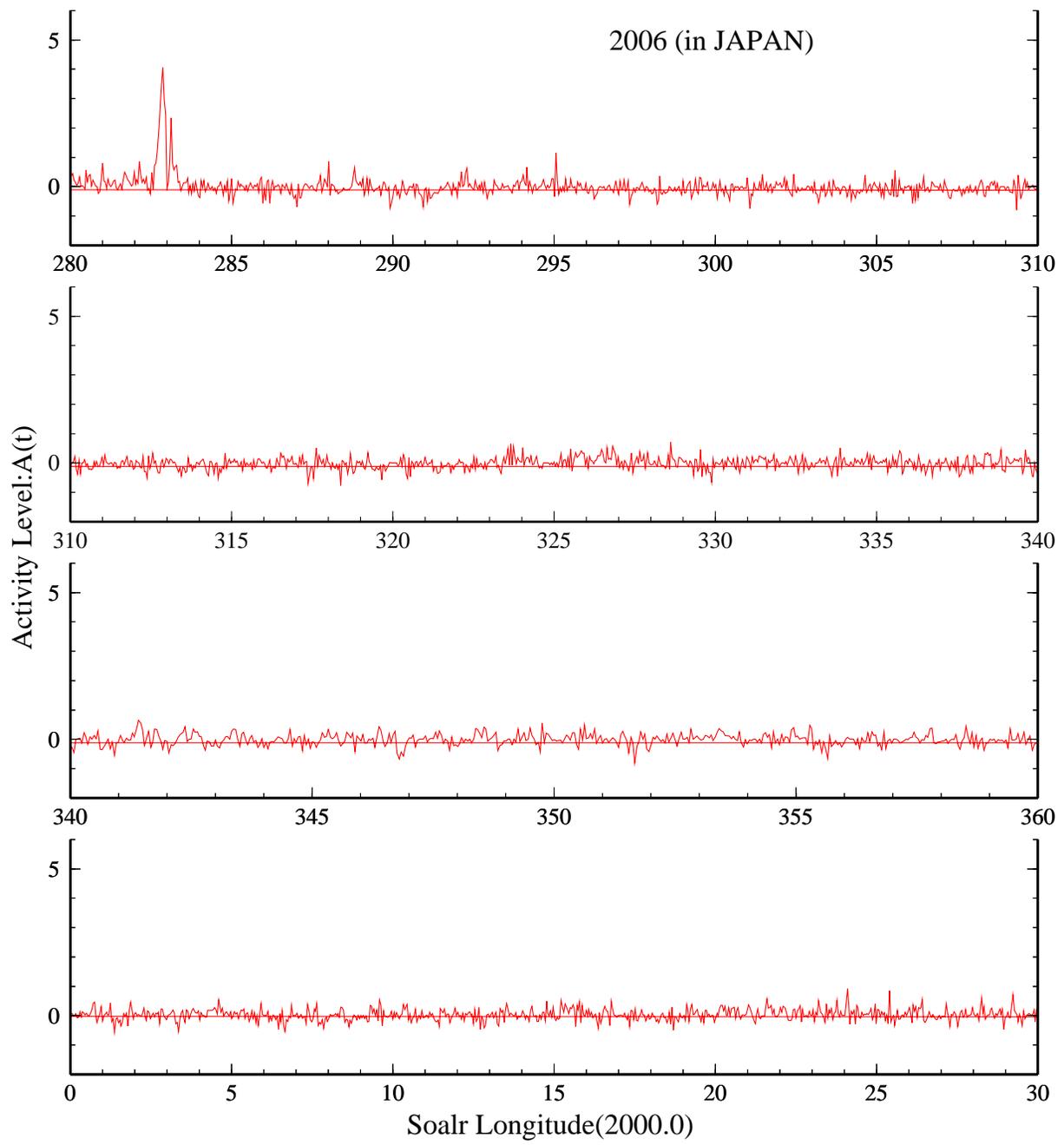


図 13: 流星活動モニター (2006 年 1 月 ~ 4 月)

