

# プロジェクトの観測成果・解析結果

## Results of The International Project for Radio Meteor Observation

流星電波観測国際プロジェクトでは、いくつもの流星群を観測しました。その観測成果や速報の解析方法なども紹介します。現在の解析方法や観測結果をふまえて、よりよい解析方法を皆さんで考えていきましょう。

### 1. 解析方法

#### 1.1 Activity Level

本プロジェクトでは、世界中のデータ統合をメインに行います。通常眼視観測では、空の状態を雲の量や最も暗い星の等級(最微等級)で補正し、理想条件下の流星数を導きます。一方、流星電波観測では、受信機の性能やアンテナの指向性、周辺環境、電波の反射メカニズムなど、考慮すべき要素が非常に多く、眼視観測のように細かな補正は现阶段ではおこなうことができません。

そこでこのプロジェクトでは、データを無次元化して統合することを試みました。受信機の性能やアンテナの指向性、周辺環境は、通常の日周変化(散在レベル)に現れるものと仮定して計算を行います。ここで、もうひとつの問題、電波の反射メカニズムがありますが、これは、しし座流星群などの対地速度が速い流星群においてはそこまで問題にはなりません。この理由は、流星エコーには電子密度が比較的濃いオーバーデンスエコーと、比較的薄いアンダーデンスエコーがあります。アンダーデンスエコーの寿命は非常に短く、電波は鏡面反射を成立させ、流星の突入角度によって流星エコーが受信できるエリアが決まります。ところが、オーバーデンスでは、寿命が長いので、電離柱の継続時間が長く、時間と共にその柱が変化し、鏡面反射は至る所で成り立ちます。つまり、受信エリアが非常に広く、アンダーデンスのように流星の突入角度への依存が小さくなります。また、速度が速い流星はより高高度で発光を始めます。電波は周波数によって、アンダーデンスのハイトシーリング効果によって観測できる高度の限界があります。50MHzでは、観測できる高度から考えるとほとんどアンダーデンスが受信できない、つまりオーバーデンスが大多数の状態となります。従って、しし座流星群においては、ひとまずこの反射メカニズムはどこでも同様と仮定します。

さて、これらをふまえた上で、計算式を以下のように設定しました。

$$A_1(t) = \frac{H(t) - H_0(t)}{D} \frac{1}{\sin(h)}$$

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_1(t)_i$$

( $H$  は、時間  $t$  における観測エコー数(HR) ,  $H_0$  は、同時間における散在エコー数(HR) ,  $D$  は一日の平均エコー数 ,  $h$  は輻射点高度 ,  $N$  はサイト数 ,  $A_{(t)}$  は求める Activity Level)

式自体は至ってシンプルで、通常レベルに対する活動の度合いを示す式となっています。上記の HR は Hourly Rate の略で、1 時間あたりの流星数を意味します。従って、時間が 1 時間未満の場合はあらかじめ HR に換算してから適用する必要があります。輻射点高度の算出方法は、この収録最後にある公式集をご覧ください。

さて、アンダーデンスエコーでは、流星の突入角度によってエコー数が変化すると述べました。これについて特に、天頂付近に輻射点 came とき、すなわち地球への突入角度が地表に対して 90 度に近づくと、鏡面反射を成り立たせて受信するためには、遙か遠方で反射する必要があります。しかし、現実には電波が減衰し観測できません。従って極端にそのころにエコー数が減少します。これを「天頂効果」と呼びます。ふたご座流星群などで顕著に見られます。今回のしし座流星群ではオーバーデンスが大多数とは書きましたが、アンダーデンスがないわけではないので、計算仮定において、輻射点高度が  $0^\circ \sim 75^\circ$  のデータのみ使用することにしました。本プロジェクトは主にこの方法を用いて活動評価を行ってきました。また、エラーバーは誤差伝搬法則に従って解いています。

ただし、ふたご座流星群観測プロジェクトなど、しし座流星群以外の流星群でもプロジェクトが行われると、対地速度によって上記の式では不十分で、特にふたご座流星群ではアンダーデンスエコーの補正が効きません。今後ともこのようなことをふまえてさらなる改良が必要です。

## 1.2 Reflection Time

1998年, 2001年そして2002年のしし座流星群においては, ロングエコーの大量出現によって, ひとつひとつのエコーが分離できず, 飽和してしまう状態となりました。2001年の観測プロジェクトでは, 日本の53MHzの観測地点では全地点でエコーが飽和し, 2002年はヨーロッパやアメリカの50MHzも飽和しました。2001年当初は, これらのデータはもう解析不能だと思っていました。しかし, ここで, ある一定の強度を持つエコーの反射時間を求める方法で活動評価ができないかという話になり, その試みが始まりました。



