

流星電波観測による流星科学をめざして

大西浩次*1・服部忍*2・西村 治*3
 宮澤明子*4・藤沢雄章*4・駒込徳臣*5・石川寿之*4
 柳沢雅俊*6・遠藤誠*4・伊藤雄作*4・川邨雅貴*4
 丸山俊之*4・柞山快*5・志水甲平*4・徳永麻伊*7
 青木良枝*4・飯島由紀子*5・小林彩*5

Try for the Meteor Science by Meteors Radio Observations System

Kouji OHNISHI, Shinobu HATTORI, Osamu NISHIMURA,
 Takefumi FUJISAWA, Akiko MIYAZAWA, Naruomi KOMAGOME, Toshiyuki ISHIKAWA,
 Masatoshi YANAGISAWA, Makoto ENDO, Yusaku ITO, Masaki KAWAMURA,
 Toshiyuki MARUYAMA, Kai HOSAYAMA, Kouhei SHIMIZU, Mai TOKUNAGA,
 Yoshie AOKI, Yukiko IJIMA, Aya KOBAYASHI

Radio meteor scatter is an ideal technique for observing meteors continuously. Meteor trails can reflect radio waves from distant transmitters back to earth, so when a meteor appears one can sometimes receive meteor echoes from radio source away from the observing site. For radio observation of meteors, amateur Ham-band beacon signals are useful as stable radio source. We started the two observation systems of the automating HRO (Ham-band Radio Observation) by monitoring the signals from the radio receiver with computers in August 2000, using the continuous transmission of beacon signals for meteor observations at 53.750MHz, 50W from Fukui National College of Technology (Sabae, Fukui, JAPAN). From the initial experiments, we confirmed that HRO method using a spectrogram software (FFTHRO) is sensitive enough to detect weak meteor echoes and to detect an hourly and a diurnal variation of meteors. From this, we also recognize that we need a better theory to understand the a correct interpretation of observed data. We derived the formula of the detection efficiency of meteors which depends on the position of transmitters and receivers. And we applied this formula for main meteor showers(Perseids, Leonids, Geminids), and showed that the time variation HRO detection number of each main meteor showers are consistent with our formula. At the same time, we derived the formula of reflection point of meteors. To check this formula experimentally, we can prove that the radio echo is really the echo due to meteor. Then we start to construct the new experimental systems; the one is the *Position Determination System* that detect the motion of the reflection point of meteor radio signal using the paired antennas, the other is the *Polarized Wave Determination System* which detect the difference of the polarized radio wave due to the reflection at the meteor trails using the other paired antennas; this will be a first *System* in the world.

キーワード: meteor, meteor showers, Sextantid, Perseids, HRO, FFT, radio meteor detection efficiency

1. はじめに

流星現象とは、地球大気圏に高速度で飛び込んだ流星物質（彗星のダストや星間ダスト）が大気分子に衝突し、地上約100kmの高度で、分子や流星物質をイオン化、同時に摩擦熱で発光する現象である。すなわち、地球大気が巨大な流星物質検出器として作用して

*1 一般科助教授
 *2 電子制御工学科助教授
 *3 電子情報工学科助手
 *4 電子制御工学科学生
 *5 電子情報工学科学生
 *6 機械工学科学生
 *7 環境都市工学科学生
 原稿受付2000年10月30日

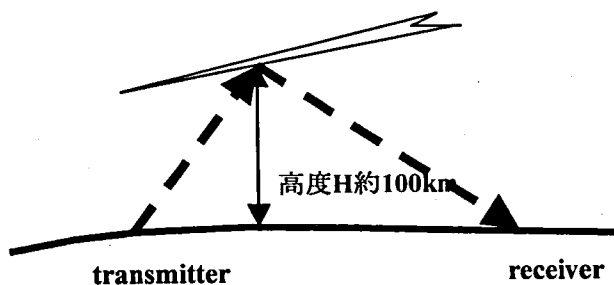


図1 流星による前方散乱の説明

いる。流星物質 (dust) は、大半が彗星¹から放出されたものであり、原始太陽系の組成を閉じ込めたロゼッタストーンといえる。

この流星現象では、発光と同時に周囲の大気分子と流星物質をイオン化させる。この流星の飛跡に残る流星プラズマチューブ（電離気体柱、以下、流星プラズマと呼ぶ）が、低VHF帯（30-100MHz）の電波反射体として働く。この現象の継続時間は、通常1/10秒から数分である。そこで、低VHF帯電波の電波を常に送信しておき、流星プラズマで反射した電波を受信することで、流星を検出することができる。このような観測法を流星電波観測と言う。

流星電波観測法は、前方散乱を利用した観測法と後方散乱を利用したレーダー方式の2種類に分けられる。流星プラズマによる電波の前方散乱の様子を図1に示した。受信局R（以下R）は、送信局T（以下T）の電波を直接受信できない遠距離に位置するが、流星プラズマが存在する短い時間のみ、反射電波（流星エコー）がRで受信可能になる。この前方散乱を利用した流星電波観測は、天候に関わらず24時間、連続観測できるので、流星や流星群の活動のモニターに大変有利である。

流星電波観測は、第2次大戦前後にレーダーの開発とともに始まり、比較的早い時期から、レーダー方式による流星の研究が行われた（McKinley 1961）。一方、前方散乱を使った流星電波観測の発展は比較的遅く、1970年代よりFM放送電波を使った観測がアマチュアを中心に行われるようになった（Suzuki 1976）。しかし、1980年代後半、FM放送局の多局化にともないFM放送電波観測の実施が次第に難しくなった。同じころ、海外でハム無線電波を送信局とした流星電波観測 Ham Radio Observation (HRO) の実験が行われた。日本でも、京都大学宇宙電波科学研究センターの中村卓史氏の助言を受け、福井工業高等専門学校の

前川公男氏が、1996年より、流星観測を目的に周波数53.750MHzのビーコン電波を送信し、この電波を使ったHRO流星電波観測が始まった（Maegawa 1999）。今日では10以上のグループが周波数53.750MHzの電波によるHRO流星電波観測を行っている。

流星電波観測から、流星についての多くの情報をもたらすことができるが、その記録データを正しく解釈するためには、まだ理論的に解明しなくてはならないことが多い。さらに、受信されたエコーが本当に流星によるエコーであるかという問題すら、通常の観測データから判断することはできない。レーダー観測では、電波放射方向が限定できるので、流星の位置を確定することが可能である。それより、流星によるエコーであることが確認できている。一方、前方散乱を利用した流星電波観測では、1つのアンテナだけで流星の位置を決定することはできないので、流星によるエコーであると直接証明することは難しい²。

我々は、流星電波観測を始めるに当たり、3年次計画による「流星電波観測による太陽系科学」を行うことにした。初年度のテーマとして、「流星電波エコーが流星プラズマによる電波反射である」ことを実証することにした。この研究の進めるにあたり、

- 第1ステップとして、流星電波観測の通常の観測システムを作り上げ、データーの精度を確認すること（exercises）。
- 第2ステップとして、流星群の電波流星観測における流星の検出効率の理論的な検討と実証のための実験計画のフィージビリティスタディー、（Theory and Planning）
- 第3ステップとして、「流星電波エコー」実証のための観測実験システムの構築（Construction of Observation System）
- 第4ステップとして、実証観測実験の遂行とその結果の検討（Observation and Data Analysis）