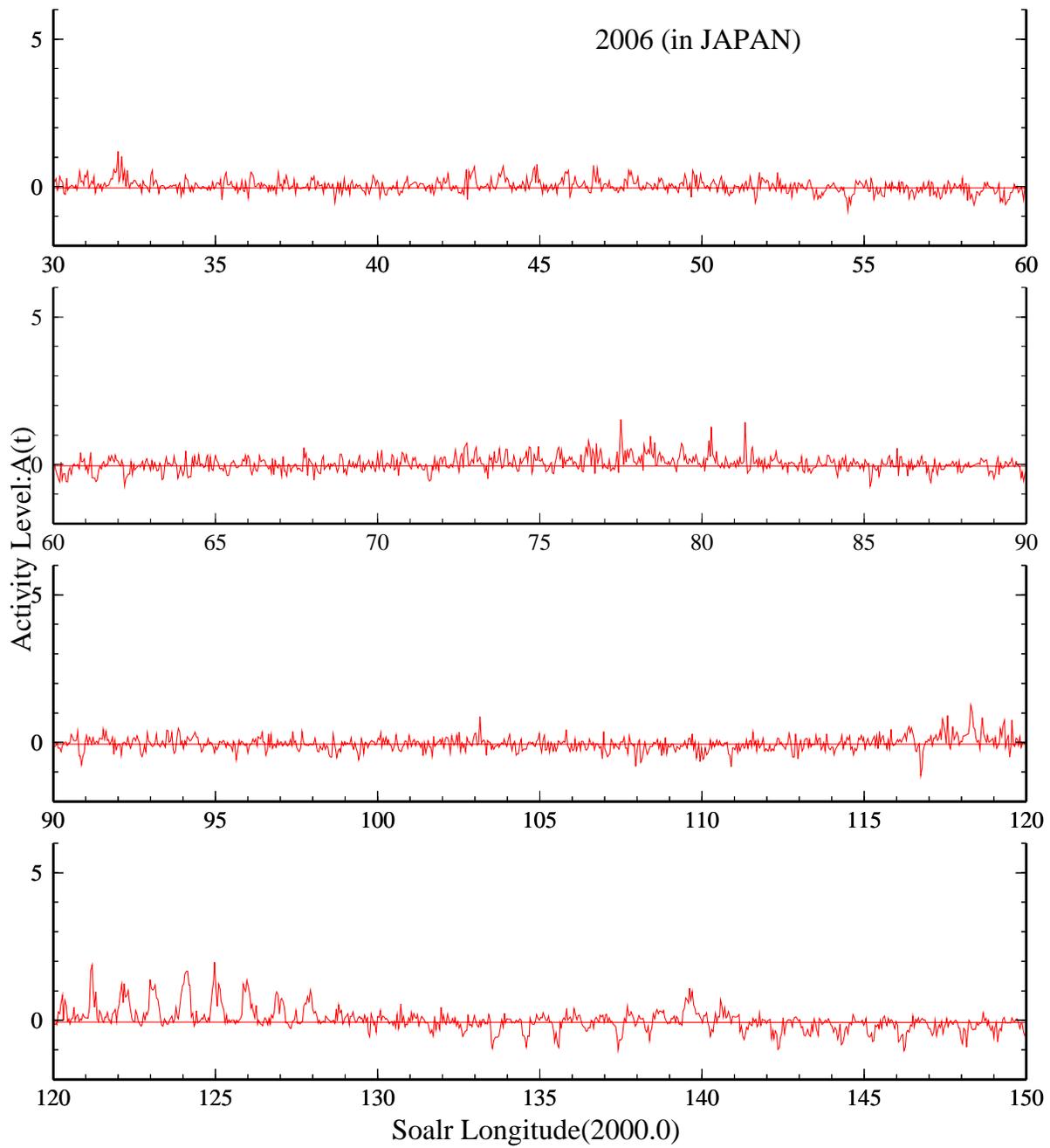


図 14: 流星活動モニター (2006 年 4 月 ~ 8 月)