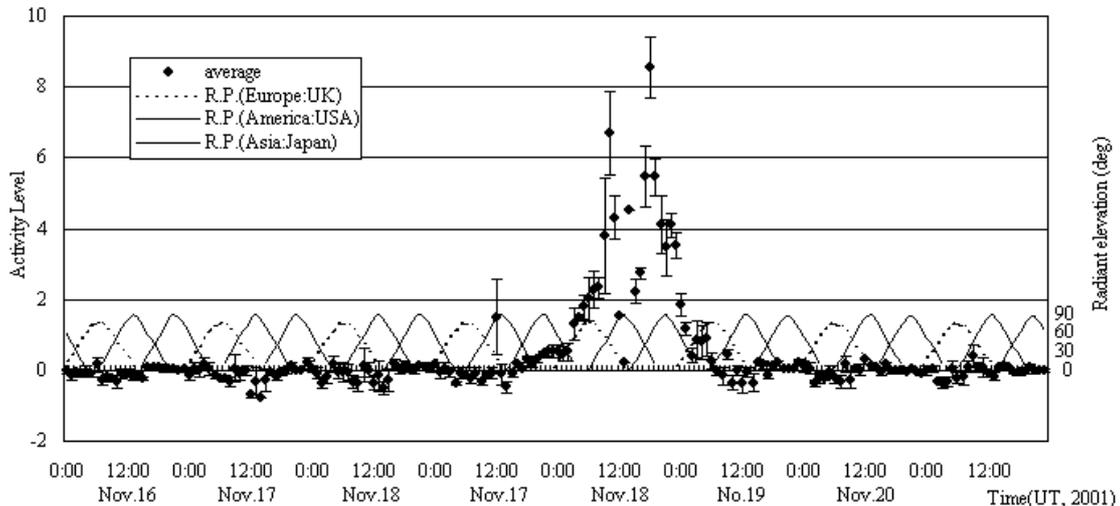
まずは, どのようにして反射時間を測定するかが問題となりました。観測グループの筑波大学情報学類(当時1年)網倉忍氏に相談し, 画像から特定の色を拾い出すソフト開発が始まりました。その結果, ある一定以上のエコー反射時間を測定するAnaFFTソフトが完成しました(右上)。そのソフトを利用して, 10dB以上, 20dB以上, 30dB以上, 40dB以上のエコー反射総時間を10分毎にそれぞれ計算処理しました。この反射総時間をReflection Timeと呼びます。

この解析方法によって, 解析が不可能だと思われていた飽和時間帯の解析も可能となり, 通常レベルの受信レベルを把握することで, 比較も可能となりました。エコーの継続時間は流星の大きさに依存しますので, 物理的にも重要なパラメーターであるといえます。

## 2. 2001年しし座流星群

### 2.1 全体の結果

2001年は日本を含むアジア, オセアニアでしし座流星群の歴史的な大出現が観測されました。以下のグラフは, その解析結果になります。縦軸がActivity Level, 横軸が時間軸で1時間毎になっています。



R.P.とは, 輻射点高度のことで, 3地域から選んでいます。明らかなピークが二つ見られます。ひとつは, 18日10時台(UT)にActivity Level =  $6.7 \pm 1.2$  となり, ひとつ目のピークを迎えました。この様子は, 本プロジェクトのアメリカからの観測速報で明らかになっていました。そして, 一度活動が下火になり再度活性化。18時台(UT)に二度目のピークを迎えActivity Level =  $8.5 \pm 0.9$  となりました。二度目のピークが日本の19日早朝(JST)に相当するものです。従って, この頃のActivity Levelは, カウントができていない地域から導いているので, 実質的にはもっと規模が大きかった可能性があります。しし座流星群活動時以外はほとんど活動がないこともしし座流星群の特徴であり, はっきりと捕らえています。眼視観測では, 国際流星機構によると, 第一ピークが18日10:39UT, 第二ピークが18:16UTとなっており, 電波観測と同じ結果となっています。これらのピークは各研究者の予報と照らし合わせると, 第一ピークが7公転(1767年)トレイル, 第二ピークが9公転(1699年)と4公転(1866年)のダストトレイルと遭遇したことになります。また, 両者のピークの半値幅(極大の半分以上の時間)は, 第一ピークが $\pm 90$ 分, 第二ピークが $180$ 分/ $240$ 分となります。ここで, 地球の公転速度を秒速30km, 彗星軌道の軌道傾斜角を163度とした場合, 第一ピーク, すなわち7公転トレイルの流星物質が濃密な部分の幅(ダストトレイル断面上)は, およそ $9.5 \times 10^4$ kmとなります。一方で, 第二ピーク, すなわち4公

転トレイルと9公転トレイルの複合ピーク幅は、およそ $2.2 \times 10^5$ kmとなり、両者のピークでは一桁の違いがあり、特に第二ピークは当初の予想よりも一桁多い結果となっています。ちなみに眼視観測から求めた1999年の大出現では $3.1 \times 10^4$ kmとなっています。このことから読みとれるように、活発な時間が非常に長く続く結果となりました。

## 2.2 第二ピークの詳細な解析

日本では、53MHzの電波観測でも飽和したために、他の周波数で観測したサイト以外は全地域で観測不能な状態に陥りました(右図)。カウントによる解析は不能であるため、Reflection Timeの解析を行いました。AnaFFTの解析結果から、20dB以上の反射総時間、30dB以上の反射総時間を求めグラフにしました。その結果を右下のグラフに示します。10dB以上の反射総時間数はほぼ飽和の状態に近く、活動評価はあまりできません。そこで今回は20dB以上と30dB以上の反射総時間から活動評価を行いました。サイトは全国各地のものを使用しています。20dB以上の反射総時間からは、明らかなふたつのピーク構造が見えます。ひとつは18:00頃を中心とするもの、もうひとつは21:00頃です。最初のピークは18:20-30にあり、眼視観測でも観測されているピークで、予報もされているものでした。半値幅は90分/+100分です。一方で、その後のピークは21:20~21:30が極大で、半値幅が45分/+40分となっています。この極大は当初の予報では全く指摘されていないピークで、新ピークではないかと指摘しました。