の4つのステップを考えた。

著者は、2000年5月より観測システムの構築、8月にHRO（53.750MHz）試験観測、同時に京都大学宇宙電波科学研究センター信楽観測所のMUレーダー（46.5MHz）の電波を使った電波観測を経て、9月1日よりHRO（53.750MHz）の定常観測をはじめ、現在も継続している。また、信楽観測所のVHFレーダー（31.57MHz）の電波を使った電波観測も試験観測している。

これら観測的な研究と同時に、電波流星の検出効率

¹ 彗星や流星のスペクトル観測より、その組成元素比などから原始太陽系を作った星間物質の化学進化の様子が推定されている。また、スペクトルから多くの有機分子が見つかっている。生命の起源に必要な有機分子は、星間で作られたといわれている。

² 電波エコーの諸性質を考えると、流星と考えるのはきわめて自然である。しかし、直接的な証拠がない。

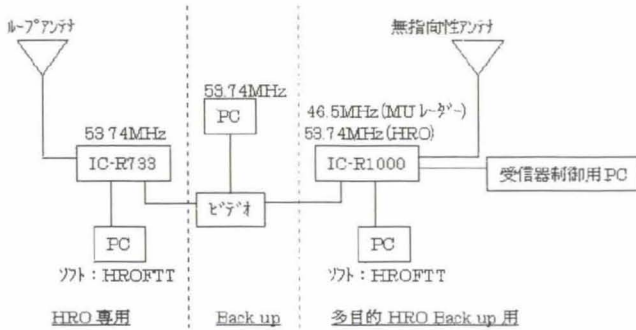


図2 System Chart

の理論的検討を行い、ついに、電波観測による流星検出効率の公式を導いた(宮沢, 大西, 服部 2000)。

現在、第3ステップを終了し、流星の位置決定用ペアアンテナ、および偏波検出用ペアアンテナによる新システムでHRO観測を行っている。

本論文では、第1から第3ステップにかけての結果を報告する。2章では、テスト観測システムを紹介する。3章で、定常観測による日々の流星の変動と長期的な変動、システムの安定性の確認、および、昼間のみ的小流星群の検出について述べる。4章で、流星群の日周運動に伴う流星電波効率の公式を導出し、ペルセウス流星群の観測結果との比較を示す。また、しし座流星群、ふたご座流星群の検出傾向の予測する。5章では、流星電波効率の計算結果を踏まえ、電波エコーが流星によるものを実証する観測実験(2000年11月から2001年1月にかけて実施)について述べる。

2. 観測システム

2-1 システム概要

図2のように、流星電波の受信システムは、大きく分けて2系統のシステムがある。ひとつはHRO専用のシステムで、自作2素子ループアンテナと受信機がICOM IC-R75と観測用PCとソフトHROFFTで構築。もうひとつは、MUレーダー受信用、および、HROバックアップ用のシステムで、市販の無指向性アンテナに受信機としてICOM IC-R1000と観測用PCとソフトHROFFTで構築している。さらにデータのバックアップとして、それぞれの音声出力を必要に応じて、ビデオデッキで記録している。

2-2 送信局

福井工業高等専門学校(福井県鯖江市 136.18 E, 35.93 N)より53.7500 MHz, 50 Wの電波を送信し

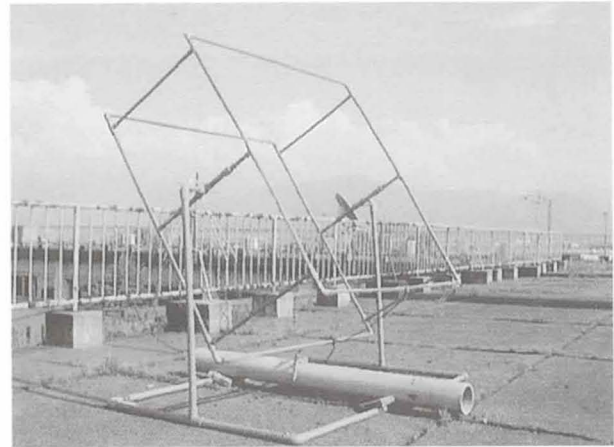


図3 53.75MHz用2素子ループアンテナ, X-1
ている。送信機はIC706で、アンテナは2素子クロス
八木アンテナである

2-3 受信アンテナ

HRO観測専用システムでは、53.7500 MHz受信専用の自作2素子ループアンテナを使用している。このアンテナは、長野工業高等専門学校(長野県長野市 138.11 E, 35.38 N)の管理棟屋上に設置されている。図3のアンテナ1号機(X-1)は、2000年8月10日に完成し、10日の午後よりテスト観測がスタート、9月1日よりHROの定常モニターを行ってきた。現在は、後述する新観測システムに移行し、さらに4台のHROアンテナが製作・設置されている。図4は2素子ループアンテナの電界強度解析ソフトによる指向性の結果である。

HRO観測では2素子八木アンテナが良く使用されている。しかし、我々はループアンテナには八木アンテナのようなサイドローブがないこと、ゲインが八木

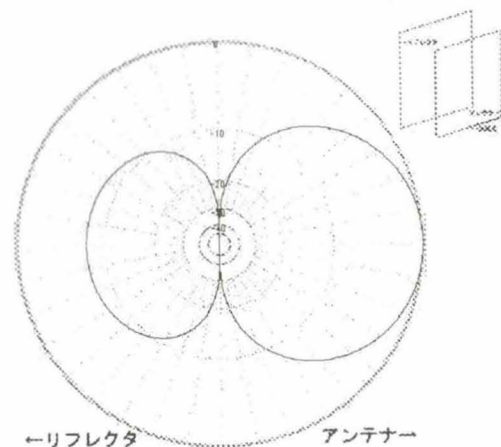


図4 アンテナの電界強度シミュレーターの結果

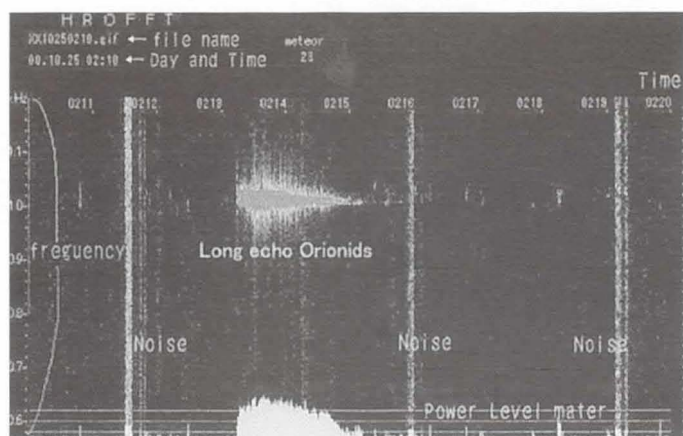


図 5 2000年10月25日2時10分から10分間のFFTHRO(大川氏によるHRO観測ソフト)の画像
アンテナより高いこと、自作が容易なことから2素子ループアンテナを採用した。

