

ふたご座流星群の流星電波観測による電波反射点移動の検出

長野工業高等専門学校天文部

小林智幸、金井翼、兒玉洋平、渡辺みなみ、内堀拓哉、川手俊憲、丸山裕司
下寄ゆり、和田枝麗、中澤慎太郎、戸谷卓、山崎晃一、吉岡賢、坂井純(高専1年生)

1. はじめに

長野高専天文部では、2000年8月より流星電波観測を始め、これまで、「流星電波反射メカニズム」を検証する一連の実験を行ってきた。2000年のふたご座流星群の時は、送信局方向(西)と反送信方向(東)に向けた2つのアンテナそれぞれの受信強度差から流星エコーの到来方向を推定し、ふたご座流星群における流星電波反射点の移動の検出した(石川 et al. 2001,2002)。2001年のふたご座流星群の際は、4方向(東西南北)に向けた4つのアンテナによる電波反射点の移動を検出した(豊田 et al. 2002)。今回、2002年ふたご座流星群で、天頂方向を向けている2素子ループアンテナのデータを「流星エコーの受信強度分布」の時間変化という点に着目して解析し、流星電波反射点の移動を実証した。

2. 流星エコーの電波反射メカニズム

2-1 HRO 観測

流星が流れると、その周辺の大気がイオン化し電離柱ができる。その電離柱に反射する電波を使って流星を観測する手法を流星電波観測という。長野高専では、福井高専から打ち上げられている Ham-band 帯 53.75MHz の電波を利用して HRO(Ham-band Radio Observation) 流星電波観測を行っている。送信局である福井高専は、長野高専から西側 200km にある。観測システムは (i) 通常の流星モニターを行っている 2 素子ループアンテナを使用、これは、先輩が 2000 年 10 月に自作した 3 台の 2 素子ループアンテナの 1 台である。(ii) 受信機 ICOM IC-R75 で 900Hz 変調して受信し、音声出力する。(iii) PC にて、流星電波観測用ソフトウェア (HROFFT) で、音声出力を FFT 処理しダイナミックスペクトルとパワースペクトルを 10 分おきに画像データとして保存する。

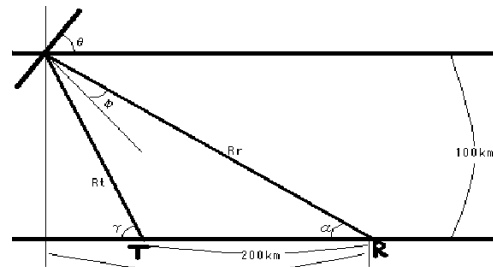


図1 鏡面反射条件

2-2 流星電波反射点の移動

図1は、発信局 T から発信された電波が流星作る電離柱に反射し、受信局 R で受信される様子の模式図である。送信局 T を福井高専、受信局 R を長野高専、流星をふたご座流星群の流星とする。いま、送信局からの電波は電離柱に鏡面反射していると仮定しよう。これまでの研究から、ふたご座流星群では、この仮定が十分に成立していることが知られている。さらに、電波反射点を求めるための近似として、「電波反射点を送受信局 TR を含む垂直平面内にある」という単純なモデルを採用しよう。そうすれば、流星の入射角 θ を決めると、受信局で受信できる流星エコーの電波反射点は一意に決まってしまう。いま、受信局を原点 (0,0)、送信局を (200km, 0km)、反射点を (Xkm, 100km) として、流星の入射角 θ における鏡面反射条件を満たす電波反射点までの水平距離 X を求めた。ここでは、電波反射点の高度を 100km と仮定している。

図2は、流星の入射角 θ と電波反射点までの水平距離 X を表している。これから、(i) 入射角が大きき時 ($|\theta| \approx 90^\circ$) は、反射点までの距離が非常に大きくなる、(ii) 入射角が東側 ($0 < \theta < 90^\circ$) のときは反射点が西側 ($X > 0$)、入射角が西側 ($0 > \theta > -90^\circ$) のときは反射点が東側 ($X < 0$) になることがわかる。すなわち、放射点が南中する前後で、流星エコーの到来方向が西側から東側にジャンプする事が予想される。

