

# 流星電波観測における反射領域の議論

A Reflection Area of Radio Meteor Observation

## 1. 流星電波観測のできることとできないこと

流星は、地球大気に突入すると、周辺大気をプラスのイオンと自由電子とに電離させ、それぞれの密度が周辺に比べて高くなる。自由電子には超短波帯の電波を散乱させる性質があるため、大気における自由電子密度の上昇は、超短波帯電波の散乱を引き起こす。従って、流星の出現によって、超短波帯の電波が散乱させられるという現象が起きる。これが流星電波観測(Radio Meteor Observation)である。この事から流星以外のイベント(太陽活動)などで大気の電子密度が上昇しても電波は散乱されることになる。

流星電波観測は、電波を利用することから、光学観測にはない大きなメリットがある。それは、昼夜・天候に関係なく観測が可能という点である。この点は、流星群活動を知る上でひじょうに大きな武器となる。またこの観測では観測データがほぼリアルタイムで視覚化されるため、流星活動モニターとしても大きな威力を発揮する。これまでもし座流星群などの周期流星群、ペルセウス座流星群などの主要流星群、そして何度か突発流星群も捕らえ、流星電波観測の流星界における地位は確立しつつある。

ところが一方で、流星電波観測には決定的な弱点が現時点では存在する。それは観測している流星現象がどこで起きているかわからない、つまり、流星そのものの情報が収集できないということである。観測されている流星エコーが群流星なのかどうか、流星数の増加がどの流星群によるものなのか、これらを推測することはできても断言することは現状不可能である。従って極端な例では、ふたご座流星群の時期において、流星数のピークが出たからといって、それがふたご座流星群によるものだと断言できないのである。

物理量が測定しきれていない現状を何とか打開したいところである。

## 2. アンダーデンスエコーは電波を鏡面反射させる

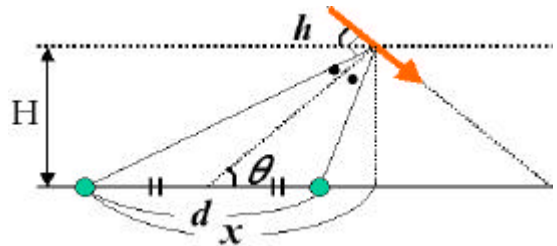
流星エコーには、線電子密度が  $10^{14}[1/m^3]$  を境界として、それよりも電子密度が濃いオーバーデンスエコー(Overdense Echo)とアンダーデンスエコー(Underdense Echo)とに分けられる。アンダーデンスエコーの寿命はオーバーデンスエコーに比べると短いものが多く、送信局から送信される電波は鏡面反射のように散乱される。つまり、流星が形成した電子濃度の濃い「電離柱」(流星飛跡)に対して、電波の入射角と反射角が等しいという条件が成り立つ。

この入射角 = 反射角の概念を持ち込むと、単純な二次元平面において、流星の位置は右の図のように突入角度によって変化する。特に突入角度が 90 度に近づくと、光学観測においては流量が  $\sin(h)$  ( $h$ : 輻射点高度) に依存するので増えるが、流星電波観測では、入射角 = 反射角を満たす点が遠い位置に存在し、無限大に発散する。位置  $x$  は以下の式で簡単に示すことができる。

$$q + h = 90^\circ$$

$$x = \frac{d}{2} + \frac{1}{\tan q} H = \frac{d}{2} + \frac{1}{\tan(90 - h)} H$$

$$\lim_{h \rightarrow 90} x = \infty$$



## 3. 反射領域シミュレーション

上記では、二次元での計算であった。従って三次元における計算すると共に、入射角 = 反射角が成り立つ点の集合が、送信局と受信局を焦点とする楕円上に分布するという特徴も利用する。渡部潤一氏、内海洋輔氏が使用しているモデルはこの発想で、反射する場所を、前述楕円を 3 次元的にした回転楕円体を使用している。そして流星の突入ベクトルとある高度 H における回転楕円体の法線ベクトルとの内積が 0 であれば、流星はその回転楕円体に接し、さらに入射角 = 反射角の条件を満たすこととなる。つまり、解くのは、回転楕円体の方程式と内積が 0 を満たす方程式との連立方程式である。一般的な  $x, y, z$  座標系において、焦点までの距離、すなわち送受信局間距離の半分を  $d, y = H$  が発光高度とする。回転楕円体の方程式は

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - d^2} + \frac{z^2}{a^2 - d^2} = 1 \tag{1}$$