2-4 受信システム

HRO専用システムでは、アンテナで受けた53.750MHzのピーコン電波を受信機ICOM IC-R75のSSBモード・周波数53.749MHzで受信し、送信・受信周波数の差1000Hzの音声として出力、この音声出力を大川一彦氏製作の流星観測記録用ソフトHROFFTでリアルタイムにFFT処理し、同データを画像ファイルに圧縮しPCのHDに書きこんでいる。画像ファイル名や画像内の時刻は、PCの内蔵時計による時刻である。10分ごとに1枚の画像ファイルにしているの、1日で144枚の画像データ、PC1台当たり2-3MBになる。ソフトは、流星を自動で数えているが、流星と紛らわしい飛行機からの反射波や、外国からの放送電波など、多くの雑音源があるので、実際に流星数を得るには、直接、1つひとつ目視でチェックしながら数えなくてはならない。このチェックに必要な時間は、1日分約1時間である。データの時間圧縮率は、1/24である。現在、常時4台のPCがデータを取っているの、効率のよいチェック法が必要とされる。

流星群のときは、音声出力はPCと同時にビデオテープで録音し、後日、パラメーターを変えて再解析を行う。図5は、2000年10月25日2時10分から10分間の画像である。流星観測記録用ソフトHROFFTの画面は、縦軸が周波数、横軸が時間軸である。送信・受信周波数の差の周波数(1000Hz)に、流星プラズマに

よる反射電波が見える。

3. 観測結果

3-1 日々の変動観測

9月-10月の2ヶ月間の流星数の変動を図6で示す。日々の大きな増減があるにも関わらず1日単位の移動平均をとるとほとんど変動が無いことがわかる。この図の白いラインは、5日間の移動平均を示している。

この時期の流星群としては、10月21日をピークとするオリオン座流星群以外、毎年目立った活動をするものはない。すなわち、この結果は、アンテナ-受信機-PC、さらに、画像データから計数カウントを行う人ごとの特性まで含めて全観測系がきわめて安定に動いていることを意味する。

図7は、流星群のないときの日々の流星数の変動を示している。ここでは、9月2日から6日までの5日間である。白抜き線は、1時間の移動平均を示している。これらの流星は特定の流星群に属していない(散在流星)³である。

日々の流星数の増減の特徴は、明け方に最大になり、夕方に最低になることである。この流星数の変動は、散在流星となる流星物質の分布と地球の公転運動、および自転運動で説明できる。地球は秒速30kmで太陽の周りを公転運動している。それゆえ、観測者が明け方の時には、天頂方向が地球の進行方向に対応し、30km/sより速い速度を持って地球と同一方向に進行する流星以外のすべての流星物質が地球に衝突できる。一方、観測者が夕方の時は、地球と同一の方向に進行し、かつ、30km/s以上の速度を持つ流星物質のみが地球に衝突できる。

これら電波流星観測における日々の変動は、通常の光学的流星観測と違い、地球への流星物質の流量を直接反映していない。それは、4章で述べるように、T-R基線によって流星の出現方向による検出効率が異なるからである。逆にいえば、電波流星観測の場合、流星検出効率が方向に依存する性質を積極的に使うことによって、日々の変動から、地球近傍の流星物質(惑星間塵)の空間分布や速度分布(分散)の等方性、非等方性に関する情報が引き出せると期待する。これらに

³ 彗星が放出したダストのうち、初速の小さなものは彗星軌道近辺に漂い続け流星物質の帯を形成する。軌道が地球軌道と接近する場合、その交点に地球が接近した際、大量の流星物質が地球大気圏内に突入し流星を生じる。流星群とは、この様な原因である特定の方向から降ってくるように見える現象であり、その方向を輻射点と呼び、輻射点のある星座の名前を流星群の名前としている。彗星の軌道に沿った流星物質は、太陽の周りを何周も回るにつれ、速度分散に依って次第に拡散して、最終的にはもとの彗星の軌道から大幅に外れた軌道へ進化して行く。このように、拡散した流星物質が起こす流星が散在流星である。

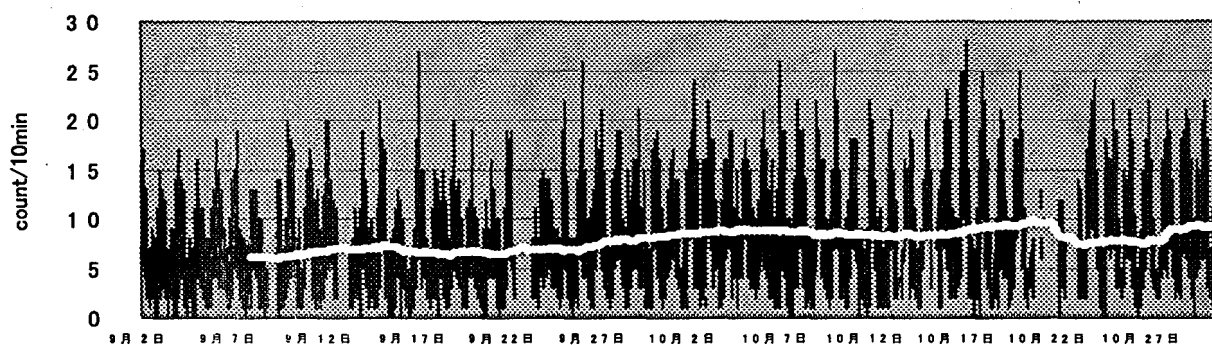


図6 9月-10月の流星電波数

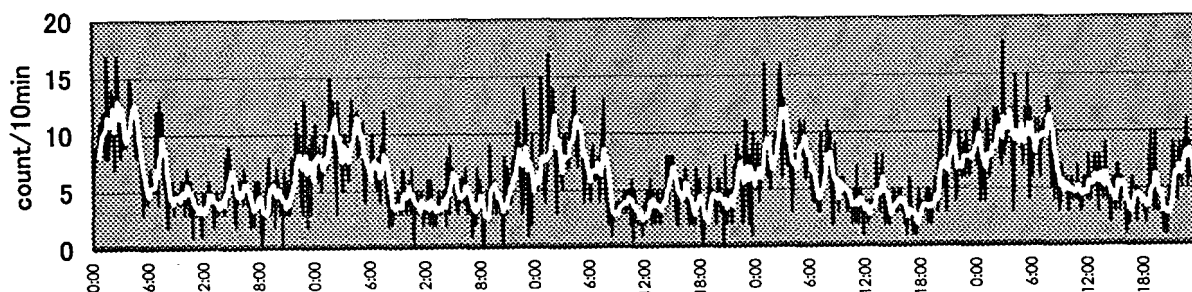


図7 通常の日々の流星電波数の変動

については、日々の継続観測のデータの蓄積と理論的な考察が必要である。最近、これらについて観測・理論の両面で検討をはじめた。

3-2 ペルセウス流星群2000

ペルセウス座流星群は、スィフト・タットル彗星(109P/Swift-Tuttle)を母天体とし、毎年、8月13日を中心に20日間以上の長期にわたり観測できる流星群である。我々は、最初のテスト観測として、ペルセウス座流星群をターゲットに8月10日から15日までの6日間、HRO観測と京大MUレーダーの送信電波で流星電波観測を行った。図8は、そのうちの8月13日から15日までの2日分のHRO観測からの計数データである。この最初のテスト観測では、連続観測のためのシステム調整を目的としていたため、幾度も受信機の出力レベルを変えた。そのため、6日間のうち、同一条件で連続的な計数カウントに使えるデータは、この後半の2日間だけであった。細い線は10分間ごとの流星数を表し、太い線は1時間の移動平均を表している。