一度下がっている20:00UT頃に天頂効果が起こった可能性も指摘されましたが、しし座流星群の輻射点为天頂を通過する時刻は世界時で21:00~22:00となっています。従って、もし仮に天頂効果が見られるのであれば、サブピーク時も活動レベルが下がるはずですのでその可能性は低いです。

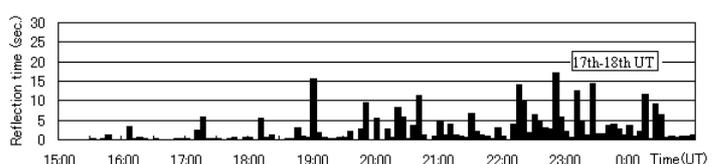
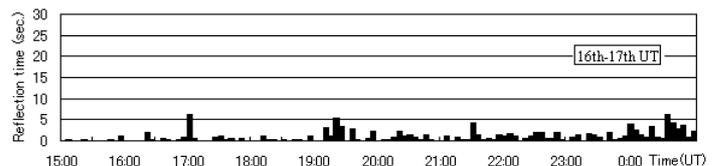
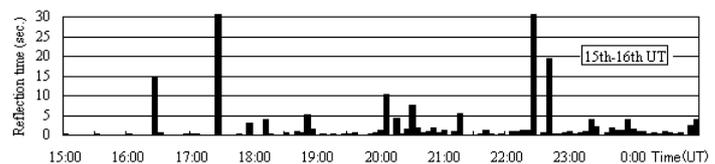
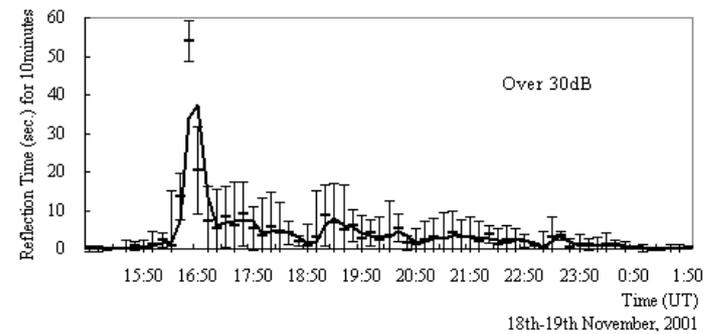
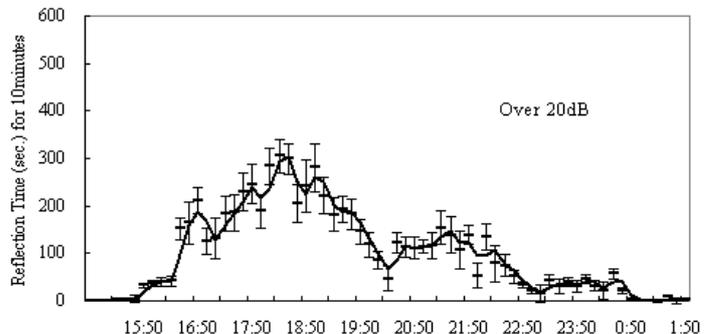
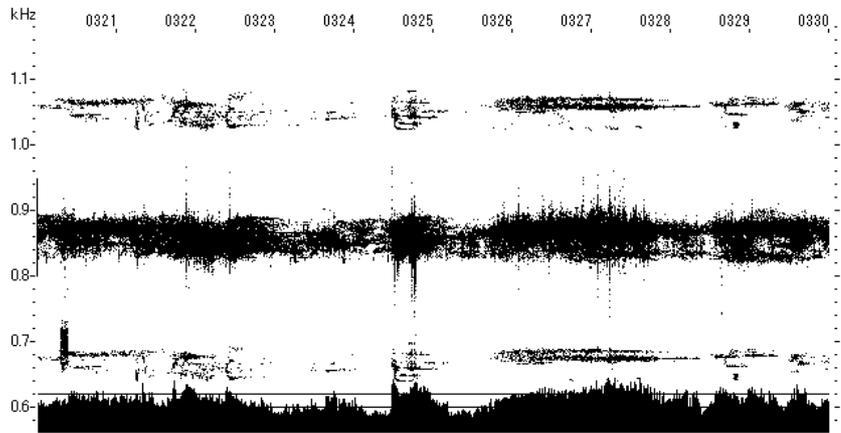
また、このReflection Timeより、右グラフのように、極大となる18日UTの前日17日UTと、15日UTには火球の出現が多くなっています。この原因は現在もまだわかっていません。何か未知のダストトレイルに遭遇したのか、偶発の産物なのか、さらなる解析・検討が必要です。