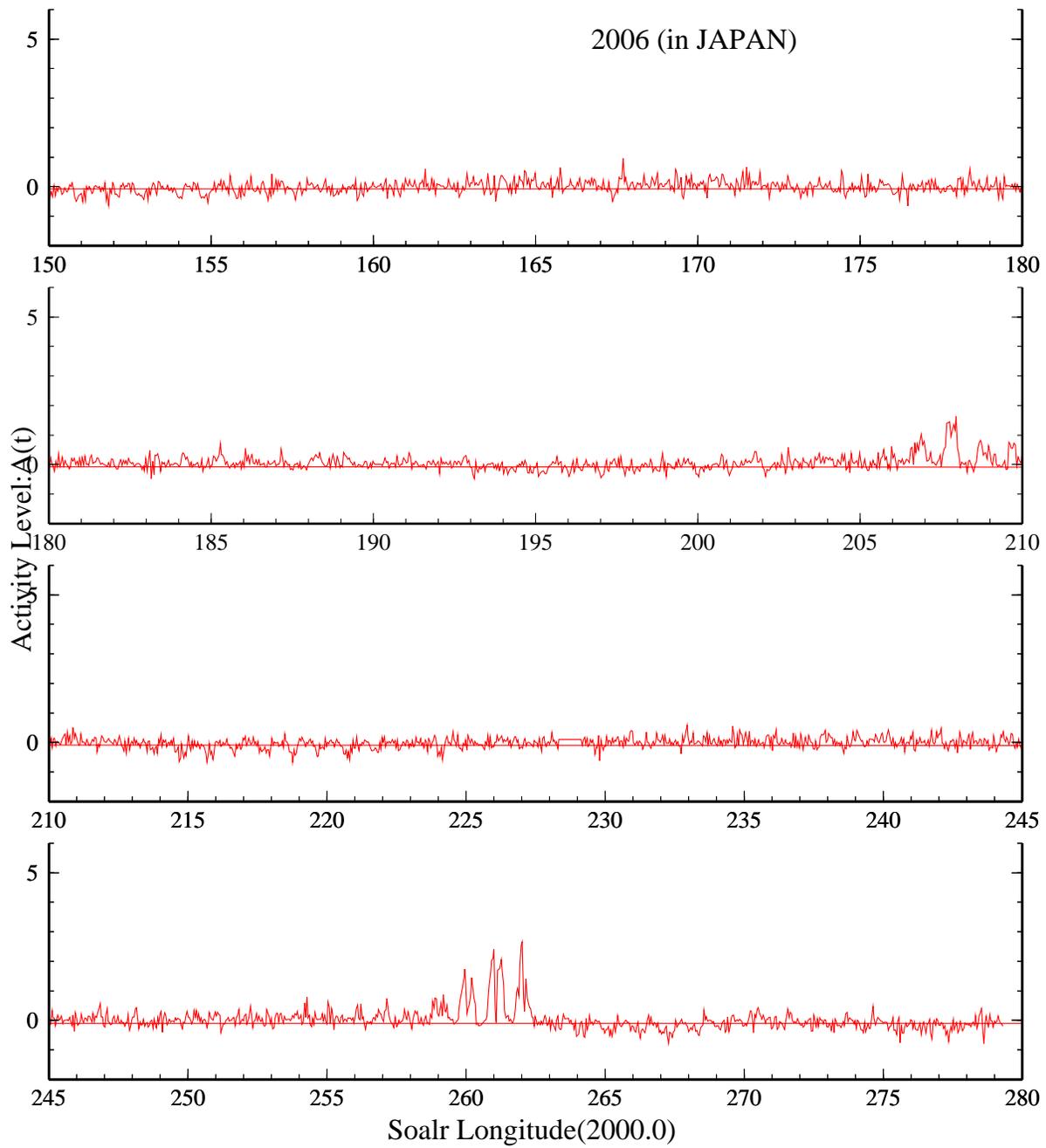


図 15: 流星活動モニター (2006 年 8 月 ~ 12 月)

6 流星電波観測で観測している領域を追う：反射領域シミュレーション

流星電波観測で観測している領域は、渡部 (1983, 1984) や内海 (2003) で用いられた反射領域シミュレーションを使用する。このシミュレーションは、電波が流星飛跡に対して入射角 = 反射角で散乱されるとして計算がなされている。この前提条件の下で、この条件を満たす点の集合は、送信局と受信局を焦点とする回転楕円体となり、流星飛跡はその楕円体に接する必要がある。するとその接点では流星ベクトルと法線ベクトルとの内積が 0 になる。これらふたつの連立方程式を解き、結果を求める。詳しくは文献を参考にして頂きたい。以下がその基礎となる算出式である。

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2 - d^2} + \frac{z^2}{A^2 - d^2} = 1 \quad (14)$$

$$\frac{2x}{A^2} \cdot l + \frac{2y}{A^2 - d^2} \cdot m + \frac{2z}{A^2 - d^2} \cdot n = 0 \quad (15)$$

x, y, z が流星の出現位置。 z は発光高度で、発光高度はハイトシーリング高度で最大を区切り、最低は 85km 付近としている (Miyao and Ogawa 2003 より)。 A は回転楕円体の長半径を示す変数で最大を 500km とした。この数値には若干課題はある。

図 16 は、ふたご座流星群において、流星電波観測と光学観測と同定結果である。○印や + じるしは、ビデオで観測された流星を発光高度を仮定してマッピングしたものであり、○は電波観測サイトと同定されたビデオ流星、+ 印は同定されなかったビデオ流星を示しており、灰色の帯状の領域が、筑波大学で流星電波観測した場合の反射領域である。図 16 より、シミュレーションされた流星電波観測領域の近くでは ○ 印が多く、そうではなく離れた場所では + 印が多く分布していることが見て取れる。とはいっても時間帯によってはそうでもない時間帯がある。それは、0 等級やマイナス等級のような明るい流星は、電離柱の電子密度が高くなり、電離柱そのものの寿命が長くなった結果であると推測される。これは、電離柱の寿命が長くなると、鏡面反射がいたるところで成り立ち、多くの場所で反射条件が成り立つ。従って、流星電波観測シミュレーションの前提条件が崩れるため、どこからでも散乱され受信されてしまったものと考えられる。そこで、図 17 には、図 16 でプロットされている流星において、2 等級以暗の流星のみをマッピングした結果である。

図 17 より、同定されたことを示す ○ 印は、シミュレーションされた流星電波観測観測領域付近に残る。この結果から、比較的暗い流星の場合は、シミュレーションされた流星電波観測観測領域付近に分布し、図 17 でカットされた明るい流星は、反射領域シミュレーションに左右されず様々なところに分布していることも分かる。これに加えて、シミュレーションされた流星電波観測観測領域付近に同時流星かどうかを議論する際、いくつか問題点も指摘できる。ひとつは、ビデオ観測で得られたデータはすべて自動解析ソフトにかけられる。従って、群判定・光度判定・発光点・消滅点などもすべて自動で求められている。この精度には確たるものはないので、群判定そのものが間違っている場合がある。図 16, 17 はすべて群流星のみしかプロットしていない。そのため、この中に散在流星が混合している可能性がある。また、明るい流星をある一定光度でしきい値を設ける際、流星の発光光度も判定が甘いものがある。よってこれら二つの図は一概には言えないことを気にとめなくてはならない。