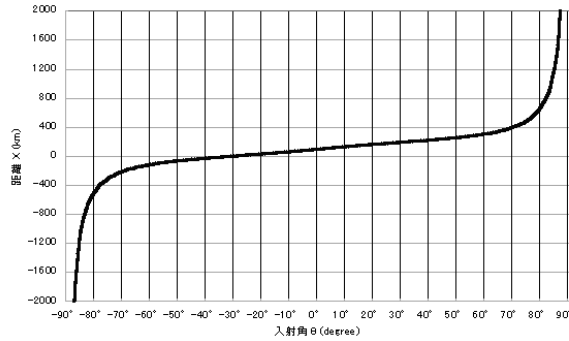


図2 流星の入射角 θ と電波反射点までの水平距離 X

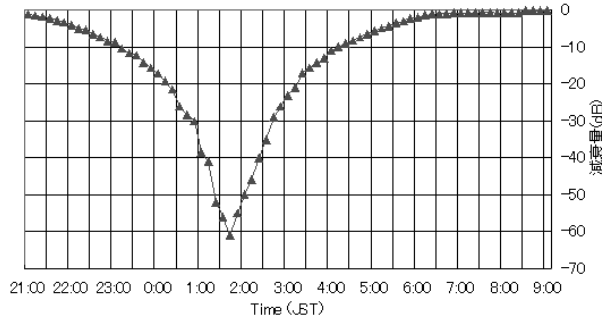


図3 受信強度の時間変化(計算値)

事実、2000年、2001年の多数のアンテナによる観測からこの変化を検出している(石川 et al. 2001, 石川 2002; 豊田 et al. 2002)。

2-3 電波反射強度の変化

受信電波電力 P は、 T と反射点までの距離 R_t 、反射点と R の距離 R_r 、および、電離柱への入射角 ϕ などを使うと、今回の単純なモデルでは次の量に比例することが判る(流星電波観測ガイドブック 2002)。

$$P \propto (R_t R_r (R_t + R_r) (1 - \sin^2 \phi))^{-1}$$

流星の入射角(電波反射点)の変化により、受信電波電力 P は変化する。いま、ふたご座流星群の放射点の高度をステラナビゲータで調べ、反射点までの水平距離 X 、および、受信電波電力 P を計算し、その結果から受信強度 G を次のように算出した。

$$G(t) = 10 \log \frac{P(t)}{P(t_0)} \quad \text{dB}$$

ここで、 $P(t_0)$ は $X = 0$ になる時刻 6h30m を基準としている。図3は、受信強度 G の時間変化である。受信強度は 1h00m ~ 2h00m にかけて急激に下がり、前後で 40dB 以上の差が生じることが予測できる。

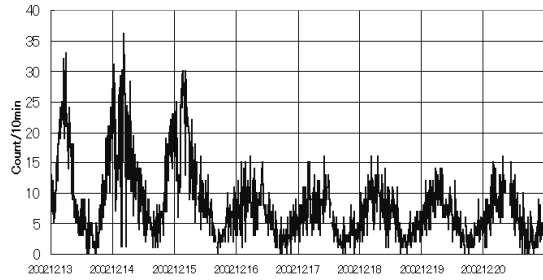


図4 2002年12月13日から20日までの流星数変化

3. 2002年ふたご座流星群の解析

3-1 2002年ふたご座流星群

図4は、2002年12月13日から20日までの流星エコー数変化である。ふたご座流星群の活動のピークは12月14日の昼間であったと考えられる。我々は、このピークを含む13日21h00mから14日9h00m、14日21h00mから15日9h00mの2日間24時間のデータを詳細に解析することにした。我々は、「受信強度分布の時間変化」を調べるため、10dB以上の流星を強度別に8段階に分け、強度別に流星数をカウントし、その「代表値」の時間変化から受信強度分布の時間変化を得ることを考えた。しかし、日々の流星数の変動において、明け方では1時間あたり常に60-80個の流星エコー(散在流星)をカウントしている。ふたご座流星群の活動を調べるために、この値を無視することは出来ない。そこで、散在流星の強度別流星エコーの日周変化を調べた。