以上、2001年しし座流星群の結果をご報告させて頂きました。

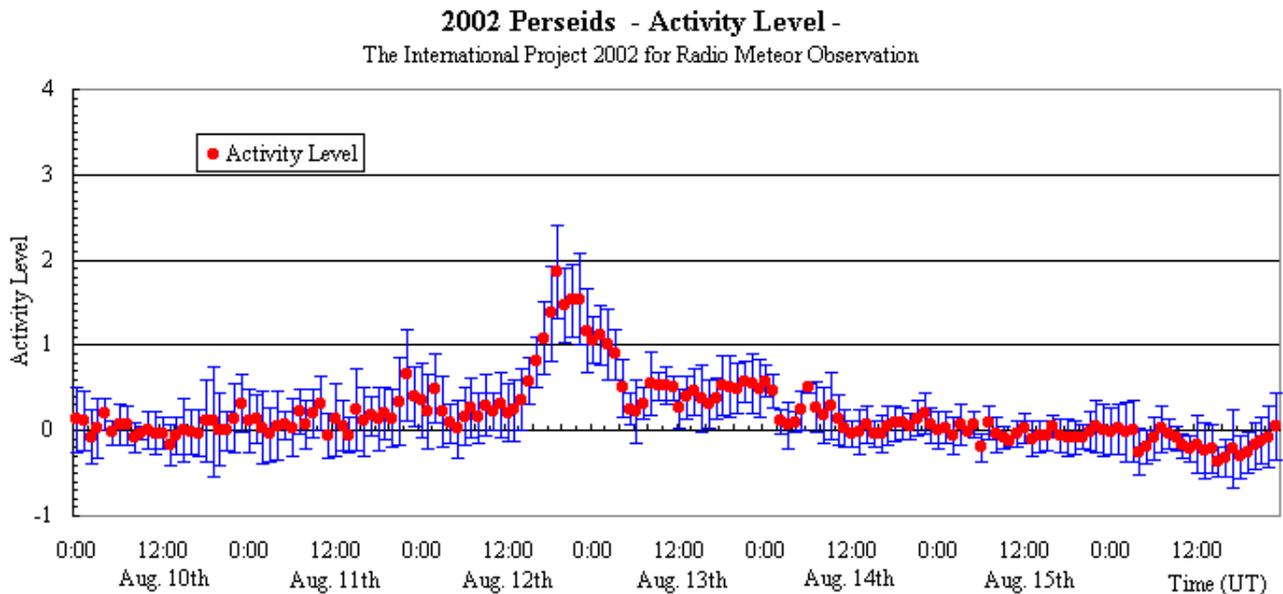
## 3. 2002年ペルセウス座流星群

しし座流星群以外の流星群でもプロジェクトを行い、基礎データを取ることを目的に実施されました。ペルセウス座流星群では、散在レベルの定義が非常に難しく、正しい評価はなかなかできませんでした。この要因として、7月末から8月頭にかけて活動す

H R O F F T      Observer : University of Tsukuba and Nagano-NCT  
 TNpro11190320.gif meteor      Receiving Location : University of Tsukuba, Ibaraki Japan (140.1E 36.1N)  
 01.11.19 03:20      0      Receiver : ICOM IC-R75  
    Receiving antenna : 2el Yagi (400m height)



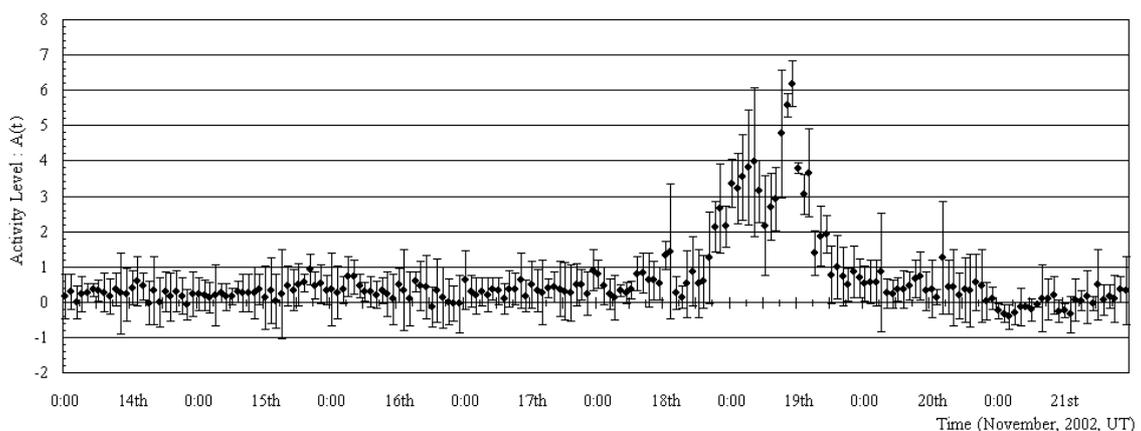
る、やぎ座流星群とみずがめ座流星群があります。これらの流星群はペルセウス座流星群と比べて対地速度が比較的遅いためか、ペルセウス座流星群よりも多い流星エコー数を観測する年があります。ペルセウス座流星群の対地速度は流星群の中で速い部類になるので、あまりエコー数は伸びません。さて、そのような中で、最終的な Activity Level の統合グラフは以下のようになりました。



ピークは、12日17時頃だった模様です。その後もヨーロッパ方面にかけて活発な活動状態が続きました。さて、ペルセウス座流星群といえば、活動期間は非常に長く、活発な活動も11日頃から14日頃まで観測されます。ところが、上記の結果からはそのような長い活動は見られません。これがおそらく、Activity Level 算出の限界なのかもしれません。あるいは、単純に散在流星を決めている期間が8月上旬なので、他の流星群や、すでにペルセウス座流星群の活動も入っていて、正しく評価されていないだけかもしれません。これは、継続観測から散在流星レベルを検討して考察する必要があります。

