

# アルマー ALMAr 冒険の

第10回

「ソフトウェアラジオを使って流星の電波観測」

## アルマー (ALMAr)

電波宇宙から可視光宇宙へやってきたこどもの竜。電波宇宙に危機をもたらす謎の妨害電波「ジャミングー」を浴びて意識が遠のくが、そこに9つの頭をもつ巨大な竜が現れて「電波宇宙を守るために、グランドアルマーの宝剣を探せ」と告げられ、気がつくや野辺山高原の草むらに倒れていた。



## 千里奈央 (せんり・なお)

蒼天高校の2年生。星空や宇宙が大好き。将来の夢は天文学者になること。天文部の春合宿中に、ひょんなことから「アルマー」や「いざよい」と出会い、ともに電波宇宙の危機を救うとされる「グランドアルマーの宝剣」を探す冒険の旅に出る。



## いざよい (十六夜)

奈央とアルマーの前に現れた謎のメスネコ。可視光と電波の世界を見わける特殊能力の持ち主。電波宇宙や可視光宇宙について豊富な知識を持ち合わせている。どうやら、アルマーの過去を知り、電波宇宙の危機の原因やグランドアルマーの宝剣のありかを知っているようなのだが……。



★前号・第09回

「パラボラアンテナを作って太陽の電波観測」

までのあらすじ

長野県駒ヶ根工業高校の生徒たちに影響を受けた蒼天高校天文部のメンバーたちは、シノラー先生の手ほどきでDIYショップで材料をそろえ、太陽電波観測用パラボラアンテナを自作。実際に太陽にアンテナを向けて、ついに太陽からの電波を受信することに成功したが、それはブラックストーン博士が奈央を電波世界に引き込むための策略だった (のかも)。

(※上のまんがは第09回の最後のシーンです)

背景画像：ダイボールアンテナの後ろに出現したふたご座流星群の流星。実際に撮影された流星の画像をコラージュしたもので、科学的正確性は保障されていません。

# 1 流星はなぜ光るの？ ふたご座流星群ってどんな現象？

今回の「アルマーの冒険」は、流星の電波観測にチャレンジします。  
まずは、観測対象となる流星と流星群について解説しましょう。

## ●流星って何？

夜空の一点で突然に光り始め、その光点がすーっと動き、わずかな時間で消えてゆく流れ星。その正体は、宇宙空間にある小さな固体の天体が地球の大気と衝突して光を放つ現象です。天文学の用語では「流星」と呼びますが、天体そのものというよりも、むしろ天文現象といえるものでしょう。

流星の元となるのは、砂粒程度から数cmほどの大きさの「惑星間ダスト（以下、ダストと記します）」です。ダストは小さくても天体ですから太陽系内での軌道上を進んでいますが、その軌道が地球の軌道と交差していて、たまたま同時刻に同位置で出くわせば、地球との衝突を起こすことになります。

ダストの速度は、最も速いもので秒速40kmほどです（それより速いと太陽系を飛び出してしまう）。地球の公転の速度は毎秒30kmほどですから、正面衝突なら、地上から見ると双方の速度の和の毎秒70kmにもなります。時速になおすと、25万kmほど。約1.5時間で地球から月に到達できるほどの速度です。

さて、地球に衝突するといっても地球には大気がありますから、ダストは大気の中を進むことになります。とはいえ、あまりに高速なので、ダストが進む前面の大気分子は逃げる間もなく押しつぶされていきます。すると、温度が上昇する断熱圧縮が起こります。自転車のタイヤに空気を入れるとき、空気入れのポンプが熱を持つと同じ原理です。流星の場合は、「対流空気力学的加熱」と呼ばれています。

さらにダストの周囲には、大気の密度や圧力、温度などが急激に変化する「衝撃層」が形成されます。ダストが毎秒10km以上の速度では、この衝撃層は数万度から10万度を超える温度にまで達します。すると、大気中の酸素分子や窒素分子などは衝撃層内で原子に解離してしまいます。さらに高温高圧のため、原子から電子が離れてしまい、イオンと電子に分かれたプラズマの状態になっていきます。このプラズマは電磁波を放射し、電子レンジのようにダストをさらに加熱していきます。これは「輻射加熱」と呼ばれています。

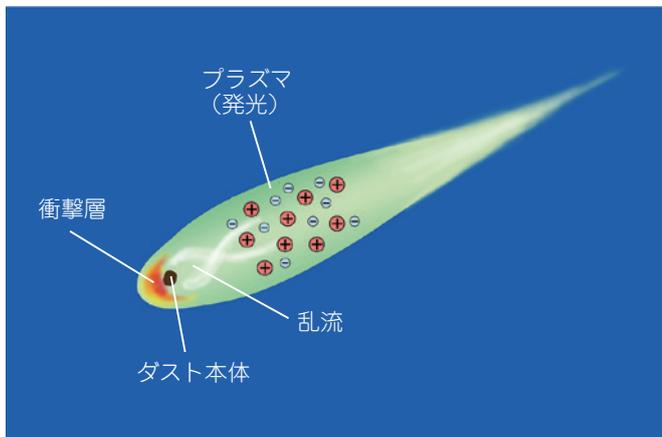


図01 ダストが猛スピードで大気分子と衝突しているようすを模式的に描いた。進行方向正面は、大気分子が押し詰められて、高温高圧の衝撃層が形成され、さらにダストの固体も溶融し、ともにプラズマと化す。それらは、ダストの後方で乱流となった後、一気に飛び散り、周囲の大気と衝突することで大気元素を励起させ、さらにそれらが定常状態に戻るときに輝線を発して輝く。