3-2 散在流星の日周変動

受信強度分布を得るために、10dB以上の流星を8段階の強度レベルに分類してカウントした。L1は10dB、L4は20dB、L7が30dB相当し、その間は、3等分している。散在流星の日周変動を得るため、12月1日から5日、および、15日から25日の21h00mから9h00mまでの各12時間ごとを解析し、その平均値を散在流星の受信強度分布のテンプレートデータとした。図5は製作したテンプレートデータである。

次に、流星のサイズ分布を見るために、それぞれの受信強度レベル以上の流星数の累積個数 N_c を求め、 $\log N_c$ -受信強度レベルのグラフより「べき」指数を調べた。図6に $\log N_c$ -受信強度レベルのグラフを示す。この図より、次のことが判る。

(1) グラフの傾きがほぼ直線である。これは、流星の強度が弱くなるほど(暗い流星)、流星数が一定の「べき」で増加していく傾向であることを示す。この

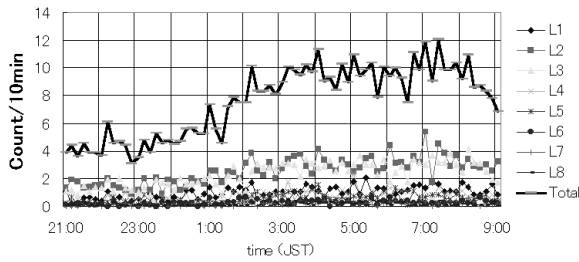


図5 散在流星の受信強度分布のテンプレートデータ

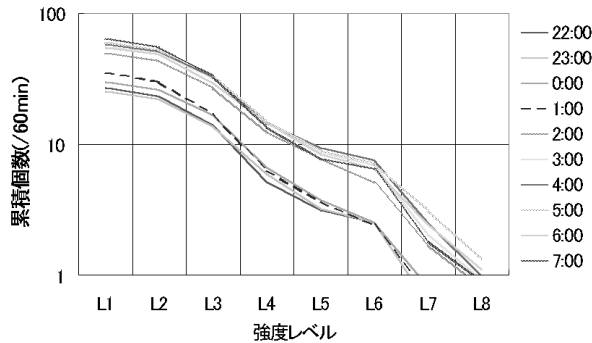


図6 $\log N_c$ -受信強度レベル

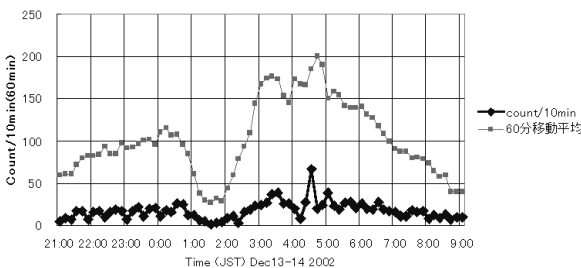


図7 ふたご座流星群の総数変化、13日/14日

グラフの傾きの大きさは光学観測における光度比に相当し、散在流星における流星物質のサイズ分布の情報を表していると考えられる。

(2) 流星数の大小にもかかわらず、すべての時間で傾きがほぼ等しい。このことは、散在流星のサイズ分布が、時間変動していない事を意味している。

3-3 ふたご座流星群の受信強度分布の日周変動

我々は、双子座流星群の13日21h00m-14日9h00m、14日21h00m-15日9h00mまでの受信強度レベル別流星数データから、散在流星の受信強度分布のテンプレートデータを差し引く事で、双子座流星群のみの活動を導いた。