#### 4. 2002年しし座流星群

2002年しし座流星群においては、北アフリカとヨーロッパ、そしてアメリカ方面で極大が観測されました。全体の統合グラフは以下のようになります。

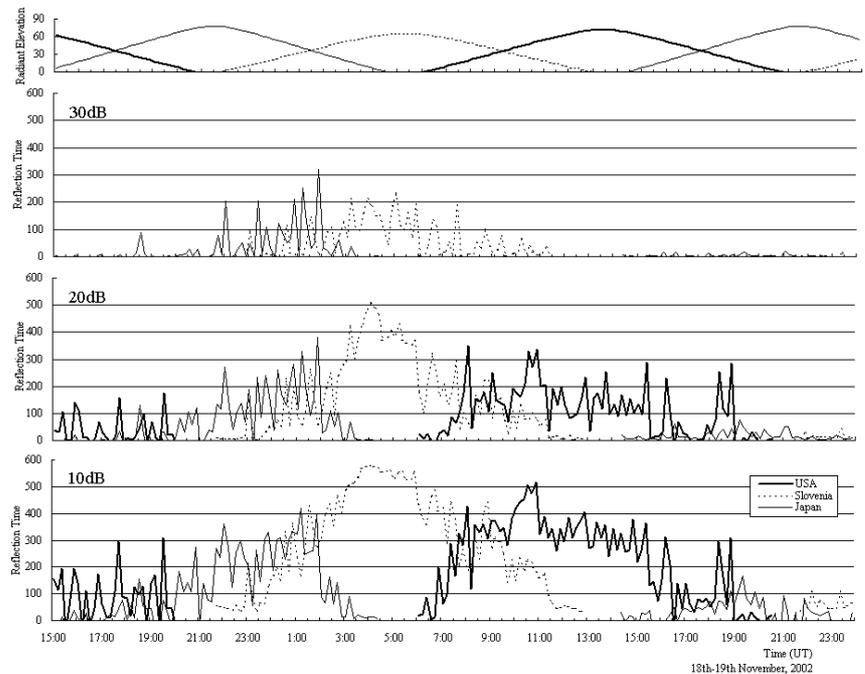


活動は、世界時で18日18:00頃から活発化し始め、日本からヨーロッパにかけて第一ピークの全体像を捕らえており、ヨーロッパからアメリカにかけて第二ピークの全体像を捕らえています。第一ピークの極大は19日4時台 UT で Activity Level =  $4.0 \pm 2.1$  と おおかたの予報通りの結果となっています。また第二ピークの極大は19日11時台 UT、Activity Level =  $6.2 \pm 0.6$  ですので、こちらもほぼ予報通りの結果となりました。活動レベルとしては第二ピークの方が高い結果となっていますが、第一ピークはサイトによって飽和しているところもあり、カウント値にばらつきが見られます。そのた

めにエラーバーが大きくなっており、この値は前後する可能性があります。

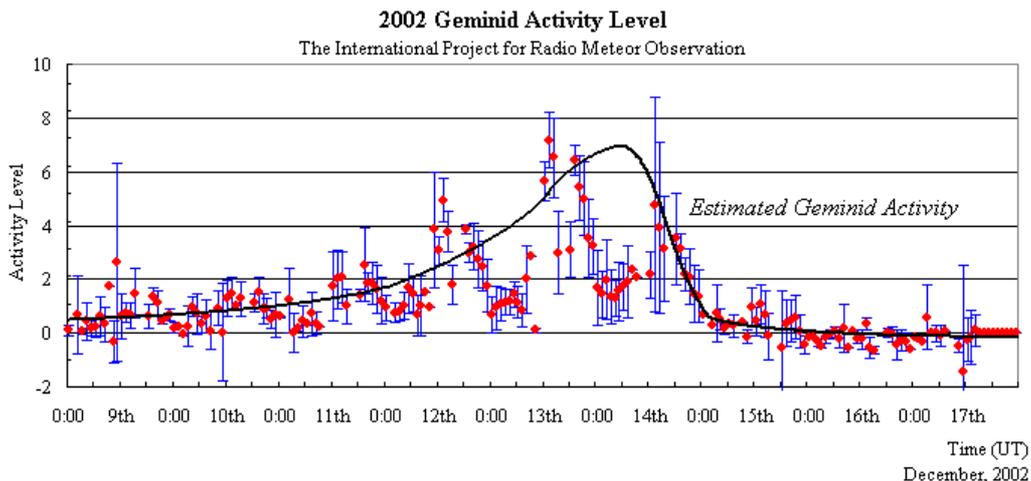
さて、2002 年は海外でも HROFFT を使用しているサイトが増えたため、2001 年に日本のデータで行った Reflection Time の解析をすることができました。その結果を右に示します。下から 10dB, 20dB, 30dB で、一番上は輻射点高度を示しています。日本は小林正幸さん(秋田)のデータを、ヨーロッパは Jure さん(スロベニア)、アメリカは Jeff さん(コロラド州)のデータをそれぞれ使っており、散在レベルは除いてあります。この結果から見ると、明らかにヨーロッパの方が飽和度が高いと言えます。Activity Level とは違ったことも読みとれます。ヨーロッパは継続時間が長い流星が多かった可能性もあります。もちろん、単純に流星数が多かったのかもしれません。火球の発生度は、ヨーロッパの方が高かったのかもしれません。さてこの結果は 10 分毎に集計していますので、それぞれの極大時刻を見ると、第一ピークは 19 日 4:10~4:20UT に、第二ピークは 10:40~11:00UT となります。日本の結果はその立ち上がりの裾を補強する結果となりました。また、アメリカのピークの後になかなか活動レベルが下がらないことも非常に興味深い結果です。

