

## 前方散乱方式を用いた流星電波観測におけるエコー強度の測定

中島 拓 (日本流星研究会)

臼居 隆志、矢口 徳之 (AMRO-NET)、小川 宏 (日本流星研究会)、前川 公男 (福井高専)、中村 卓司 (京大 RASC)、高野 秀路 (国立天文台)

### 概要

現在の流星電波観測では、流星エコー数をカウントする場合、一定の受信強度以上のエコーをカウントすることが一般的である。しかし、この一定値は観測者によって様々であり、使用している受信機の NF や受信アンテナの利得、背景雑音によっても変わってくるが、実際に何 dBm の電力の流星エコーを受信したかを較正している観測サイトはほとんどなかった。そのため観測結果が観測者の主観に大きく依存し、観測サイトによってエコー数が何倍も異なるなど、複数の観測サイト間における流星エコー数を単純に比較できないなどの課題となっている。

今回我々は、受信機の感度、ケーブル損失、アンテナ放射パターンが既知の受信システムを野辺山宇宙電波観測所内に設置し、53MHz と 145MHz の二つの周波数において、流星エコーの受信電力を測定することに成功した。本発表では、観測システムの較正方法、観測結果、今後の課題と展望などについて述べる。

### 流星電波観測 (HRO) について

#### HRO とその問題点

HRO (Ham-band Radio Observation) は、アマチュア無線の電波を利用した、前方散乱方式の流星電波観測である (Fig1-1)。この方式では、電波の送信局と受信局 (観測地) が異なるため、多くの受信局を広範囲に展開できるという利点を持つ。

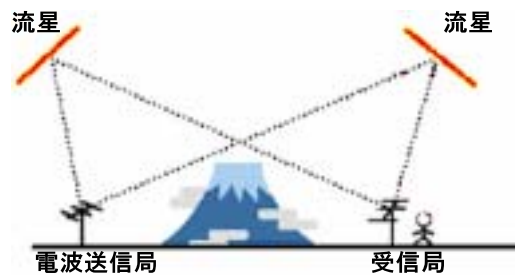
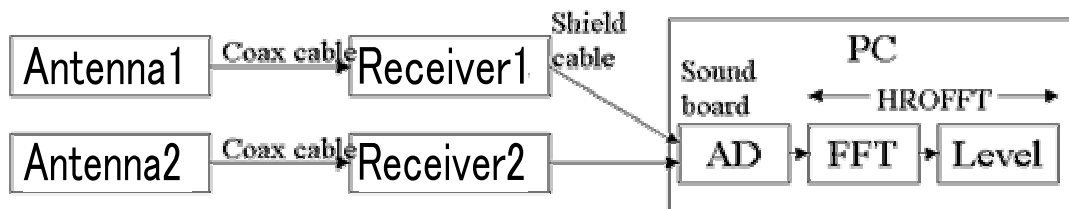


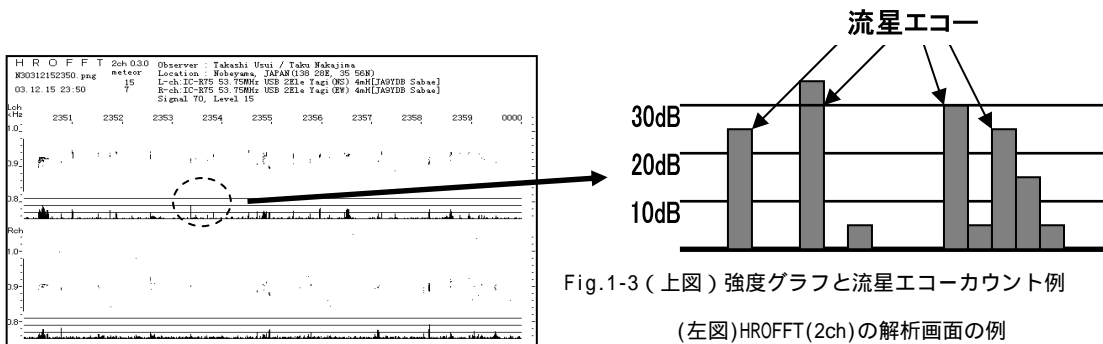
Fig1-1 前方散乱方式の流星電波観測

現在、日本では HRO が大規模な流星観測網を形成しており、これらの観測結果を共有・統合

することによって、流星あるいは流星群の巨視的な研究に繋がると期待されている。

受信局での測定系は、アンテナ、ケーブル、受信機、PC を使用する。PC 内では Windows 上で実行される HROFFT というソフトウェア (春日部工業高等学校の大川一彦さんが開発) によりデータを収集する。Fig.1-2 は、今回使用した受信設備である。