図7は、ふたご座流星群の活動ピークの12月13日/14日のふたご座流星群、10分間あたりの総流星エコー数の時間変化、および、その60分移動平均で

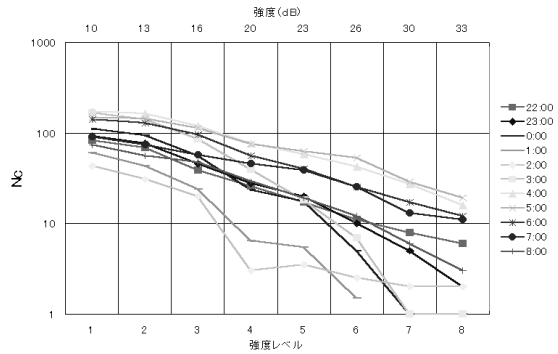


図8 ふたご座流星群の $\log N_c$ -受信強度レベル

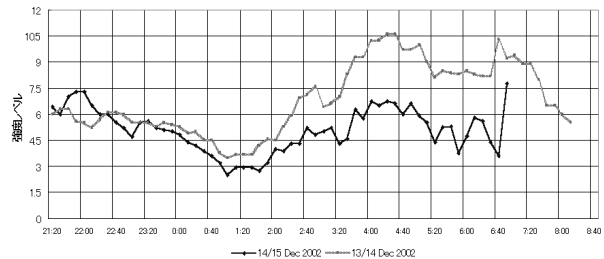


図9 ふたご座流星群の強度変化

ある。放射点が天頂近傍の1h40m-2h10mにかけて、ふたご座流星群による流星エコー数はゼロになる。眼視観測では、この時間帯に多数のふたご座流星群の流星を観測している。一方、電波観測では、入射角が90度近傍で電波反射点が遠方になり、結果として、流星エコー数がゼロになったと解釈できる。

次に、ふたご座流星群の受信強度変化を見るために、散在流星の解析と同様、累積個数 N_c に関する $\log N_c$ -受信強度レベルのグラフを図8に示す。この図より、幾つかの事に気付く。

- (i) グラフの傾きはほぼ直線である。
- (ii) 流星数の大小にもかかわらず、グラフの傾きの優位な時間変動はない。少なくとも22h-23h台と5h-6h台の傾きは同じである。ただし、2h-3h台は傾きが変わっているのかどうか、統計的誤差が大きく、判定は難しい。いずれにしても、ふたご座流星群の活動において、半日程度の時間で流星のサイズ分布が異なるとは考えにくいので、傾きの変動は、統計の問題か、考慮していない別の効果によるものと考えられる。事実、13日/14日のデータの傾きと14日/15日のデータの傾きは、ほぼ等しい。図8から判るように、ふたご座流星群の受信強度分布の「べき」はほぼ一定なので、受信強度の「代表強度値」を1時間移動平均のグラフで $N_c = 10$ の交点の強度レベルの値とする。図9はこの「代表強度値」の時間変化で示す。

4. 結果と議論

我々は、2002年ふたご座流星群の単一アンテナの観測から、電波エコーの受信強度分布の時間変化を求め、モデル計算と比較して、流星エコーの反射メカニズムを検討した。その結果、受信強度分布の時間変化が、簡単なモデルで計算した理論値とほぼ一致した。すなわち、受信している流星エコーが鏡面反射していると、また、流星の入射角の時間変化によって、電波反射点が天球上を移動することが結論できる。

(1) 天頂効果の検出。

2002年ふたご座流星群では、13/14, 14/15日の両日に、放射点が南中する AM1h45m を含む前後約3時間ごとの眼視計数観測とビデオ観測を行った。この時間の流星数は HR=60 程度であり、光学観測では流星数が減少することなく出現していることを確認している。一方、電波観測では、散在流星の効果を差し引くと、1時半から2時半の流星エコー数がゼロになっている。これは、流星の入射角 θ が大きくなると

- (i) 鏡面反射条件を満たす位置 X が遠くなる (図2)、
- (ii) 受信電力 P が減少し、
- (iii) 受信強度 G が減少した (図3)

ためと考えられる。ちなみに、ふたご座流星群の流星エコーのうち、最大級のもの (HROFFT 画面上) 40dB 程度である。一方、入射角が大きくなる南中時刻の減衰量は 40dB 以上と推定される (図3)。すなわち、この時刻は、流星エコーがまったく受信できなくなると推定できる。これは、実際の結果と矛盾しない。