となる。これで連立方程式のうちひとつが決まる。そしてもうひとつの方程式をたてる。つまり、法線ベクトルと接線

ベクトルとの内積0を満たす関係式を求めれば良い．法線ベクトルを $\vec{n}$ ，接線ベクトルを $\vec{t}$ とすると，

$$\vec{n} \cdot \vec{t} = 0$$

と書くことができる．次に，回転楕円体での法線ベクトルを求める．まず上式をパラメータ $s$ で微分する．

$$\frac{d}{ds} \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2-d^2} + \frac{z^2}{a^2-d^2} \right) = \frac{d}{ds} \cdot 1$$

$$\frac{dx}{ds} \frac{2x}{a^2} + \frac{dy}{ds} \frac{2y}{a^2-d^2} + \frac{dz}{ds} \frac{2z}{a^2-d^2} = 0 \quad (2)$$

ここで， $\left( \frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dz}{ds} \right)$ は，接線方向のベクトルであるので，このベクトルと法線ベクトルの内積は0である．法線ベクトルを $(L, M, N)$ とすると，

$$L \cdot \frac{dx}{ds} + M \cdot \frac{dy}{ds} + N \cdot \frac{dz}{ds} = 0 \quad \text{ここで(2)と比較すると, } (L, M, N) = \left( \frac{2x}{a^2}, \frac{2y}{a^2-d^2}, \frac{2z}{a^2-d^2} \right)$$

となり，法線ベクトルが求まる．法線ベクトルと流星ベクトルの内積が0だから，流星ベクトルを $(l, m, n)$ とすると，

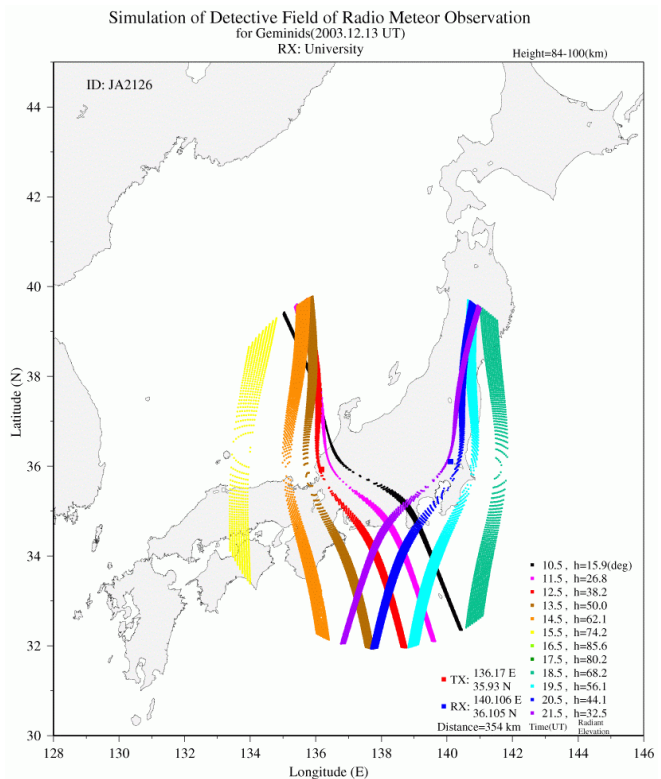
$$\frac{2x}{a^2} \cdot l + \frac{2y}{a^2-d^2} \cdot m + \frac{2z}{a^2-d^2} \cdot n = 0 \quad (3)$$

となる．ここで未知数を整理すると， $z$ は発光高度であるので，発光高度を $H$ とした場合， $H$ は定数である．ただし，流星の発光高度には範囲があるのでそれは考慮せねばならない．そして， $d$ は送受信局間距離の半分であるので定数． $(l, m, n)$ は，輻射点高度 $h$ と，輻射点の方位角から求めることができるので定数． $a$ は，回転楕円体の長半径である．つまり，この値が大きければ大きいほど，遠い位置での電波散乱ということになる．従ってこの値にも範囲が存在し，値の下限と上限とを決めなければならない．下限は，楕円体の長半径と短半径とがひっくり返らなければよいので，送受信局間距離の半分より大きければよい．そして上限は，受信強度は距離の二乗に反比例するので，遠くでの電波散乱による流星エコーの受信強度は極端に弱くなる．従って，本来はきちんとレーダー方程式から電波の減衰を求め，流星エコーが検出できる上限を決めなくてはならない．ただし今回は， $a = 500\text{km}$ を上限としている．