HROFFT の 画面下部にある強度グラフは、指定した周波数範囲内の最大強度を表示している。グラフの1目盛りは10dBであり、この10dBを超えた流星エコーの数を時間ごとに集計し、HRを求める手法が観測の主流である (Fig.1-3)。しかし、この強度はノイズレベルとの相対値を示しているため、カウントする閾値となる強度は観測者によって様々であり、使用している受信機のNFや受信アンテナの利得、背景雑音によっても変わってくる。

従って、都市の中心のように人工的なノイズレベルが高い観測点で流星エコーがカウントされた (例えば1時間に数個という) データと、郊外の静穏な観測点で得られた (例えば1時間に数十個という) データが単純に統合されると、流星群の活動などが正しく評価されない可能性があると考えられる。

### 研究の目的

今回我々は、受信局で用いる受信機の感度、ケーブル損失、アンテナ放射パターンを測定し、53MHzと145MHzの二つの周波数において、受信アンテナから取り出された流星エコーの強度を測定した。その結果から、受信システムの較正方法の確立を目指し、異なる観測点のデータを統合して扱う方法、流星群の性質を調べる可能性について検討した。

### 観測システム1 (送信設備)

福井県鯖江市にある福井工業高等専門学校のJA9YDB 福井高専電波研究会 (代表: 前川公男さん) から送信されている53.75MHzの電波のほかに、長野県池田町からJH0WJF 矢口徳之さんが送信する、53.90MHz、145.75MHzでの観測を行った。

表 1-1 送信局データ

	JA9YDB (福井県鯖江市) 53.75MHz	JH0WJF (長野県池田町)	
		53.90MHz	145.75MHz
7/21-8/5	2 素子クロス八木,天頂向き,50W ↓	HB9CV,天頂向き,100W	5 素子八木,天頂向き,80W
8/5-8/10		休止	休止
8/10-8/17		HB9CV,天頂向き,100W	5 素子八木,天頂向き,80W
12/11-12/20		2 素子八木,天頂向き,100W	2 素子八木,天頂向き,100W
12/20-現在		休止	休止

## 観測システム 2 (受信設備)

受信設備は、国立天文台の高野秀路さんの協力を得て、日本でも屈指の電波環境を誇る「野辺山電波観測所(長野県南牧村)」内に設置した(Fig.1-4,1-5)。観測は2003年7月下旬~8月中旬、11月下旬~2004年3月下旬の二回に分けて行われ、現在も観測中である。

機材は、観測内容によって変更があるが、基本的には53MHz帯受信用の2素子アンテナが3本と145MHz帯受信用の八木アンテナが1本、同軸ケーブル、レシーバーあるいはアマチュア無線機、PCを使用した。解析ソフトには、「2ch HROFFT0.3.0」と「HROFFT0.7.1」を用いた。詳細は表1-2のとおりである。



Fig. 1-4



Fig. 1-5

表 1-2 受信局データ

	RX-1 (HRORX1a)	RX-2 (HRORX1a)	RX-3 (TS-690S)	RX-4 (IC-706)	RX-5 (IC-R75)	RX-6 (IC-R75)
7/21-8/5			53.90 受信 HB9CV(EW)	145.75 受信 5素子八木(EW)	休止	休止
8/5-8/10	53.75 受信 HB9CV(NS)	53.75 受信 HB9CV(EW)	休止	休止	休止	休止
8/10-8/17			53.90 受信 HB9CV(EW)	145.75 受信 5素子八木(EW)	休止	休止
11/28-12/10	休止	休止	休止	休止		
12/10-12/20	休止	休止	53.90 受信 2素子八木(八ヶ岳)	145.75 受信 2素子八木(八ヶ岳)	53.75 受信 2素子八木(NS)	53.75 受信 HB9CV(EW)
12/20-12/27	休止	休止	休止	休止		
12/27-1/9	休止	休止	休止	53.75 受信 2素子八木(NS)		
1/9-現在	休止	休止	休止	53.75 受信 2素子八木(EW)	53.75 受信 2素子八木(EW)	