3-3 日中の流星群：六分儀流星群

日中のみの流星群のひとつとして六分儀座流星群が知られている。この流星群は、1957年にAdelaideレーダー流星サーベイで発見された(Weiss 1960)。60年代から70年代にかけて、レーダー観測で検出できない年があり、しし座流星群のように、流星物質の拡散の進んでいない若い流星群であるという説が在った。

この流星群の活動は9月29日を中心に数日間である。近年になって、この流星群の母天体がアポロ型の小惑星(3200) Phaethon⁴であることが判明した(Babadzhanov and Obruchov 1992)。この小惑星はふたご座流星群の母天体として注目されており、ふたご座流星群とともに、アポロ型小惑星の進化を探るターゲットとして興味深い。

図9は、この流星群の輻射点の高度が高い、9-11時をはさんだ7時から14時までの7時間の流星数の時間変動を示した。流星群の検出には、活動の高い9月30日を含む3日間の平均と、その前後の3日間の平均

⁴ この天体は小惑星に分類されているが、流星群を持つと言う意味で、昔、彗星的な活動があったとわかる。今日、アポロ型小惑星などを含めいくつかの小惑星が彗星のなれの果て(かれた彗星)であると考えられている。なお、アポロ型小惑星は地球に接近するもので、地球に衝突の可能性のあるNEOsのひとつである。

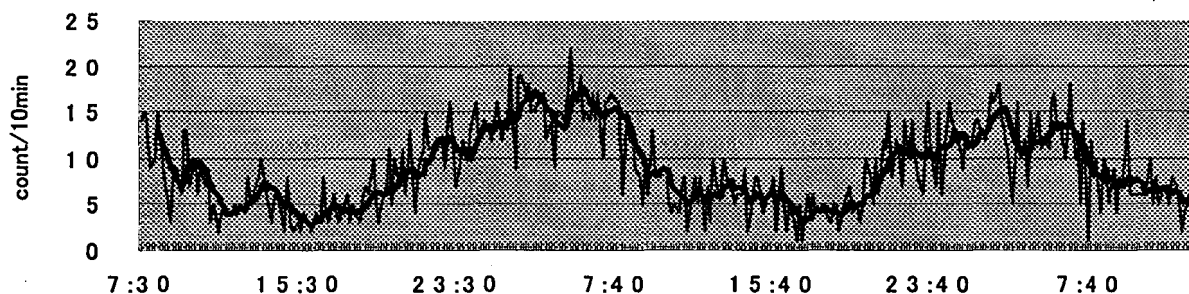


図8 ペルセウス座流星群(2000年)のHRO 計数カウント

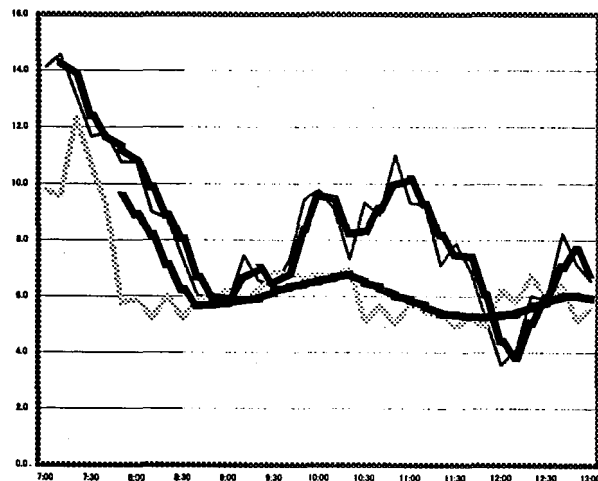


図9 日中の流星群の検出: 六分儀座流星群(2000年)のHRO 計数カウント

データとの比較を使った。ただし、9月30日前後の数日、太陽フレアに伴う強い磁気嵐の影響で、連日、海外のテレビ放送用電波が混信したため、流星数の計測誤差が大きい。そのため、図9では、目立った流星群のない9月2日から4日までの3日間の平均値をバックグラウンドとして、比較した。なお、太線はいずれも1時間の移動平均を表す。流星群の無い時期と比較して、明らかに10時から11時にかけて、流星数が増加していることがわかる。その流星数は定常値より5/10min程度大きく、1時間に直せば、30個程度であり、過去のレーダー観測(Weiss 1960)と同様の活動が見られている。ここで、大塚(Ohtuka et al. 1999)による近年のFM流星電波観測のデータとあわせれば、ほぼ10年間(1990-2000)は定常的に活動が続いていると考えられる。このことは、母天体Phaethonが、かれた彗星である—すなわち流星物質は母天体から相当以前に放出されたので、軌道上に広く拡散している—ということと無矛盾である。

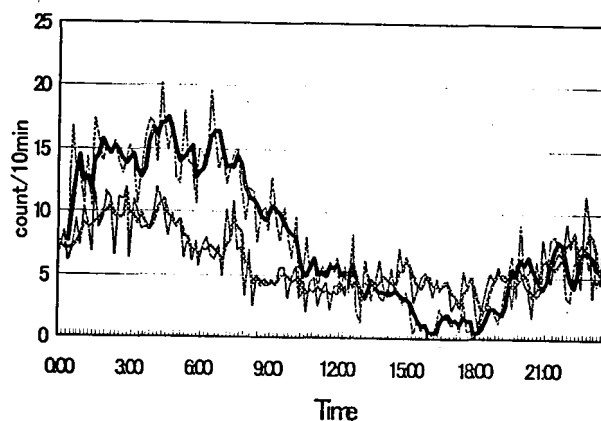


図10 オリオン座流星群(2000年)のHRO 計数カウント

3-4 オリオン座流星群2000

オリオン座流星群はハレー周期彗星(1P/Halley)を母天体として、毎年、10月21日前後を挟んで、1週間ほどHR20ほどの活動を示す流星群である。我々は、テストシステムの最後の観測対象として、オリオン座流星群の変動に注目していた。図10で示すように、活動のピークに近い18日から20日の3日平均と、バックグラウンドとして9月2日から4日までの3日間のデータを示した。なお、それぞれ太線は1時間平均(黒太線が10月)を示している。なお、PCのトラブルにより10月21日から1.5日分が欠測してしまったため、HROのデータから、流星群のピークは決定できなかった。

4. 流星電波検出効率

流星電波観測とは、図1で示したようにTからの送信電波が、流星プラズマ上の点Pで反射、その反射波をRで受信することで、流星数などを調べる観測である。ここで、反射点Pが鏡面反射⁵であることに注目

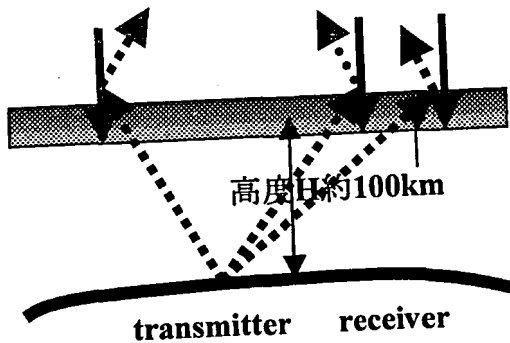


図 11 流星が垂直に入射するときの電波検出
してはい。

たとえば、図 11 のように、流星物質が地上 100km の上空に垂直に衝突する場合、T からの電波は、上方に反射するので、R に電波は届かない。すなわち、流星電波を全く受信できなくなる。流星物質の、地上 100km の球面上単位当たり面積当たりの流量は、球面上に垂直に流れ込む場合が最大である。そのとき、流星電波の受信はゼロになる。すなわち、この事実は、流星電波観測で検出している流星数と流星物質の流量とは比例していない事を意味している。すなわち、流星電波で計測される流星数の増減は、ある種の検出効率の補正をして、はじめて、流星の流量に比例する。逆に、これらの性質を積極的に利用すれば、「流星電波エコー」が「流星プラズマによる電波反射」であることを実証するための方法になる可能性がある。そこで、我々は、流星電波の T, R および流星の出現位置に依存する流星検出効率を求め、応用として流星群のときの活動の増減を推定した。