2002 年も 2001 年同様活発な活動が観測され、興味深い結果をもたらしました。



## 5. 2002 年ふたご座流星群

しし座流星群に引き続き実施することになりましたが、この流星群はこれまでと異なって、対地速度が遅めの流星群に対しての取り組みとなりました。従って Activity Level のグラフは、アンダーダンスエコーの補正が含められず、ふたご座流星群の活動としてみると、いささか不自然に思えます。以下がそのグラフです。



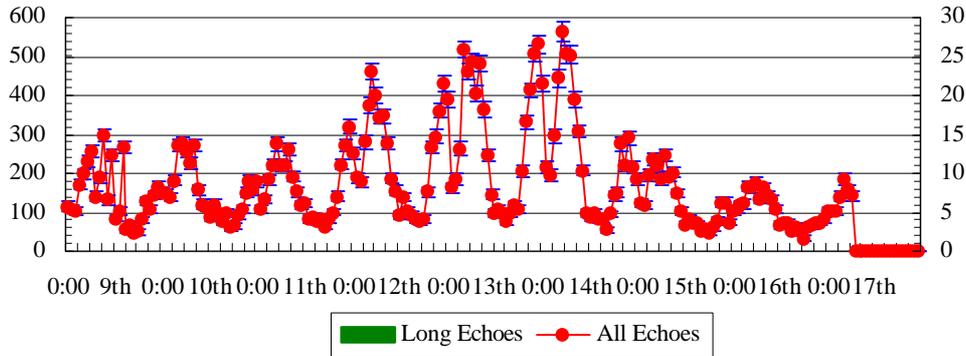
輻射点高度の制約を通常は  $0^\circ < h < 75^\circ$  ですが、今回は  $0^\circ < h < 70^\circ$  にしてみました。それでも活動レベルが正しく評価されず、やはり対地速度が遅い流星群に対しては、反射メカニズムを考慮した補正が必要であると痛感しました。Estimated Geminid Activity の線がおそらくふたご座流星群の活動レベルを示しているとは思いますが、現状ではなかなか正しい評価をするのは困難です。ともあれ、活動自体は 10 日頃から徐々に見え始め、12 日頃にはかなり活発化してきていました。そして 14 日になぜレベルが下がっているのかがわかりませんが、現状では世界時間で 13 日 15 時頃に極大であったとなります。しかし、Estimated Geminid Activity では、世界時で 14 日 6 時頃となります。この結果は初期成果ですので、今後さらなる解析に期待しましょう。

また、しし座流星群より始まった 28MHz の観測では、53MHz では顕著に見られる天頂効果があまり見られないこと

も不思議な結果のひとつです。アンダーデンスエコーの場合、使用する周波数によって、ハイトシーリング高度が異なります。通常、28MHz の電波の方がより高高度の流星、すなわち、暗い流星を観測することができます。従って、28MHz で天頂効果が顕著ではないと言うことは、53MHz で受信されなくて 28MHz で受信される暗い流星の数は少ないと言うことになります。また、28MHz ではエコー数があまりに多くて、しし座流星群の再現のようにエコーカウントが不能となりました。

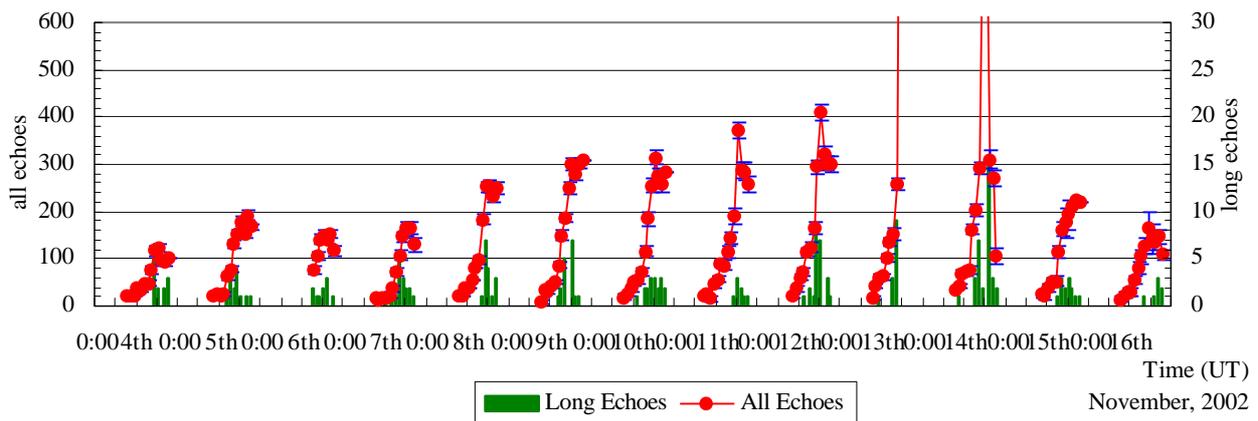
### 2002 Geminids at UK - 55.25MHz - (by Dave Swan)