括弧内はアンテナのエレメントの向きを表す(EW;東西、NS;南北、八ヶ岳;八ヶ岳向き)

## 電波の伝搬経路と電力損失

### (1) 流星での反射

送信アンテナからの電波は、流星で反射して、受信アンテナに至る間に伝搬損及び反射損により電力が減衰する。送信電力に、送信アンテナの当該方角における利得を乗じ、伝搬損及び反射損を除いた電力が受信アンテナに届く。

### (2) 受信アンテナ

受信アンテナは、電波の到来角度に応じた利得を持っており、到来電力に利得が乗じられた信号電力が、アンテナ端子から同軸ケーブルに供給される。受信機の入力端子に現れる電力は、到来電波の電力に、アンテナ利得及び同軸ケーブルの損失を乗じた値となる。

Fig.2-1 に、今回使用した 145.75MHz 用の自作 2 エレ八木アンテナの放射パターンを示す。

53.75MHz もほぼ同じ寸法比で作成したので、同じ放射パターンとなる。但し地面の影響により Fig.2-2 のようにサイドローブを生じる。

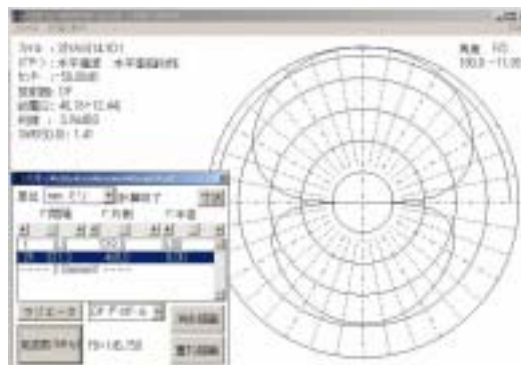


Fig.2-1 自作八木アンテナの水平放射パターン

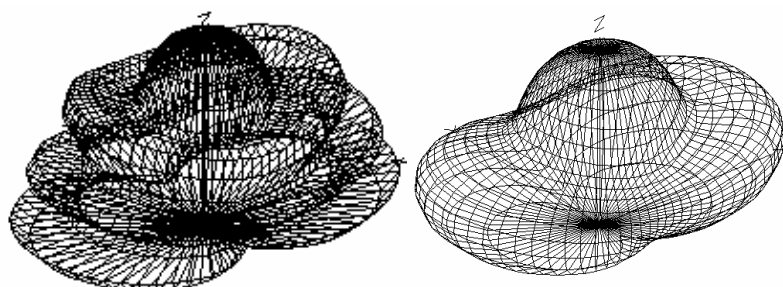


Fig.2-2 自作八木アンテナの 3 次元放射パターン (EZNEC で計算)

左 ; 3.3mH 145.75MHz

右 ; 3.3mH 53.75MHz

### (3) 受信機

受信機に入力された信号は周波数変換され、約 900Hz の信号が受信機音声出力端子から取り出される。受信機入力端子から音声出力端子までの間の受信機の利得が乗じられる。音声出力端子からはシールドケーブルにより PC に接続される。PC の入力インピーダンスに応じた電圧が、PC 内の AD コンバータによりデジタル信号に変換される。サンプリングレートは 8192Hz である。

### (4) PC

PC 内では HROFFT によりデータを収集する。信号振幅は 0.5 秒間で 4096 サンプルあり、これを 4096 ポイントの FFT で周波数軸上に表現される。すなわち、FFT 結果は、周波数分解能 2Hz、時間分解能 0.5 秒である。表示の都合上 FFT 結果のうち、900Hz 前後の周波数範囲を表示している。また、横軸は 1 ピクセル 1 秒で、0.5 秒の FFT 結果の 2 つのうち、強度