具体的な計算の詳細は別の機会に譲るとして、ここでは導出の基本的な道筋、および、ペルセウス座流星群、しし座流星群、ふたご座流星群へ応用した結果について報告する。

4-1 理論

流星電波の反射点 P と、T, R の位置関係は、流星電波が鏡面反射することから、T, R を焦点とした楕円上に在ることがわかる (図 12 参照)。これを反射楕円体と呼ぶことにしよう。

反射楕円上の点 P の高さは、流星電波として働く $H = 100\text{km} \pm 10\text{km}$ である。T-R 間の直線距離を

⁵ 流星の作る流星プラズマは、その自由電子密度の大きさによって、underdense trails と overdense trails に分けられる。以下の論文では、underdense trails のみ考える。なお、Perseids, Leonids 等は、対地速度が速く、ほとんどの流星が overdense trails であると言われている。しかし、今回の流星検出効率を適用すると非常に良く一致しているように見える。このことは、HRO では非常に小さい流星まで検出できるので、流星の数としては、underdense trails と思った場合と一致するのだろう。

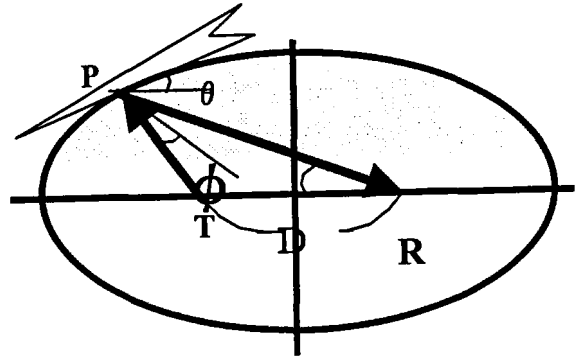


図 12 流星反射楕円体と T, P and R

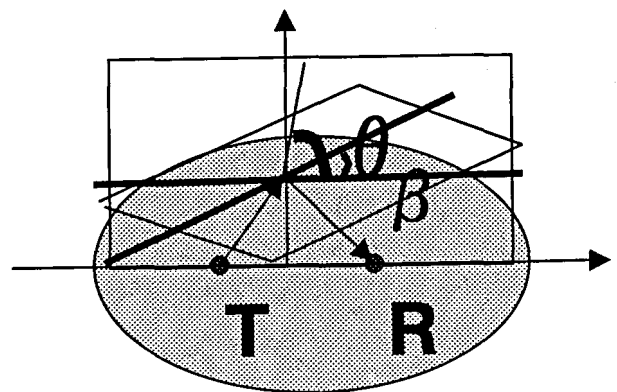


図 13 流星の入射角、 (θ, β) and ϕ
Dkm とする。また、流星プラズマは、P, T, R を含む反射楕円体上、点 P を含む接平面内にある。点 P への流星群の流束方向は、2つのパラメーターで決まる。たとえば、P, T, R が地表に垂直な面上に在ると仮定すれば、流星群の輻射点の高度 θ と、この面への入射角 β の 2つのパラメーターである (図 13 参照)。

この反射楕円体を極座標表示し、この PTR で作る平面上の反射点 P の微係数が流星群の入射方向 θ, β と一致させるという方針で、反射点 P の解析解が求められる。この公式を使って反射領域を求めた。このとき、反射領域の横の広がり、反射電波受信強度の値が TR 基準線と P 点のなす面が地表と垂直な時の値の 1/2 になるところでカットした。ここでは、良く知られている流星電波の受信強度の一般式

$$P_{me} \propto \frac{1}{R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \sin^2 \phi \cos^2 \beta)} \quad (1)$$

を使った (Wislez 1995)。ここで、 R_T, R_R は、それぞれ、TP の距離、PR の距離であり、 ϕ は、 $\angle TPR$ の半分であり、 R_T, R_R, θ の関数である (図 13 参照)。この式で判るように、反射領域は反射点 P への流星の入射角 (θ, β) と距離 R_T, R_R の 4 変数で決まる。

図 14 は、鯖江 (福井高専)-長野 (高専) 基線、距離

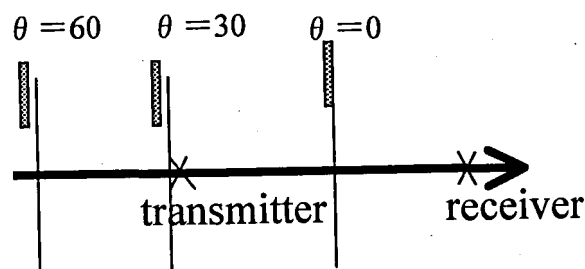


図 14 反射領域の空間的な様子

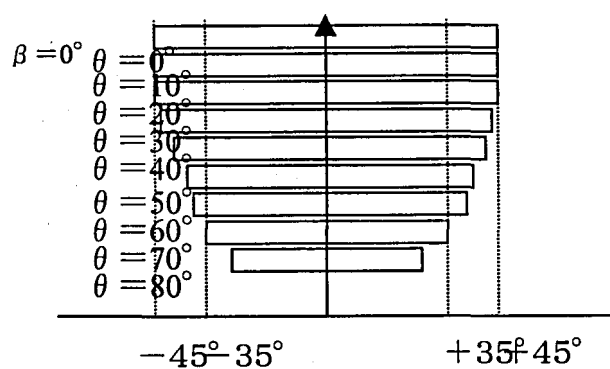


図 15 反射領域を天球上に射影した図
 $D=200\text{km}$ の場合の反射領域の空間的な概念図で、図 15 は、R から T の視線方向に見た反射領域を天球上に射影した図である。この図からわかるように、反射領域は、ほぼ垂直な面で、縦の長さは流星現象のおきる高さの範囲の大きさ、横は、 100km 程度である。図 14, 15 は $\beta = 0^\circ$ を描いているが、反射領域の形状は、 $\theta \sim 0^\circ$ 以外、 β の依存性がほとんどない。図 14 から判るように、入射角 θ が小さいときは、鯖江-長野の間付近が反射領域になるが、入射角 θ が大きくなるにつれ、鯖江の後方上空に移動して行き、 $\theta = 90^\circ$ 度近辺は、無限の彼方になり、実質 $P_{me} = 0$ になる。ちなみに、 $\theta > 90^\circ$ になると反射領域は、長野側に移る。それゆえ、輻射点为天頂付近を通過する流星群では、反射領域が、はじめは西側にあり、南中直後に東側の遠方に飛び、時間が経つにつれ中間付近に戻ってくるという大移動が見えると期待できる。

最後に反射領域に流れ込む流星物質の流量を求め、いま、反射領域の大きさを $S = S(\theta, \beta, D)$ とすれば、その領域 S に流れ込む流星物質の流束（流星流束と呼ぼう）の大きさは、入射方向の 2 つのパラメータ (θ, β, D) と

$$F(\theta, \beta, D) = S(\theta, \beta, D) \times \cos \theta \times \cos \beta \quad (2)$$