(2) モデル計算値と観測値の違いがある。

(i) 今回、計算のために採用したモデルが、単純化しすぎているためであると考えられる。ある受信局で検出できる流星エコーは、流星の電離柱・送信局・受信局が鏡面条件を満たすこと、すなわち、電離柱が送信局・受信局を含む回転楕円体の接平面上に在ることである (宮沢 et al. 2001)。このため、実際に検出可能な流星エコーの反射点領域は、かなり南北に細長く伸びている。今回の計算では、電離柱が送信局・受信局を含む垂直平面内にあったときの反射点を求めているだけなので、実際に検出可能な流星エコーの反射点領域の代表点で、受信強度を計算していることになる。これらの補正は将来の課題である。

(ii) アンテナの指向性の補正の必要性もある。図9では、確かに電波反射点が長野の上空になる6hごろの流星エコー強度がもっとも強くなっているが、その後、放射点が沈む9hごろまで次第に減少していく様子がわかる。計算値では、この時間間の距離変化が小さ

いので、流星エコー強度はほとんど減衰しない (図3)。ところで、今回使用した2素子ループアンテナのビームパターンの半値幅は、30-40度くらいである (遠藤 et al. 2001)。また、放射点が沈む時の反射点方向の仰角が45度である。すなわち、この減少の原因の1つはアンテナの指向性によるものと考えられる。

(3) ふたご座流星群の受信強度分布のべきの時間変動がほとんど見られなかった。すなわち、代表強度値と流星エコーのカウント総数に強い相関があることを意味する。事実、代表強度値の時間変化 (図9) は、カウント総数の時間変化と良く一致する。ところで、流星の流量 (influx) は、2つの要因で変動する。

(i) 放射点高度 θ による $\sin \theta$ の変動
流星数は、流星の入射角 θ によって、 $\sin \theta$ の変動をする。これは、 $1/\sin \theta$ で補正できる。

(ii) 流星群の活動による時間変動

日本流星研究会のふたご座流星群の観測データ速報では、ふたご座流星群の活動は、双子座流星群のピーク (14日日中) に向けて13日/14日は増加中、14日/15日は減少中であった (NMS HP 2002)。図9を見ると、13日/14日で、右側 (南中後) の方が、左側 (南中前) に比べ大きいのが、流星数が増加中のためと考えられる。その証拠に、14日から15日のデータでは、南中前後での大きさはほぼ同じである。すなわち、流星の流量変化による効果を補正すると、理論値と測定値がより近くなると考えられる。

(4) ふたご座流星群ピーク時のべきのグラフは散在のべきのグラフと比較して傾きが小さい。これから、双子座流星群のサイズ分布は、散在流星に比べて大きい粒子が多い事がわかる。

5. References

- [1] 中村卓司監修、RMG 編集委員会 CQ ham radio 増刊「流星電波観測ガイドブック」CQ 出版社 (2002.8)
- [2] 宮沢明子、大西浩次、服部忍 (長野高専) 流星電波観測における流星検出効率 日本天文学会 2001年春季年会 L01a(2001.3)
- [3] 石川寿之 (長野高専)、他 流星電波反射領域の移動の検出 日本天文学会 2001年春季年会 L07b(2001.3)
- [4] 石川寿之 長野工業高等専門学校電子制御科卒業論文 (2002.3)
- [5] 豊田桃子、石川寿之、服部忍、大西浩次 (長野高専) ほか 流星電波方向決定システムによるふたご座流星群観測 日本天文学会 2002年春季年会 L13b(2002.3)
- [6] 遠藤 誠、柞山 快、柳沢雅俊、川柳雅貴、丸山俊之、伊藤雄作、徳永麻伊、山田真澄 (長野高専) HRO 流星電波観測システムの構築とアンテナ性能試験 第2回ジュニアセッション 07 (2001.3)
- [7] 日本流星研究会 HP <http://www.nms.gr.jp/>