いずれにしても、流星電波観測で観測しているエリアを知ることは、そこに降り注ぐ流星数からフラックスを求めることにつながる。これは、流星観測においてとても重要な物理量のひとつであり、流星電波観測は、この物理量を得られていない現状が、大きな弱点である。従って、Activity Level のように相対値に頼らざるを得ない状況なのだ。今後の研究において、いち早く、この物理量が得られることが期待される。

The Comparison between Video and Radio Meteor Observation

ID: JA2126

RX: University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

Height=85-105(km)
Distance(TX-RX)=354 km

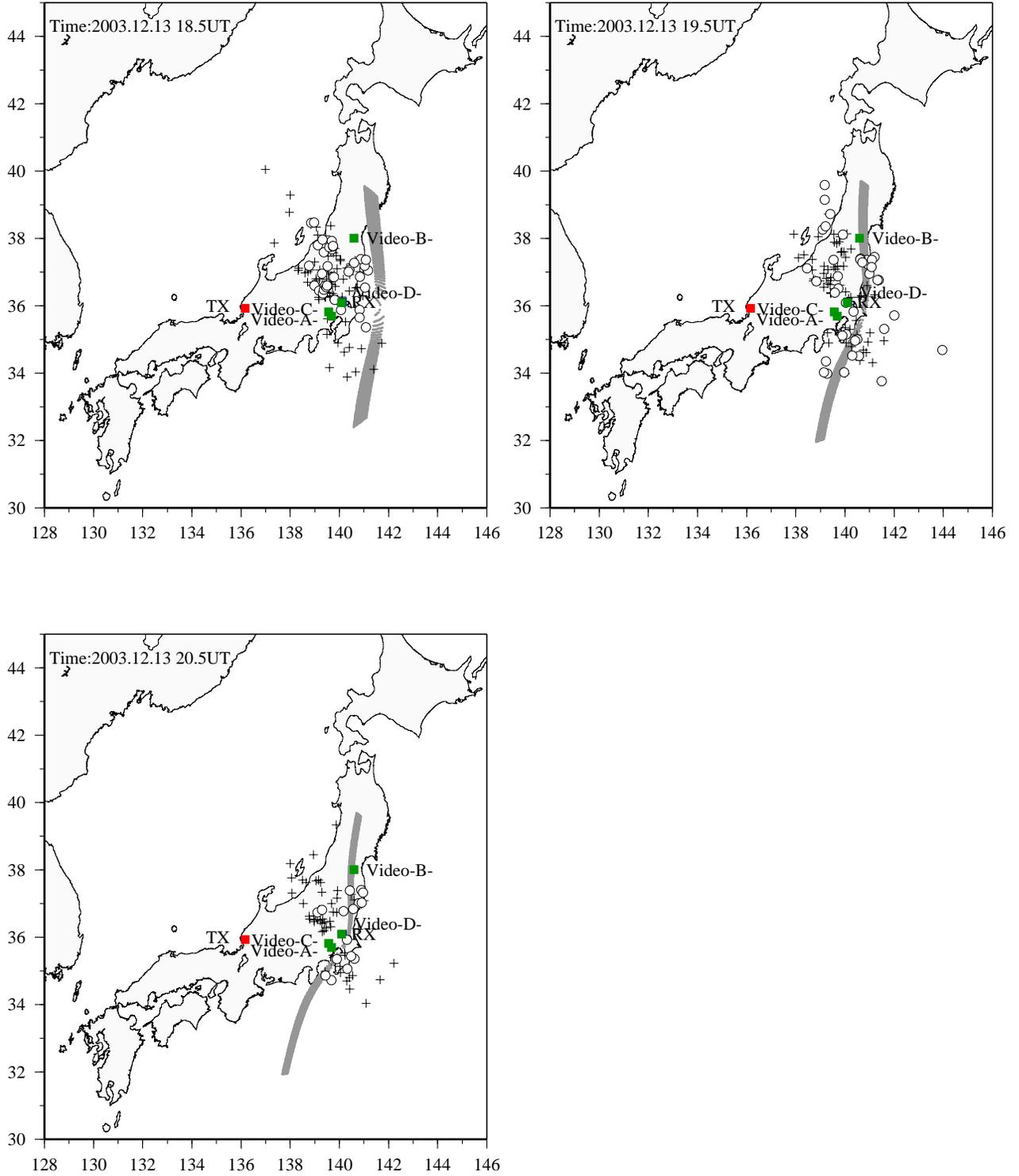


図 16: 流星電波観測 (筑波大学) と光学観測との同定結果

The Comparison between Video and Radio Meteor Observation

RX: University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

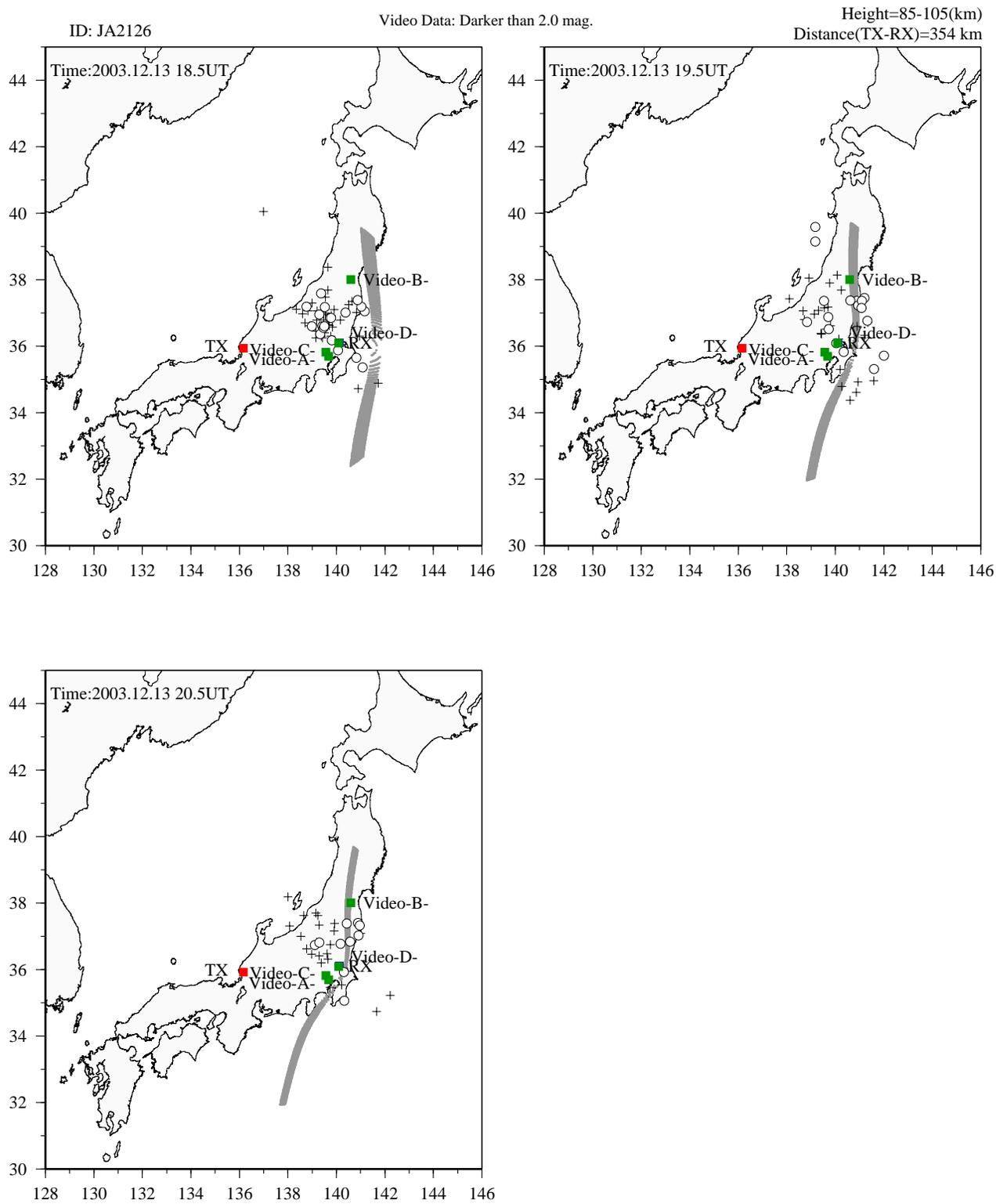


図 17: 図 16 において 2 等級より暗いものをプロットした場合