輻射加熱によって、ダストを構成する固体物質は爆発的にガスへと変化して周囲の大気と衝突しますが、衝突したガスの原子も大気もその衝撃で励起されます。励起とは、原子が安定な「基底状態」から、より高いエネルギーを持つ状態へと移ることです。この「励起状態」の原子は、やがて安定になろうとして光でエネルギーを放射します。つまり、流星の輝きは、ダストの運動エネルギーが大気との複雑なプロセスで、最終的に光として見えているものなのです（図01）。

また、原子が励起状態から基底状態へ戻る時に放射する光は、「元素」によって特定の波長の「輝線スペクトル」であることが知られています。輝線スペクトルが見られる身近な現象としては花火などの炎色反応でしょう。流星の光は主にさまざまな元素の輝線スペクトルで構成されているのです（図02）。

ちなみに、流星が輝く高度は、おもに標高120kmから80kmの間です。



図02 流星の光を分光して得られたペルセウス座流星群のスペクトル。流星本体に近い紫はマグネシウムやカルシウム、明るい緑はマグネシウム、明るいオレンジはナトリウム、赤は酸素や窒素の輝線スペクトルだ。発光点側に緑のスペクトルがちぎれたようにうっすら見えるが、これは酸素の禁制線と呼ばれるもの。スペクトルを詳細に調べれば、ダストに含まれる物質の成分を知ることができる。

## ●流星群とは？

流星の元となるダストは、果たしてどこからやってくるのでしょうか。宇宙空間でのダストは、とても小さく暗いので、地上からは光や電波で直接観測することができません。そのため、流星が夜空のどこに、いつ出現するかを予測することは困難です。ところが、毎年特定の時期に流星が集中して出現する「流星群」の存在が知られています。

実は、流星群の流星の起源は、「彗星」です。ぼんやりした頭部から長い尾を伸ばして天球上を移動していく天体で、「ほうき星」とも呼ばれています。彗星の正体は汚れた雪玉ともいわれていて、彗星の本体である「核」の組成は、水の氷にチリや揮発成分が混ざったような組成で、太陽に近づくと氷が溶けて蒸発し、いっしょにガスやチリが放出されます。このチリが流星となるダストの正体のひとつです。

彗星起源のダストは、時間と共に彗星から離れていきますが、彗星と同じような軌道を通り、たくさんのダストで構成されるダスト・トレイルを作ります。また、彗星は他の天体の引力の影響を受けることなどで、わずかに軌道が変化していくので、太陽への接近ごとに軌道が異なるダスト・トレイルが形成されていきます。したがって、過去に何回も太陽に近づいたことのある彗星で

は、何本ものダスト・トレイルが束になったようなダストの帯が彗星の軌道に沿って作られるのです。

こうしたダスト・トレイルと地球の軌道が交差している場合、地球がダスト・トレイルを横切る位置にさしかかると、たくさんのダストがまとめて地球と衝突することになります。これが流星群が見られる理由なのです。地球が彗星の軌道を横切る日時は毎年ほぼ決まっていますので、特定の時期に特定の流星群が出現するのです（図03・表01）。流星群の元となるダストを放出した彗星のことを「流星群の母天体」とも呼んでいます。

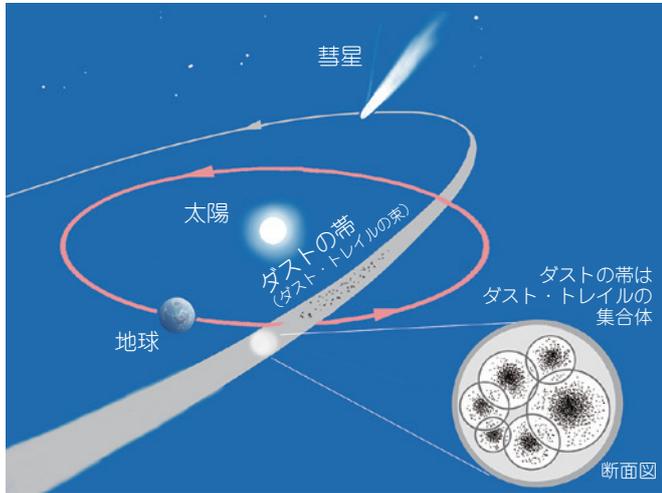


図03 太陽系内で地球の軌道と彗星の軌道が交差している模式図。彗星は太陽に接近するごとにダストを放出し、そのダストで構成されたダスト・トレイルが毎回作られる。何回も太陽に接近した彗星では、わずかに軌道の異なるダスト・トレイルがいくつも生成されるため、彗星軌道の近くにはダスト・トレイルが束になったダストの帯が存在している。ダストは時間とともに拡散していくので、きわめて古くから活動している彗星では、それぞれのトレイルの区別ができなくなるとも考えられる。地球は1年で太陽の周りを巡るので、彗星と地球の軌道が交差していると、これらのダスト・トレイルと毎年ほぼ同じ日付に交差することになる。