の強い方を表示している。また、画面下部の強度グラフは4096ポイントのFFT出力のうち、指定範囲（例えば700～1100）内の最大強度を表示している。

## 感度較正について

### 受信システムの感度較正方法

HROFFTの強度グラフが10dBを示すときの、受信アンテナ端における信号電力を求めた。

ここでは、標準信号発生器（SG）を用いて受信機に既知レベルの電力を入力して行った。Fig.2-3のように、受信機にSGとアッテネータ（ATT）を接続し、ATTを調整してHROFFTの強度グラフが10dBとなるときの受信機入力電力を求める。これに、ケーブル損失を補正する（Fig.2-4）。

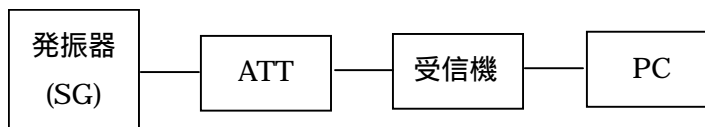


Fig.2-3 受信機系の感度較正の接続図

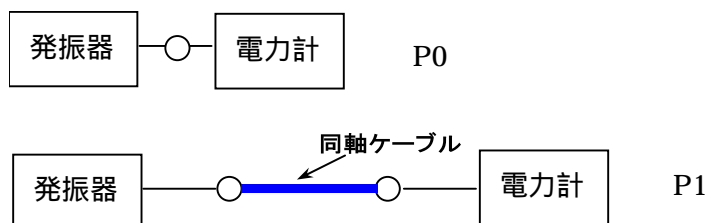


Fig.2-4 同軸ケーブル損失の測定方法 (P1-P0)

・測定例：53.75MHz (ICOM IC-R75)

アンテナ端	-140.0dBm	換算結果
ケーブルロス	1.5dB	Fig.2-4 で測定
受信機端	-141.5dBm	Fig.2-3 で測定
HROFFT 強度グラフ	10.0dB	測定の基準

### 較正結果

表 2-1 受信機感度結果 ( IC-706 は室外ブースタを使用した )

観測受信機	受信機	感度 [dBm]	測定周波数
RX-1	HRO RX1a	-139	53.75MHz
RX-2	HRO RX1a	-139	53.75MHz
RX-3(夏)	TS-690S	-140	53.90MHz
RX-3(冬)	TS-690S	-139	53.90MHz
RX-4(夏)	IC-706	-141	145.75MHz
RX-4(冬)	IC-706	-151	145.75MHz
RX-5	IC-R75(1)	-140	53.75MHz
RX-6	IC-R75(2)	-140	53.75MHz

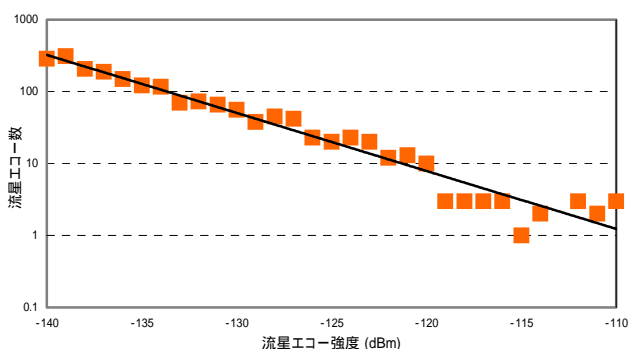
## 流星エコー強度測定について

### 流星エコー強度の換算

HROFFT で得られた解析画像の強度グラフから、筑波大学の網倉忍さんと臼居隆志さんによって開発された「levelcount」を使って流星エコーの強度を測定した。得られた受信機感度によって、これを絶対強度に換算することができる。