The International Project for Radio Meteor Observation - 2002 Geminids -



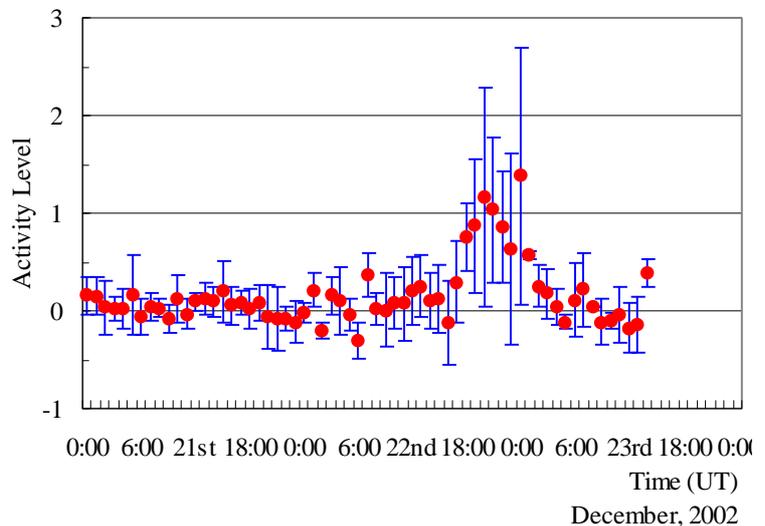
### 2002 Geminids at Aichi, Japan - 28.208MHz - (by Yasushi YOSHIKAWA)

The International Project for Radio Meteor Observation - 2002 Geminids -



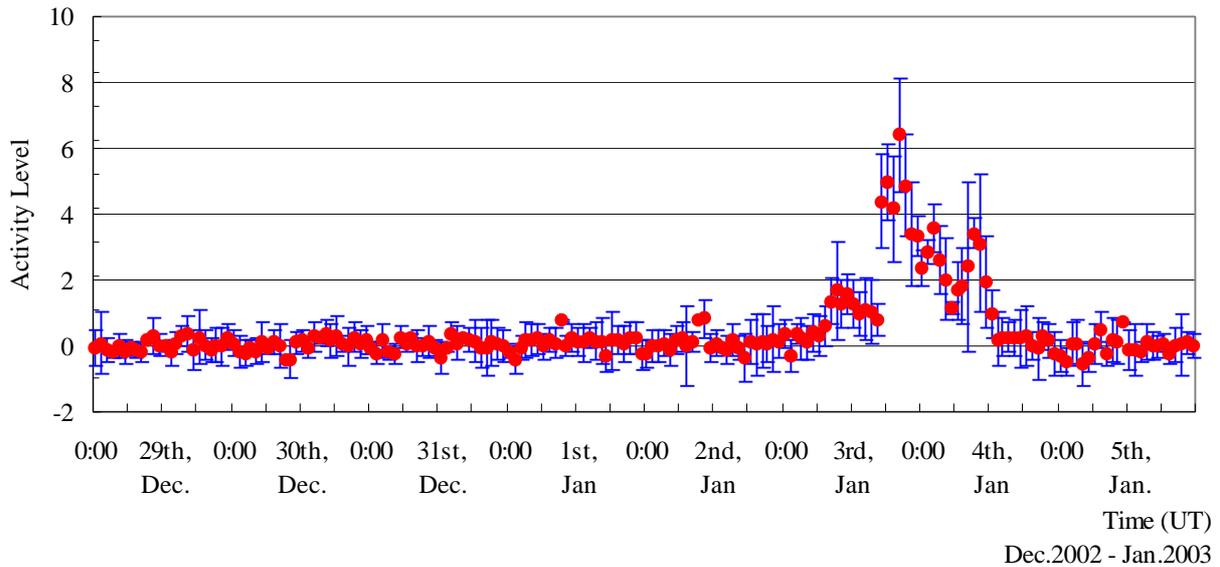
## 6. 2002 年こぐま座流星群

フィンランドの Esko Lyytinen 氏らによって、2002 年にこぐま座流星群が活発な活動を見せる可能性が示唆されました。本来このプロジェクトではこぐま座流星群の観測を予定していませんでしたが、この突発の可能性を探るためにプロジェクトを臨時に行いました。右グラフが統合グラフになります。当初の予報では 22 日 19 時 UT 頃と、21 時 UT 頃でした。ほぼ予報通りに出現が観測されています。しかしながら、この出現を捕らえたのは主にヨーロッパの各地点で、日本では一部の地域でのみ、この突発の様子が観測されました。日本ではこの時間帯の輻射点高度は決して低くはありません。非常に不思議な結果です。