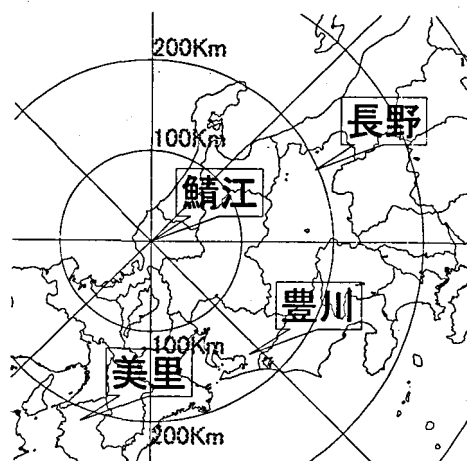


図 16 HRO 観測点の距離と位置の関係で決まる。

4-2 流星電波検出効率

流星の流量が一定の値の時、 $F(\theta, \beta, D)$ は、全体を F の最大値で規格化すれば、流星電波の検出効率とみなせる。

$$f = \frac{F(\theta, \beta, D)}{F_{max}} \quad (3)$$

ここでは、このことを流星電波検出効率と呼ぶことにする。

図 16 は、鯖江 (福井高専) を中心とした、 $D = 200\text{km}$ 近傍の HRO 観測点のいくつかである。

ここで、はじめの例として、鯖江 (福井高専) から東、北 (南) 200km 離れた点のペルセウス流星群の効率を図 17 に示す。これから判るように、検出効率は、輻射点の高度が高いときより、低いところが比較的大きいこと、夕刻では、南北方向の方が東西方向より効率が良いことが判る。その訳は、流星が T-R の垂直面内に飛んだときが一番 P_{me} が大きいので、ペルセウス座流星群の輻射点が北天に低くなる夕刻に南北配置の受信効率が良くなり、かつ、反射面に垂直に流星流束が入ることになり、流星をたくさん受信するためである。

4-3 ペルセウス流星群への応用

ここで、2000 年 8 月のテスト観測におけるペルセウス座流星群の活動中の 8 月 13 日から 15 日までのデータと長野高専に置けるペルセウス座流星群に関する検出効率と比較してみた。図 18 は、長野高専におけるペルセウス座流星群の検出効率の一日のデータで、図 19 が、図 8 の期間を 1 日の時間変化のグラフに重ねた流星数の変動である。ここで、白い実線は述べ 2 日の流星数の時間変動の様子を、下の細い実線は、9 月 2 日から 4 日までの 3 日間の時間変化の平均であり、黒

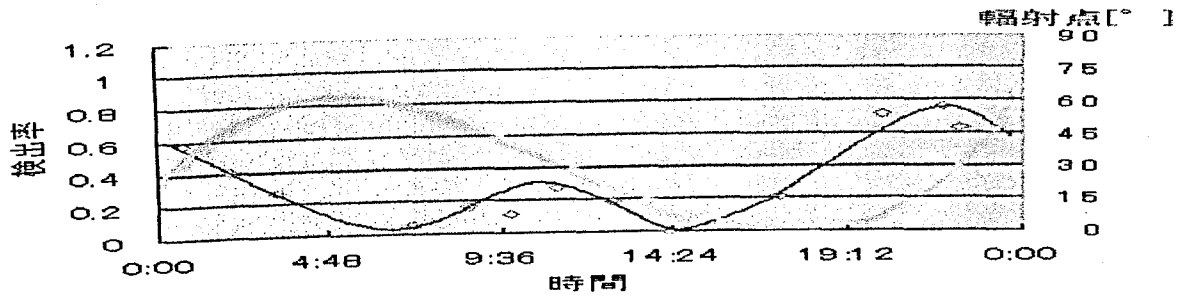


図 18 ペルセウス座流星群の予測

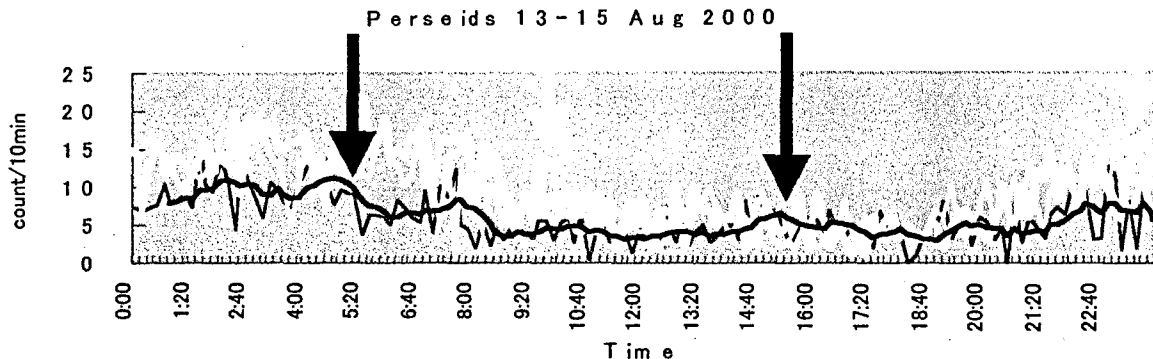


図 19 ペルセウス座流星群の実測

4-4 他基線での応用

次に観測基線が異なる時も成立するか、愛知県立小坂井高校鈴木和博氏の公開データを使って調べてみた。過去5年間のデータの多くが良い一致を示した。

4-5 しし座流星群とふたご座流星群の予測

最後に、福井高専—長野高専基線でのしし座流星群とふたご座流星群の流星検出効率を図20で示す。これらの流星群における理論の成否の結果は、この論文が出版されたころには判っているだろう。

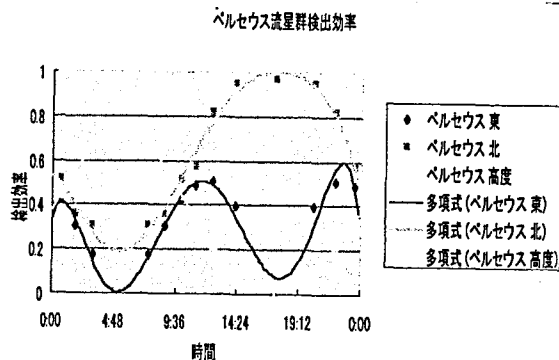


図 17 電波流星の検出効率

い実線はそのデータを1時間の移動平均にしたグラフである。このペルセウス座流星群のデータにもっとも検出効率の高い時刻、10時、および24時ごろに白い矢印をつけ、検出効率のもっとも低い時間帯、5時ごろ、および、15時ごろに黒線の矢印をつけた。これより、検出効率の下がる時間帯では、散在流星の作るバックグラウンドとほぼ同じ大きさであることが読み取れる。すなわち、ペルセウス座流星群の流星はほとんど受かっていない。一方、20時-4時、6時-13時の間は、バックグラウンドレベルより遥かに多い流星が受かっている。

5. 新観測システムと観測計画

5-1 新システム概要

流星電波観測において、流星検出率がT-R基線や流星の出現位置に強く依存することがわかった。われらは、これらの依存性を結果をふまえて、「流星エコーが流星によるものを確認する」実験のために、新しい観測システムを構築した。