そしてもうひとつ 発光高度 $H$ が範囲を持っている．この発光高度の範囲は東北大学の宮尾佳世さんが研究しているハイトシーリング高度を引用し，日本で普及している 53MHz の電波と各主要流星群の対地速度とを考慮して求められた値を用いている．

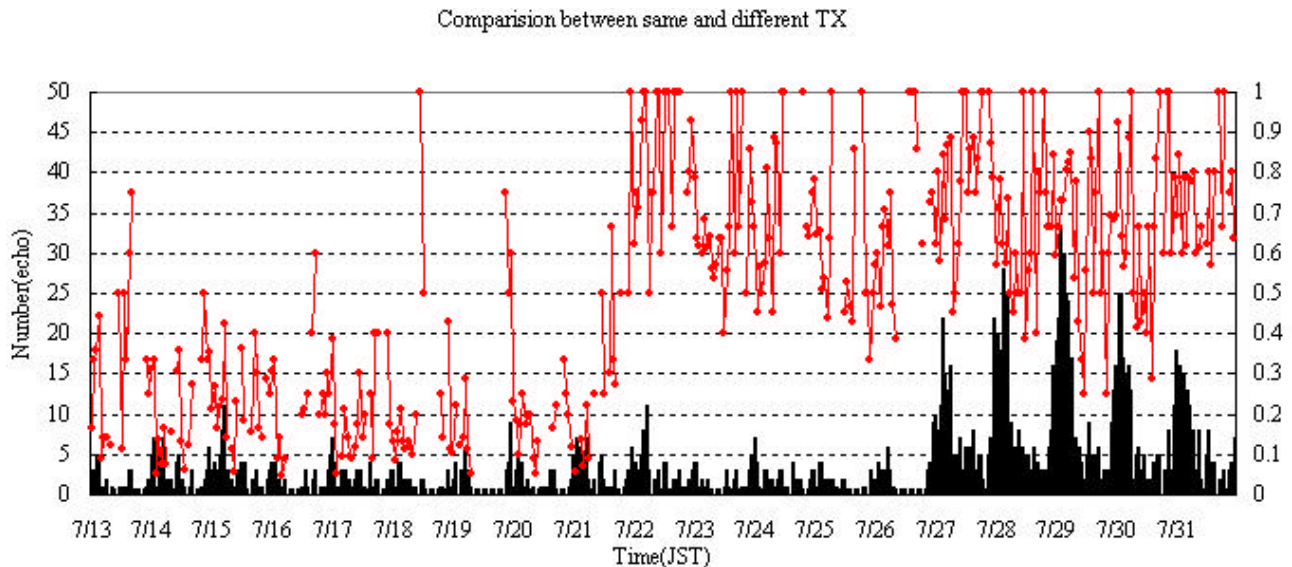
右の図がふたご座流星群における計算結果である．計算は $x, y, z$ 座標系で行われているが，最終的には，緯度・経度に座標系を変換して日本地図上にプロットしている．ふたご座流星群においては，対地速度が35km/sなので，ハイトシーリング高度を考慮して計算プログラムの都合もあり，84km-100kmの範囲を発光高度としている．これらの点は入射角=反射角を満たす点であり，色変化が時間変化を意味している．

この計算は Windows 上でも Fortran のコンパイラと GMT, Shell のツールを用意することで実行することができる．ツールはすべてフリーなのでダウンロードして使用することが可能であるが，Windows において環境変数の設定など若干面倒な設定が必要であるため，一般的ではないといえそうではあるが，誰でもこのような結果を出力することは可能である．



#### 4. 反射領域の存在を示す結果

以下のグラフは、茨城県つくば市で観測を行っている，原浩敏氏の観測結果で，折れ線が，53MHz と 28MHz の同時エコー数，そして折れ線グラフは，53MHz の 28MHz に対する割合を示したものである．



7月22日までは53MHzの送信局が福井工業高等専門学校(福井県鯖江市) 28MHzが長野県豊科町(矢口氏)となっており，28MHzの送信局と53MHzの送信局が異なる．そして7月22日以降は，28MHz，53MHz共に長野県豊科町が送信局となっており，送信局が同じとなった．

送信局が同じである場合，たとえ周波数が違っても，送受信局を焦点とする回転楕円体を考えている時は，焦点が同じなので，楕円体も同じとなり，28MHzであっても53MHzであっても同じ反射領域となる(厳密にはハイトシーリングの効果があり違う)．つまり，28MHzと53MHzの送信局が異なる7月22日までは，それぞれの送信局に対して回転楕円体が作られるため，そのエリアが重複したときのみ，同時エコーとなりうる．一方，7月22日以降は，回転楕円体と同じであるため，同時率が飛躍的に上昇している．従って，反射領域は確実に送信局と受信局との位置関係で決まっており，今回のシミュレーションの妥当性が改めて実証されると共に，特定のエリアに反射領域が存在することも示している．