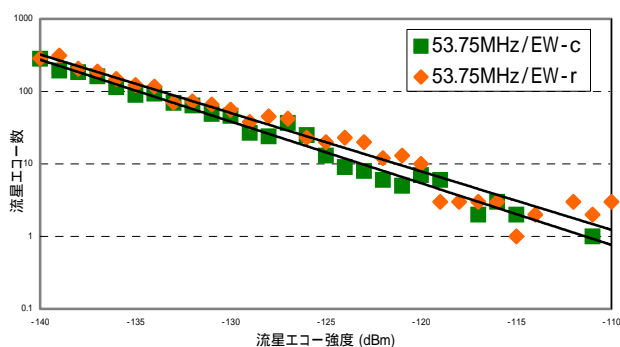
### 流星エコーの強度分布と比較

#### (1) 1 サイトにおけるエコー強度分布



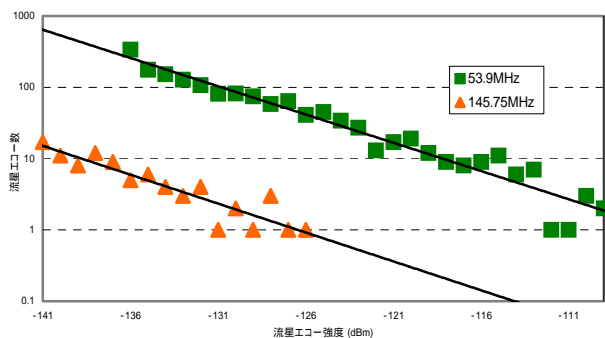
観測日 ; 2004年1月19日 00:00 ~  
2004年1月20日 23:59  
周波数 ; 53.75MHz  
アンテナ ; HB9CV(EW)  
エコー数 ; 1914 個

#### (2) 同サイト、同周波数、近接アンテナ (6m 間隔) での分布比較



観測日 ; 2004年1月19日 00:00 ~  
2004年1月20日 23:59  
周波数 ; 53.75MHz  
アンテナ ; HB9CV(EW) / 2素子八木(EW)  
エコー数 ; 1914 個 / 1520 個

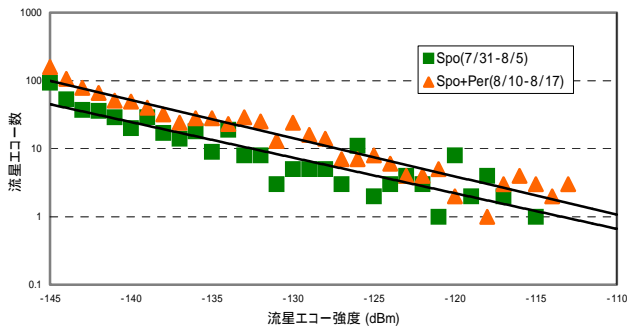
#### (3) 同サイト、異周波数、同アンテナパターンでの分布比較



観測日 ; (53.90MHz)  
2003年12月16日 00:00 ~ 12:00  
(145.75MHz)  
2003年12月16日 00:00 ~ 20日 09:00  
周波数 ; 53.90MHz / 145.75MHz  
アンテナ ; 2素子八木(八ヶ岳) / 2素子八木(八ヶ岳)  
エコー数 ; 1528 個 / 88 個

## 流星群での強度分布と比較

### (1) ペルセ群の活動時と散在流星の分布比較



観測日 ; (ペルセ群)

2003年8月10日 21:50 ~ 17日 09:20

(散在)

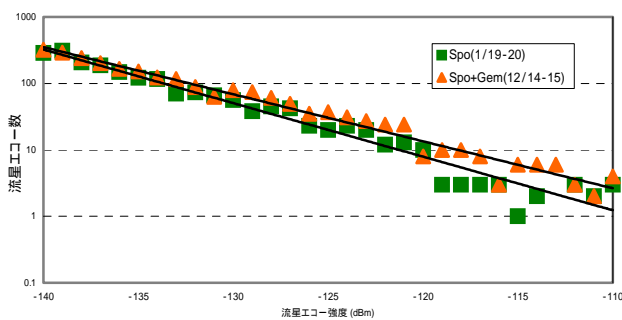
2003年7月31日 16:40 ~ 8月5日 23:00

周波数 ; 145.75MHz

アンテナ ; 5素子八木(EW)