図21に、観測システムのチャートを示した。観測システムは大きく分けて、反射点移動検出系と偏波検出系、およびデータバックアップ系の3つでできている。

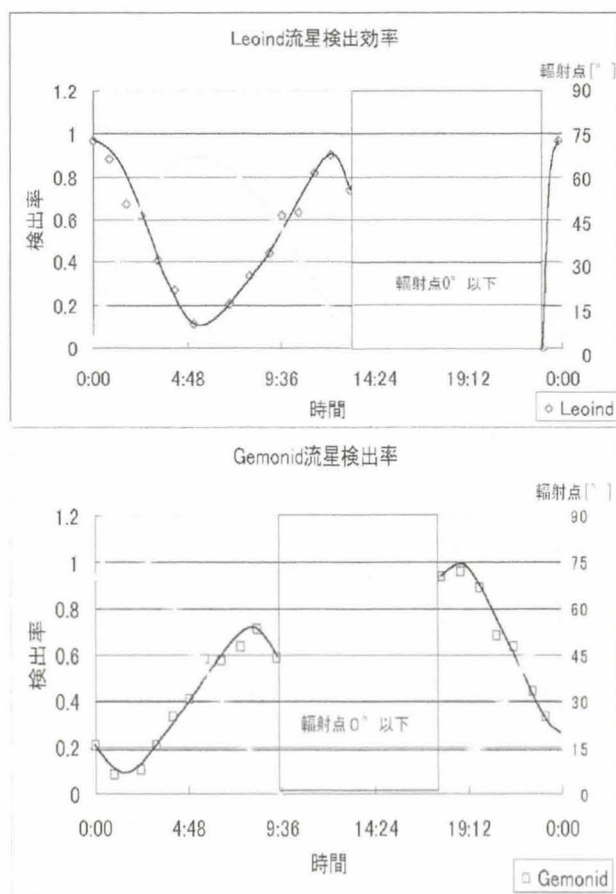


図 20 しし座流星群とふたご座流星群の検出予測値

5-2 位置決定システム

アンテナは、53.75MHz用自作の2素子ループアンテナ3台を使っている。流星の反射領域の移動の検出を考えると、指向性の広い2素子ループアンテナ($\sim \pm 60^\circ$)では、精度良く反射点位置を決定することは難しい。しかし、輻射点の南中の前後に反射領域が西の低空から東の低空へと短時間で移動することを検出するのは、可能と考えている。アンテナの配置は、指向性の重なりが天頂付近であり重ならないように、仰角 30° に固定した2つのアンテナを福井高専—長野高専基線上にAアンテナを西向き、Cアンテナを東向きに置く。

(1) それぞれのアンテナで検出された流星数の時間変化から、反射領域のジャンプが予測と一致するか確かめる。

(2) アンテナの指向性が広いのでA,Cアンテナから同一流星の反射波を受信する事が多い。このとき、同時刻に検出できた流星のA,Cの強度比をそれぞれきめれば、反射点の大体の位置が推定できる。

(2) の場合、2つのアンテナから同時に入ったか、同時刻性をどのようにチェックするか問題となる。観測のソフトはCPUやメモリーに負担をかけているの

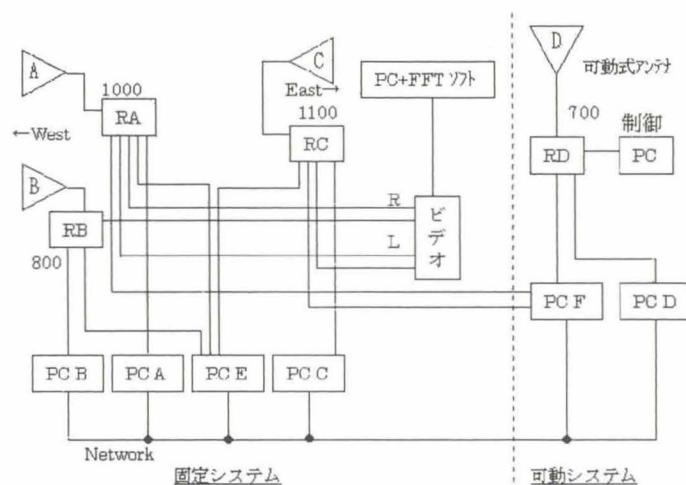


図 21 観測システムのチャート

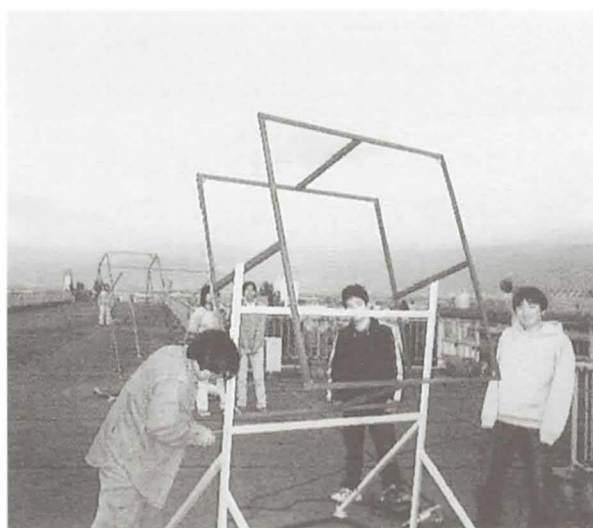


図 22 ペアアンテナ製作時

でPCの内蔵時計が1日に数分も遅れてしまう。すなわち、PC-A,PC-C出力の時刻だけでは同時刻の出現かどうか判断できない。そこで、我々は観測用PCをすべてネットワークにつなぎフリーソフト「桜時計」を使ってNTP(Network Time Protocol)サーバーにアクセスし、パソコンの内蔵時計の狂いを常に0.1秒以下に修正し、同時流星を確認できるようにした。しかし、PC-A,PC-Cの出力の画像ファイルを目で見て同時流星を探すのは、現実問題としてほとんど不可能である。そこで、受信機A,Cの送信周波数と受信周波数のずれを1000Hz,1100Hzに調整し、この2つの出力をPC-Eに同時入力、現在使用しているソフトFFTHROでリアルタイムに計測することにした。FFT処理をすると、Aからの流星エコーは周波数



図 23 31.57MHz 用アンテナ

1000Hz 付近に、C からの流星エコーは周波数 1100Hz 付近にでるから、同時に受かっていれば、出力画面上の同時刻に 1000Hz 付近と 1100Hz 付近にエコーが表示される。なお、このソフトのパワーメーターは、FFT 処理をする周波数帯への入力合計を表示するので、A、C 各々の強度比は、残念ながら、ここでは判らない。そこで、現状では同時流星の時刻を記録して置き、あとで、PC-A、PC-B からその時刻の強度を読んでいる。

可動式アンテナは、通常は天頂を向けて、モニター観測を行っているが、しし座流星群やふたご座流星群の時には、基線上を 2 時間で 1 回振れるように、アンテナの方向を 30° づつずらしながら、それぞれ 20 分の観測を行う。これを 5 回 ($20\text{分} \times 5\text{回}$ ($30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$)) セットで行い、流星の数と共に、大きさの分布も記録する。この観測を輻射点の昇っている時間に数回行う予定である。

5-3 偏波検出システム

反射電波は特定の偏波を持っている。そこで、横偏波と縦偏波を検出する専用アンテナで観測することで偏波による受信強度や流星数の違いを検出し、流星エコーが電波の反射現象であることを確かめる。