7 流星電波観測国際プロジェクトについて

7.1 創設の経緯と成功まで

時は2000年8月、和歌山県みさと天文台においてこのプロジェクトの構想は始まった！「世界の電波観測が一度に見られたらいいよね…」実に単純な動機が、世界の流星電波観測サイトをひとつにまとめ、しし座流星群をはじめとし、学術的そして教育的にも大きな成果をもたらすことになった。

当時、Peter Jenniskens氏を中心としたGlobal-MS Net、Christian Steyaert氏によるRadio Meteor Observation Bulletinの2つの国際的な組織が存在していた。これらの組織は、Global-MS Netは、主に流星モニター機能を活用し、突発流星群や主要流星群の情報をピンポイントで結果を速報したりしていた。一方で、Radio Meteor Observation Bulletinは、その名のとおり、毎月の世界の観測結果が回報として世界に発信されており、そのデータは1990年代前半からと、歴史のあるデータが存在している。ところが、流星電波観測の大きなメリットは、昼夜関係ないこと、天候に左右されないことである。また、観測も自動化され、視覚的にもわかりやすいデータが生成されるのが特徴である。なぜ速報サイトやライブサイトが存在しないのか。流星電波観測国際プロジェクトは、この「あるべき」「あってしかるべき」存在を具体化したプロジェクトであり、それにとどまらず学術成果へ結びつけようとする試みであった。