エコー数 ; 864個 / 452個

### (2) 双子群の活動時と散在流星の分布比較



観測日 ; (双子群)

2003年12月14日 00:00 ~ 14日 23:59

(散在)

2004年1月19日 00:00 ~ 20日 23:59

周波数 ; 53.75MHz

アンテナ ; HB9CV(EW)

エコー数 ; 2,267個 / 1,914個

## 受信電力分布シミュレーションとの比較

レーダー方程式(式3-1)からアンダーデンスエコーの  $t=0$  (電離柱の初期半径 1m) のときに、位置  $(x,y,z)$  にたまたま反射条件の角度を満たす流星が流れたときに、その受信電力がいくつになるかを求めた。計算の条件は、表3-1のとおりである。

表3-1 計算に使用した条件

反射範囲	最もエコーが強くなる角度とした ( $\alpha=90\text{deg}$ 、 $\beta=0\text{deg}$ )		
送受信間距離	送受信点間の midpoint を中心として $\pm 500\text{km}$ の正方形の範囲とした (1000km 四方の正方形領域)		
高さ	200km	送信アンテナ利得	0dBi (等方的)
送信電力	100km (一定)	受信アンテナ利得	0dBi (等方的)
	100W	電離柱の初期半径	$r_0 = 1\text{m}$

$$Pr_x = \frac{PtGtGr\lambda^3 Q^2 r_e^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 RtRr(Rt + Rr)(1 - \cos^2 \beta \sin^2 \phi)} \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \phi}\right) \quad (\text{式 3-1})$$

$R_t$  : 送信点より反射点までの距離,  $R_r$  : 反射点より受信点までの距離,  $TR$  : 送受信点間の距離

53.75MHz と 145.75MHz の計算結果は Fig.3-1 のとおりである。、 は、最もエコーが強くなる角度をとったので、受信電力の最大値を示している。この結果から、53.75MHz において、受信電力は -125dBm ~ -153dBm の範囲となり、観測結果と大きく矛盾しないことが確かめられた。観測結果でこの最大値を超える強度のエコーがあるのは、ここで仮定した

線電子密度 ( $10^{14}\text{m}^{-1}$ ) がそれ以上のもの、すなわちオーバードンスエコーであると思われる。また、145MHz は非常に狭い範囲を観測しており、さらにアンダーデンスエコーはその強度から、受信できないことがわかった。

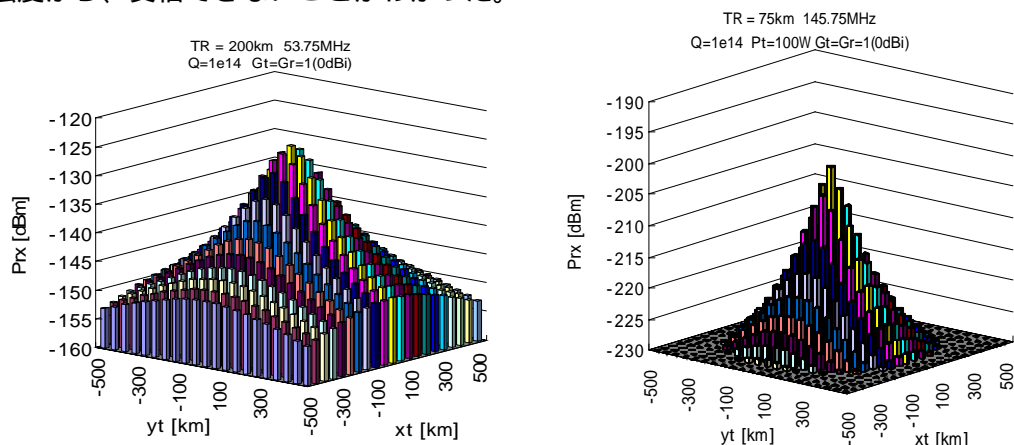


Fig.3-1 アンダーデンスエコーの  $t=0$  における受信電力 (左 ; 53.75MHz, 右 ; 145.75MHz)