#### 5. 今後について

今後は，反射領域の面積を算出し，各サイトでアンテナの指向性を考慮し，単位面積あたりのフラックスに換算．さらにバックグラウンドでエコー補足数を補正し，眼視観測でいうZHRの算出を試みる．これによって，流星電波観測からもフラックスを求めることができ，流星群の活動規模を流星電波観測からもしっかりと把握できると期待される．超えるべき課題がまだまだ多いが，このような試みと共に，光学観測との併用も行って，流星電波観測の新たな一歩を踏み出すことができればと思う．

## 資料

ここ数年で爆発的に流星電波観測者が増え、世界的にも例を見ない密なメッシュで観測が行われています。さらに2002年から28MHzの観測もスタートし、流星電波観測も多様化してきました。そのような中で、今一度現状と問題点を把握し、さらなる流星電波観測の発展と今後の可能性を模索していきたいと思えます。

### 1. これまでを整理すると

2000年 ITEC から受信機が販売、HROFFT の Windows 版が公開され普及し始める

2000年しし座流星群で電波観測の存在意義が高まる。初めて世界データの統合を試みる(Ogawa, et al, 2001)

2001年 流星電波観測国際プロジェクトがはじまる。世界15カ国91地点の参加を得る

ITEC + HROFFT のセットが普及を後押しし、爆発的なHROの普及を遂げる

しし座流星群の全体的なプロファイルやサブピーク構造などを観測する(Ogawa, et al, 2002)

2002年 28MHzの観測が始まり、53MHzでは観測できない暗い流星の観測を行う (Usui, et al., 2002)

流星電波観測国際プロジェクト2003, 23カ国120地点以上の参加。

時刻精度が飛躍的に向上した年。

2003年 同プロジェクトの収録が発行される

6ch 観測地点の出現。アンテナの方向による流星数の差の観測

流星電波観測の反射領域を観測するキャンペーンの実施

### 2. 現時点でのホットな話題

#### (1) 6chの流星電波観測実験

現在、茨城工業高等専門学校ならびに高知工科大学にて、東西南北各方向、天頂二タイプの合計6チャンネルが動作している。反射領域の考察や、ロングエコーの出現方向の推定などに期待が寄せられている。今後の可能性についてさらにみなさんと議論したい。

#### (2) 反射領域

流星電波観測が観測している領域は実はシビア。鏡面条件で電波が散乱することを仮定すると、反射領域を計算することができる。この結果から、アンテナを向ける方向や、観測領域の補正值など、様々な分野へ切り込んでいける。この可能性について議論していきたい。

#### (3) 多周波数観測

現時点で、28MHz, 53MHz, FM帯, VOR帯, 144MHzの観測がなされている。特に28MHz, 53MHz, VORは定常的に観測しているサイトが増えてきている。周波数が異なると、検出できる限界高度が変化するため、観測できる限界等級が周波数が低ければ低いほど暗いものまで検出できることになる。このことを生かして、流星群の特徴を知ることができる。この現状と可能性について議論したい。

#### (4) ロングエコーについて

ロングエコーは電子密度の濃いオーバーデンスエコーとされている。電子密度が濃いということは流星の発光光度が明るいことになるが、奇妙なことに眼視の火球情報とロングエコー情報とは必ずしも一致しない。一致しないどころか一致率はきわめて低い。ただしロングエコーについてはHROサイトの同時性は高く、多くの地点で受信される。なぜ眼視と電波と一致しないのか議論したい。

### 3. このほかに議論すべき事

#### (1) 今後の普及活動について

流星電波観測は爆発的な観測地点の増加となった。その反面で、サポート、問題点の解決が手薄になっているのも事実である。さらに、流星電波観測プロジェクトとしてどこまで浸透させるのか。広報普及活動についても議論を重ねたい。ちなみに、webのアクセス数は主要流星群時には数日間で数万~数十万をたたき出す。

#### (2) 様々なHRO観測上の問題点について

時刻精度, カウントの方法, ノイズなど

#### (3) データ公開形式について

どのような形でデータ公開が望ましいか。Excelで集計されたデータか。生データか。

#### (4) 観測者へのフォロー

webにどのような情報を掲載するのか

#### (5) 今後のプロジェクト

今後のプロジェクト展開について、報告会の開催について