このプロジェクトの意義がわかったのが、2000年しし座流星群。日本の観測者は、ピークに向かうしし座流星群を地平線に沈みゆく輻射点と共に見送ることとなった。ここでさらに「世界の流星電波観測が統合できればモニターできるのに…」という思いが強くなり、2001年春に向けて、Radio Meteor Observation Bulletinより、海外の何地点かのデータを用いて、世界データの統合の試みをはじめた。その結果、予想されていた極大が捉えられるなど、その有効性が徐々にわかり、2001年3月春、日本天文学会春季年会で、国際プロジェクトをつくることを宣言。流星電波観測国際プロジェクト2001がスタートした。

このプロジェクトには、日本のみならず世界の協力が必要となった。Global-MS NetのPeter Jenniskens氏、Christian Steyaert氏の人脈をお借りし、さらに、2001年8月にはスウェーデンで開催されたMeteoroids2001という国際会議で発表。着実に下積みを行った。9月から登録を開始し、予想以上の国内からの登録に驚き、海外からも登録が出てきた。この年は、最終的に15カ国91地点の参加という、大きなプロジェクトが完成した。しし座流星群観測中は速報とライブ（当時は国内のみ）が提供された。これは、流星電波観測の特徴を活かしたただけだが、世界で初めての試みとなった。極大日が近づくにつれ、国内外からのアクセスが急増し、ホームページはアクセス困難に。ライブも速報も見づらくなるなど、大きな反響に悲鳴を上げつつも、有用性は実証された。

その後、解析が進められると共に2002年構想も始まった。解析結果からは、全体の活動レベルと共に、日本ピークの詳細構造も明らかとなり、この結果は様々な会議や論文で発表された。

2002年5月頃に、今年はペルセウス座流星群でもプロジェクトを行うことを決定。アナウンスがはじまり、順調に登録がされ、ペルセウス座流星群観測プロジェクトはライブ・速報共に成功に終わった。この後しし座流星群までは、海外拠点の確保に全力を注ぎ、最終的に23カ国126地点と、2001年を上回る登録数でプロジェクトを展開した。年齢層も幅広く、観測者も天文屋だけではなく無線家の参加も多くなり、流星のプロジェクトとしては変わった性質をもつものとなっていった。前年の反省点であったライブ、速報はサーバーの分割や作業の効率化を図り、海外のライブ地点も確保して、よりよい情報を2年目にしてやっと提供することができた。その後も、ふたご座流星群、こぐま座流星群、しぶんぎ座流星群とプロジェクトを進め、2003年で国際プロジェクトを一度締めた。

2003年以降は国内ネットワークとして運用。毎月のデータを着実に集め、主要流星群の経年変化の解析ができる下地が揃ってきた。本研究においても、根本となるデータは、流星電波観測国際プロジェクト及び国内ネットワークからであり、その重要性がわかる。

天文教育の観点からも、通常のアstronomy研究とは違った構成員構成が見て取れ「社会参加型科学研究」(山本2003)の成功例と言える成果ももたらした。これについては、第7.3章で詳しく紹介する。

年	月	できごと
2000	8	流星電波観測国際プロジェクト構想が練られる
	11	2000年しし座流星群で国内速報サイトを試行．有用性を確認． ホームページが期間中，約 10,000 アクセス．カウンタ停止
2001	3	和歌山県みさと天文台で，プロジェクト発足を決意！
	8	スウェーデンの Meteoroids2001 で海外お披露目
	9	2001年観測プロジェクトの登録開始
	10	無償で受信機＋アンテナ＋ケーブルセットを 10カ所に貸出し
	11	最終的に 15カ国 91 地点のエントリーでプロジェクトを終了 ホームページが期間中，約 600,000 アクセス．アクセス困難
2002	3	解析初期成果の発表
	5	国際会議 Leonid-MAC で発表。WGN への投稿
	6	2002年プロジェクトのエントリー開始
	8	ペルセウス群観測プロジェクトの実施 ホームページが期間中，約 200,000 アクセス．
	10	臼居氏中心に，28MHz の観測が始まる．11月からは矢口氏により定点観測が実現
	11	しし群観測プロジェクトの実施 ホームページが期間中，約 400,000 アクセス．
2003	12	ふたご群観測プロジェクトの実施
		こぐま群観測プロジェクトの実施
	1	しぶんぎ群観測プロジェクト実施 最終的に 23カ国 126 地点のエントリーで終了
	7	茨城高専にて，世界初 6 c h 観測の実験を開始．全方位天頂の 6 c h
2004	8	高知工科大にて，世界 2 例目となる 6 c h の実験を開始．期待した結果 反射領域を調べる H T T P キャンペーンが実施される．
	3	天文学会で電波観測の成果が一堂に会す．様々な成果が発表された
2005	7	AMRO-NET ドメインを取得．
2006	2	電波観測報告会で，干渉計を始めとし，電波観測の意義を追求する動きが加速化
2007		現在に至る