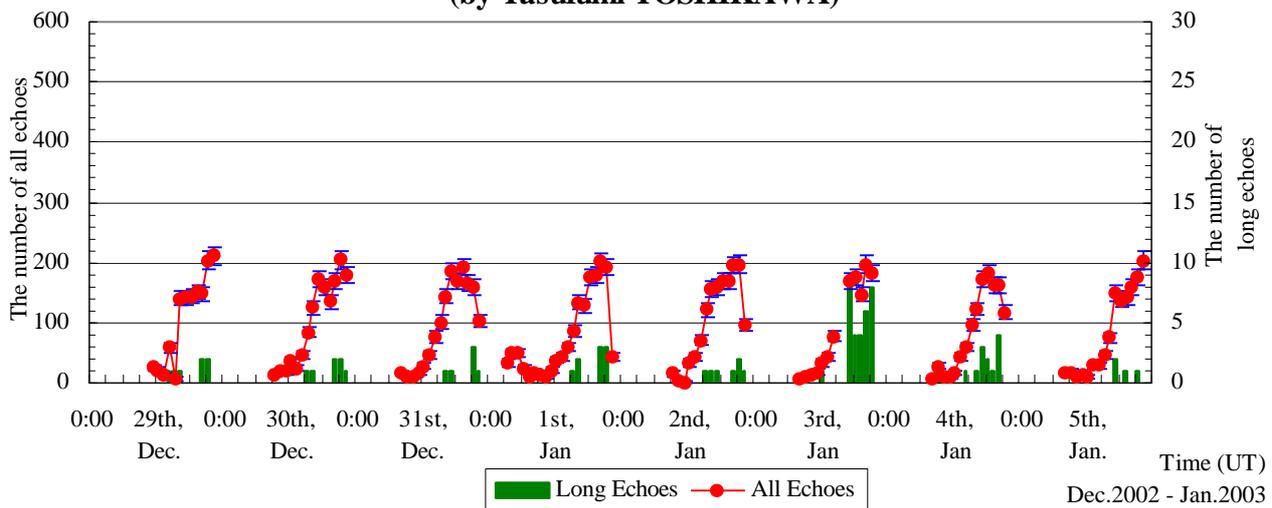
## 7. 2003 年しぶんぎ座流星群

本プロジェクトのフィナーレを飾ったのが、しぶんぎ座流星群です。統合グラフは以下のようになっています。



しぶんぎ座流星群はピークが鋭く出る流星群です。極大予報時刻が3日23時UT頃と流星電波観測にとっては日本からヨーロッパにかけて最高条件となりました。極大は3日20時UT頃だった模様で、ピークの前よりも後の方が活発な活動が続いたようです。極大時の Activity Level は  $6.4 \pm 1.7$  となっています。活動自体は例年並みか例年よりやや低めの結果となりましたが、ロングエコーも受信され、主要流星群らしい活動を見せました。日本の 53MHz をはじめ、各地の結果からは明瞭なピークを得ていますが、28MHz の電波観測ではなぜかピークが観測されませんでした。実に奇妙な結果となりました。53MHz で観測できず 28MHz で観測されたのであれば理由は明確ですが、今回のように反対である場合、実に奇妙です。まして、ふたご座流星群の時は増加傾向自体はあるのですが、しぶんぎ座流星群にはそれすらも顕著に見られません。

### 2003 Quadrantids at Aichi, Japan - 28.208MHz - (by Yasufumi YOSHIKAWA)



上の結果は、愛知県名古屋市で 28MHz の観測を行っている、吉川泰史氏の観測結果です。棒グラフが 20 秒以上継続するエコー“Long Echo”の数です。昼間にデータがないのは、昼間に直接波が強く観測されるため、カウントできないからです。他の、28MHz 地点のほとんどで同じような傾向になっています。香川県の芋側正明氏が行っている 28MHz の観測では、ピークが観測されていますが、それ以外はほとんどピークらしいものはありません。この理由は地域性なのかかもしれません。ピークが見えないのは、愛知や東京、茨城の送信局の東に当たりますが、香川は送信局から見ると西側に当たるのが理由かかもしれません。現状でこの現象を解くカギは見つかっていません。

### 3. まとめ

本プロジェクトより、多くの成果を得ることができました。今回この誌面上で示したものはその氷山の一角に過ぎません。まだまだ多くの謎があり、解析する必要があります。海外の結果も豊富に報告されるようになり、まさに世界中のデータがひとつに集約され、速報・ライブとしても提供できるようになりました。みなさまのおかげですばらしい観測プロジェクトとなりました。

まだまだ解析の余地がたくさん残されています。みなさんも観測データを用いて是非、解析してみてください。冰山全体を解析すればもっともっとすごいことがわかると思います。

これらのデータは和歌山県みさと天文台のサーバーに保存し、公開しています。どなたでもダウンロードできます。プロジェクト参加者の皆さんは、データ引用・使用は自由となっています。しかし、是非使用した際は観測者に教えてください。きっとその観測者にとってもそれが励みになると思います。参加者以外の方は無断でのデータ引用ならびに使用は禁止しています。その際はプロジェクト運営スタッフまでご連絡ください。

公開サーバーURL：(変更の可能性があります、変更された際は以下のライブラリーページからどうぞ)

<http://203.141.15.20/AMRO/>

流星電波観測国際プロジェクトデータライブラリー：

[http://homepage2.nifty.com/~baron/amrodatabase\\_j.htm](http://homepage2.nifty.com/~baron/amrodatabase_j.htm)

### 4. さいごに

本解析を進める上で、多くの方からのご助言をいただきました。誠にありがとうございました。また、データを提供してくださったみなさま、参加・ご協力頂き誠にありがとうございました。これらの結果は貴重なデータになるでしょう。みなさんも是非この氷山の解析に挑戦してみてください。そしてまた次回の収録に投稿をしてみてください。