## 結果と今後の展望

### 結果

受信点で用いられる測定系の感度を較正することで、これまで背景雑音レベルからの相対強度しかわからなかった流星エコーの受信強度の絶対値を測定した。そして、散在流星の受信強度から個々の受信システムでの強度分布が求められ、それは指数関数的であった。また、アンテナが 6m 離れた受信システムによって得られた分布関数との違いはほとんどないことがわかった。さらに、放射パターンがほぼ等しいアンテナを用いた多周波数の観測結果比較、群流星と散在流星の分布関数の比較などが可能であることが分かった。なお、流星エコー強度の測定値は、レーダー方程式による計算結果と矛盾しないことを確かめた。

### 今後の展望

今後、全国の受信点にある受信システムを同様の手法で較正することにより、流星エコー数や流星エコー強度を正規化できれば、解析時の閾値レベルを揃えられる。その結果、観測サイト間のデータの統計処理のほか、流星群のピークのより正確な決定ができるが、ここではアンテナの放射パターンの規格化が必要である。また、流星エコーの到来方向が不明であるという課題はあるが、多周波数での観測から得られる強度分布の違いや、強度分布シミュレーションとの比較などから、電波流星の性質を研究できる可能性がある。我々は、今回の成果を今後 HRO での干涉計システムの実現に応用していきたいと考えている。

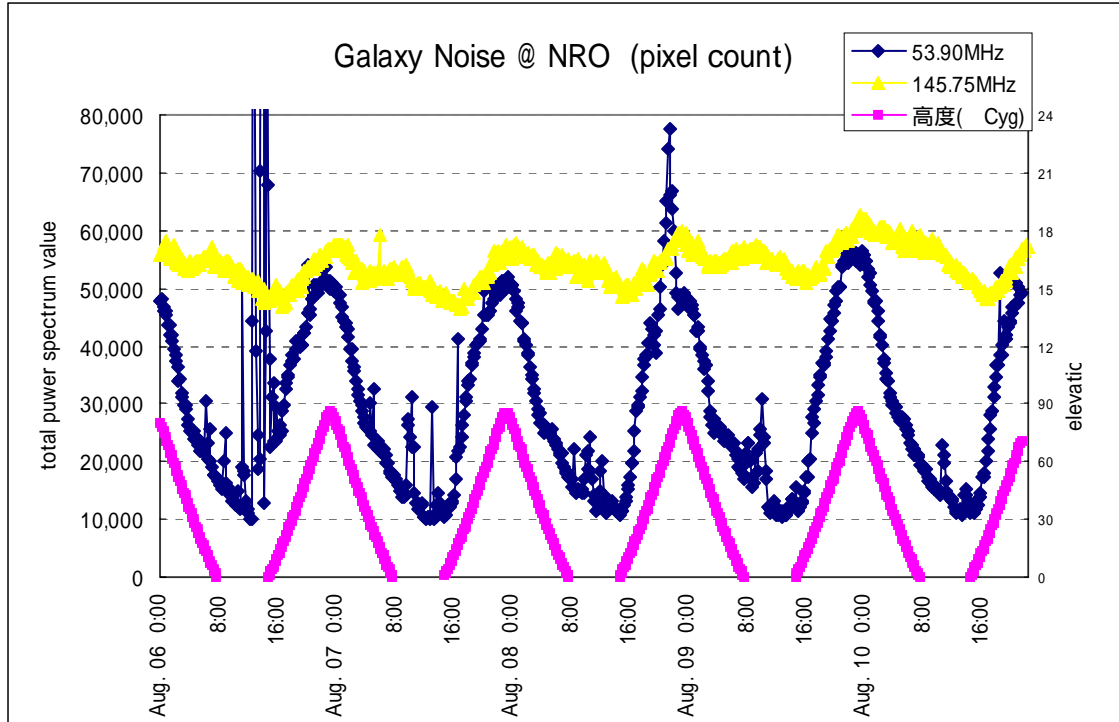
### 参考文献

- 「流星バースト通信」福田 明著 (コロナ社)
- 「流星電波観測ガイドブック」中村 卓司監修 / RMG 編集委員会編著 (CQ 出版社)



資料

(1) 野辺山電波観測所での銀河電波



(2) 受信可能エコー数の受信機感度依存(1日)