表 11: 流星電波観測国際プロジェクトの歩み

7.2 プロジェクト参加登録者

参加者は2001年には15ヶ国、2002年には23ヶ国の参加を得る、まさに国際的なネットワークとなった。2003年現在の参加者は図18のようになっている。参加地点数は現在23ヶ国172地点である。2004年以降は、国際プロジェクトの枠組みを一度解除しているため、その後は、国内のネットワークのみをとりまとめている状況である。

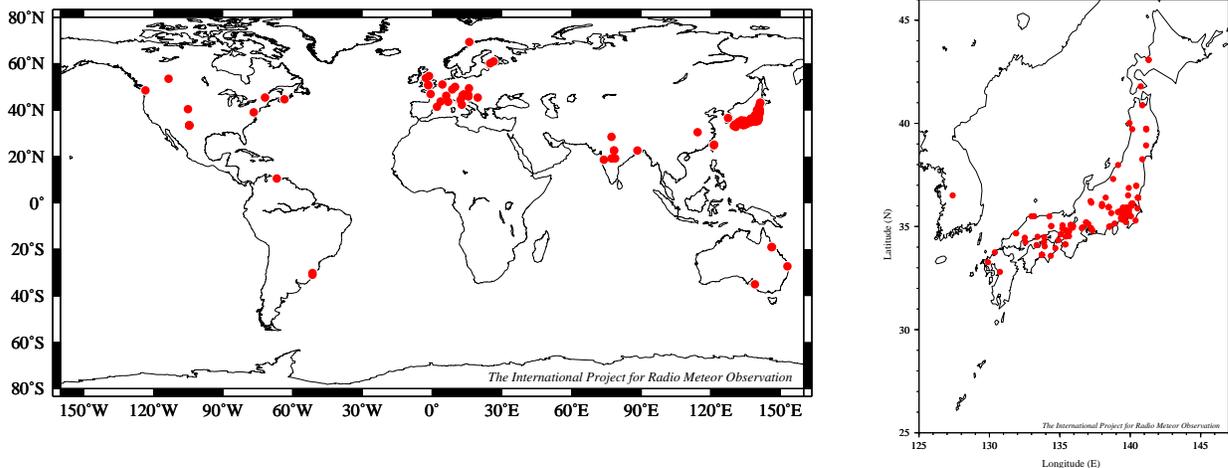


図 18: 流星電波観測国際プロジェクト参加者マップ

ご覧頂くと分かると思うが、全球をほぼカバーしているため、継続した流星データをとることはできるが、その地点のほとんどは北半球に偏っている。従って、南半球で流星群の突発や活動の主体がある場合は、非常に不利なネットワークとなる。幸いにも流星群のほとんどは北半球で見られ、活発なものが多いが、南半球のカバーが今後の課題ではある。

7.3 社会参加型科学研究としての成功

第7.1章において、教育的観点からも成果を得たと記載した。このプロジェクトは、多彩な人材が集まったとても珍しいプロジェクトとなった。

通常、流星のプロジェクトやキャンペーンでは、少なからず流星に興味のある方が参加する。ところが、本プロジェクトは必ずしもそうではない。参加者の半数近くを占めるのは、これまで流星に興味があったというより、アマチュア無線に長けた方々である。この絶妙なコラボレーションは「流星電波観測」という共通言語を介して、流星に興味がある方は流星現象を、アマチュア無線として興味がある方は、電波の伝搬や機材の研究を、それぞれが得意な分野ではあるが、共通語によってひとつのプロジェクトが成り立っているのである。これは、大きな可能性を生み出す。流星に閉じた領域だけではなく、様々な角度からのアプローチがあるプロジェクトとなるので、流星観測者には思いつかないことを、無線家が思いつき、無線家にはない流星の特徴を流星観測者がフォローし、また、ソフトが書ける人がライブのスクリプトを作成するなど、多種多様な人材がプロジェクトの中で動く。実際、プロジェクトの速報 c g i は私が書いたものではない。また 28MHz の観測も、従来の流星研究会だけの集まりでは実現できなかったであろう。このような新しいスタイルでのプロジェクトを成功させるに至った。

従来は「研究者・専門職者」が core になっていたプロジェクトが、年齢・職種不問、興味をもった人ならなんでもできてしまう。本プロジェクトは、山本 2003 で提唱された「社会参加型科学研究」市民が参加した科

学研究を行えるプロジェクトであるといえる。本プロジェクトは、誰が偉いわけでも賢いわけでもない。また、私がとりまとめはしているが、決して観測テーマや研究テーマを拘束しているわけではない。これまで、多くの参加者がそれぞれの興味を持った事象に挑戦し、研究し、発表している。また、必ずしも研究をしなくてはいけないプロジェクトではなく、必ずしも観測をしないといけないプロジェクトでもない。これは、観測者に徹しても、集計者に徹しても、研究・解析に徹しても、何でもかまわないということの意味する。従って無理のない範囲で趣味でき、それぞれが実施していることは、科学研究に知らず知らずのうちに関与している。まさに市民文化としての科学研究である。