ループアンテナは、給電点の位置を変えることで、横偏波と縦偏波の切り替えができる。アンテナ A は横偏波用で、かつ方向決定用アンテナ (西) と兼ねている。アンテナ B は、縦偏波専用で使用する。A と B とは同じ西側の同一の視野を向いている。アンテナ A の出力を 1000Hz ずらして受信機 A で受信、アンテナ A の出力を 800Hz ずらして受信機 B で受信した、信号を、位置決定と同様に PC-E に同時に入れて、同時刻での流星をチェックする。それぞれの強度比を見る場合は、PC-A、PC-B から探して目視で決める。ただし、

偏波の違いを確認するため、実験観測期間に数回、アンテナ B の給電点を変えて、偏波の違いが本当にあるかを確認する。

5-4 VTR システム

以上のようにリアルタイムでの情報処理と並列して、実験期間の 10 日間程度 (流星群の無い日を数日、しし座流星群、ふたご座流星群をそれぞれ 3 日間)、受信機 A、B、C の出力をビデオデッキで録音する。このテープは後日、マルチチャンネル FFT で、同時刻流星とその強度比を求める (1 時間あたりのデータは約 1GB)。

6. 議論・まとめ

我々は、「太陽系科学を行うための流星電波観測」の最初の年として、「流星エコーが流星プラズマによる電波反射」であることを実証するための諸実験や考察を行ってきた。

はじめに、2000 年 8 月から 10 月までの 3 ヶ月間のテスト観測において、流星電波観測の基本を収得するとともに、観測システム (アンテナ系、受信機系、観測 PC 系、および、画像データから目視で流星数を数える) の安定性を確認した。

同時に、流星電波観測における流星検出効率を、理論的にはじめて明らかにすることに成功した。この理論を使って全国各観測点ごとの流星検出効率を求め、流星群の増減の変化を説明することができた。ただし、現段階では、多くの近似を使っているので、特殊な条件のときには、うまく合わない。その 1 例として、輻射点の高度が低いときがある。このとき、流星物質は上層大気へ地表とほぼ平行に入射するので、大気中の通過距離が伸び、流星現象が起きる高度は、通常の 100km よりもはるかに高い上空で起きることになる。これらの効果をこれからきちんと取り扱うことで、より現実に近い流星検出効率を求めたい。

流星電波観測は、24 時間連続の観測ができ、しかも通常の光学観測では検出が難しい小さい流星も検出可能である。その意味で、地球に降り注ぐ流星物質の量やその特性を調べるには、非常に有効な手段である。しかし、これまでは、流星検出効率が考慮されていなかったもので、特定の流星群などの流量をきちんと求められなかった。

我々が導いた流星検出効率による補正をおこなえば、流星電波観測で流星物質の流量をより正確に求めることができるだろう。さらに、流星群のない日々の変動の様子を精度良く計測できれば、流星物質の速度分散

や、空間分布・速度分布の非等方性が検出できるのではないかと期待している。

「流星エコー」の実証するため、今までやってきたこと、これから行う実験についてまとめると、次のようになる。

- 福井高専-長野高専間の流星検出効率をもとめ、流星群ごとの検出効率の時間変化を求めた。この結果を、ペルセウス座流星群に適用したところ2000年のデータがきわめて良く一致した。すなわち、流星エコーの増減が、流星群からの流星である証拠と考える。
- 福井高専-各観測点毎の流星検出効率をもとめ、流星群ごとの検出効率の時間変化を求めた。公開されている過去5年間のHROデータに適用し、きわめて良く一致した。すなわち、流星エコーの増減が、流星群からの流星である証拠と考える。
- 福井高専-各観測点毎の流星検出効率を求めるので、全国のHRO観測者に呼びかけて、2000年のしし座流星群、ふたご座流星群の観測キャンペーンを行う計画である。このデータを元に、流星検出効率が本当にうまく働くか確認すると共に、改良を加える予定である。同時に、これらのデータから流星の輻射点の方向が求まるか、その方向が観測している流星群と矛盾しないか考察し、流星によるエコーである確証を得たい。
- 流星電波の反射点Pが天球上動いて行く様子を検出することで、確かに流星現象によるエコーである直接的な証拠を得る。このため、ペアアンテナと可動アンテナの3つのアンテナによる観測システムをつくり、テスト観測をはじめた。11月10日ごろより本観測に入り2001年2月まで連続的にデータを取る予定である。
- 電波の反射によって、流星電波が特定の偏波しかないことを検出し、確かに反射現象である直接的な証拠を得る。このため、偏波検出用ペアアンテナによる観測システムをつくり、テスト観測をはじめた。11月10日ごろより本観測に入り2001年2月まで連続的にデータを取る予定である。
- 流星群のとき流星電波の反射領域が天球上動いて行く様子を光学ビデオ（超高感度白黒CCDビデオカメラWAT-902H）で検出する。

以上の様に、流星電波観測のスタートとして、「流星エコー」が流星による現象であることの間接的な、あるいは直接的な検証をテーマに研究を進めてきた。ここで、流星電波観測はやっと天文学へのスタートを切ったといえる。

本研究では、福井工業高等専門学校電子情報工学科の前川公男氏の流星観測用の電波(53.75MHz)を使っています。長年にわたり安定に送信されていることに感謝します。試験観測を始めるにあたり、京都大学宇宙電波科学研究センターの中村卓司氏の主催するメールリストMURONETでの議論が大変役に立ちました。大川一彦氏には自動観測用ソフトHROFFTを使わせていただきました。愛知県立小坂井高校鈴木和博氏にはHRO計測の公開データを使わせていただきました。紙面の都合で結果を示せませんでしたが、次の機会で発表したいと考えています。また、日本流星研究会の下田力氏には観測に関する多くの情報をいただきました。長野高専の堀内泰輔氏、楡井雅巳氏には、観測用PCを貸していただきました。長野高専の春原真一氏には、実験室の諸備品を始め、多くの準備をかけました。長野高専の柞山このみ氏には、データの整理を手伝ってもらいました。We would like to thank Mr. Warren William Christianson for encouragement of our research. ワテック株式会社応用技術部 阿部久雄氏には、超高感度白黒CCDビデオカメラWAT-902H等をお借りすることができました。天候不良のためペルセウス流星群では、その能力を発揮できませんでした。次回を期待します。最後に、国立天文台広報室長の渡部潤一氏には、検出効率の研究の進展状況などの情報をいただきました。みなさんに感謝したいと思います。

7. References

- Babadzhanov, P.B. and Obrubov, Yu.V.,
Celest. Mech. 54.111. (1992)
- Maegawa, K., WGN, the Journal of the IMO, 27, 1 (1999)
- 宮沢明子, 大西浩次, 服部忍, 機会学会信越支部 (山梨大) (2000.10)
- McKinley D.W.R., "Meteor science and engineering", McGraw-Hill, (1961)
- Ohtuka, K., Shimoda, C., Yoshikawa, M. and Watanabe, J.,
Earth, Moon and Planets, 77, p.83-91, 1999
- Suzuki, K., Sky and Telescope, 51, 359 (1976)
- Wislez J.-M., Proceedings of the
International Meteor Conference, 1995, edited by Paul Roggemans and Andre Knofel, IMO, 1995, p.83-98. (1995)
- Weiss, A.A.,
Mon. Not. R. Astron. Soc., 120, 29, (1960)