本プロジェクトは、このような特性をもち、もちろん欠点もあるが、利点を活かし、研究をし自己満足の世界に浸るだけでなく、社会へ還元できるようなプロジェクトであることが必要と私自身は考える。これは決して参加者個人に必要というわけではなく、プロジェクトの存在がという意味であり、誤解のないようにしていただきたい。

8 まとめ・謝辞

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。

また、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] Jean, M., W., 1995: Forward Scattering of Radio Waves off Meteor Trails, *Proceeding of International Meteor Conference 1995*, 99-117
- [7] 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.
- [8] Lyytinen E. (2000) “Coming Perseid Meteor Storms”,
<http://www.metaresearch.org/solarsystem/perseid/perseids.asp>
- [9] Lyytinen E., Nissinen M. and Van Flandern T. (2001) “Improved 2001 Leonid Storm Predictions from a Refined Model”, *WGN*, **29:4**, 110-118.

- [10] Lyytinen E., Van Frandern T. and Nissinen M. (2002) “Leonid Predictions for the Year 2002” , <http://www.ursa.fi/ursa/jaostot/meterit/leoeng02.html>.
- [11] Maegawa, K. (1999) “HRO: A new forward-scatter observation method using a Ham-band beacon”, *WGN* **27**, 64-72
- [12] McKinly D.W.R (1961) “Meteor Science and Engineering” , *McGraw-Hill Book Company*
- [13] McNaught R. H. and Asher D. J. (1999) “Leonid Dust Trails and Meteor Storms”, *WGN*, **27:2**, 85-102.
- [14] McNaught R. H. and Asher D. J. (2001) “The 2001 Leonids and Dust Trail Radiants”, *WGN*, **29:5**, 156-164.
- [15] McNaught R. H. and Asher D. J. (2002) “Leonid Dust Trail Structure and Predictions for 2002”, *WGN*, **30:5**, 132-143.
- [16] Miyao, K., Ogawa, H. (2003) “Research for the Characteristics of Meteor Shower from Multi-Frequency Radio Observation”, *International Meteor Conference 2003*
- [17] 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
- [18] Ogawa H., Toyomasu S., Ohnishi K. and Maegawa K. (2002a) “The Leonid 2001 Project by Radio Meteor Observations”, *WGN*, **30:4**, 105-109.
- [19] 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
- [20] Ogawa H., and Uchiyama S. (2001) “The 2001 Leonids Meteor Storm over Japan”, *WGN*, **29:6**, 206-213.
- [21] Suzuki, K. (1976) “Recording Meteor Echoes by FM Radio”, *Sky and Telescope* **51**, 359-362
- [22] 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
- [23] Utsumi, Y., 2003: Simulation for detective field of HRO, *The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) Report SP* **15**, 105-112
- [24] Vaubaillon J. (2002) “Activity Level Prediction for the 2002 Leonids”, *WGN*, **30:5**, 144-148
- [25] Vaubaillon J., Lyytinen E., Nissinen M. and Asher D. J. (2003) “The 2003 Leonid Shower From Different Approaches”, *WGN*, **31:5**, 131-134
- [26] Vaubaillon J., Lyytinen E., Nissinen M. and Asher D. J. (2004) “The Unexpected 2004 Leonid Meteor Shower”, *WGN*, **32:5**, 125-128
- [27] Watanabe, J., 1983: Expected Region of Shower Meteors Detectable by Forward Scattering Method (I), *Radio Meteor Research* **10**, 32-55
- [28] Watanabe, J., 1984: Expected Region of Shower Meteors Detectable by Forward Scattering Method (II), *Radio Meteor Research* **12**, 4-21
- [29] 埜口和弥 (2006) “HROFFT 出力画像における流星エコー自動計数プログラム開発”, 第 47 回 流星会議
- [30] 大川和彦 (2006) “電波干渉計による流星観測～5 c h 電波干渉計～”, 流星電波観測報告会 2006
- [31] 中島拓, 臼居隆志, 矢口徳之, 小川宏, 前川公男, 中村卓司, 高野秀路 (2006) “流星エコーの受信電力測定～野辺山宇宙電波観測所での観測成果～”, 流星電波観測報告会 2006

- [32] 白居隆志 (2006) “流星電波観測における複数地点受信時の同定率の測定”, 流星電波観測報告会 2006
- [33] 小川宏 (2004) “流星電波観測のさらなる有用性を目指して (中間発表)” 第 106 回 流星物理セミナー
- [34] 小川宏 (2001a) “流星電波観測国際プロジェクト” <http://www.amro-net.jp>
- [35] 山本真行 (2003) “社会参加型研究時代の到来と理科教育への意義” 日本天文学会 2003 年秋季年会
- [36] 財団法人 日本地図センター, 1998, 地図と測量の Q & A (改訂版)