流星群によって、ダストと地球の軌道の交差角度は決まっているので、地球と衝突するダストは同じ方向からやってきます。そのため、それぞれのダストは地球大気に対して並行に突入しますが、地上から見える流星の経路を逆にたどると星空のほぼ一点に収束します。ここを「放射点」と呼んで、放射点のある星座や近くの恒星の名前を付けて、「しし座流星群」や「みずがめ座η（エータ）流星群」などの流星群名としています。

もちろん、流星群以外の流星もたくさんあります。「散在流星」と呼びますが、それらはきわめて古い時代に存在していた彗星を起原としていたり、「小惑星」どうしが衝突して生成されたダストである可能性もあるでしょう。

### ●毛色の違うふたご座流星群

今回、電波での観測を行った「ふたご座流星群」は、冬の星座であるふたご座のα星（カストル）の近くに放射点があります。極大日は12月14日前後で、実際の流星出現数も流星群の中ではトップクラスです。国内では真夜中に放射点が天頂付近にまで昇ることから、月明かりの影響がない好条件下では、1人の観測者が1時間で45個ほどの流星を観測することができます（図04）。

また、先に述べたように、流星の

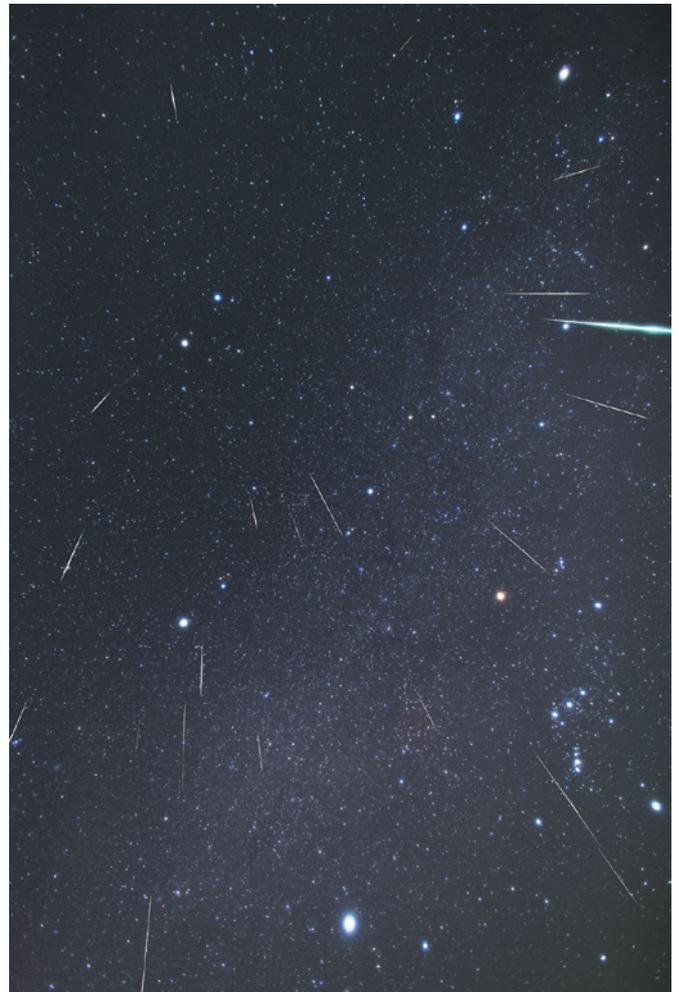


図04 2009年のふたご座流星群極大日の夜に、長時間にわたって撮影したデジタルカメラ画像から、放射点を示しやすくするために流星の写っている部分をコラージュしたもの。撮影時刻によって放射点の地平高度が異なるため、流星の明るさなどの科学的な再現性は保障されていないが、放射点付近を中心に流星が飛び出してくるようすが見て取れる。ちなみに放射点とはいうものの、さまざまな理由で1点には収束しないで、ある程度の範囲を持つ。

元となるダストは彗星から放出されたものと考えられていますが、ふたご座流星群は特殊で、小惑星フェートン（小惑星番号3200）が母天体とされています。じつは、小惑星であるはずのフェートンが、太陽に近づいたときに彗星のように物質を放出していることも分かっています。そのため、フェートンはもともと彗星で、放出できる物質がほぼ枯渇した天体ではないかと考える研究者もいました。そんなフェートンの謎を探るため、実際に探査機を送り込む日本のプロジェクトも進んでいます（12ページに詳細）。

流星群名	流星出現期間	極大	極大時1時間あたりの流星数
しぶんぎ座流星群	12月28日－1月12日	1月4日頃	45
4月ここと座流星群	4月16日－4月25日	4月22日頃	10
みずがめ座η（エータ）流星群	4月19日－5月28日	5月6日頃	5
みずがめ座δ（デルタ）南流星群	7月12日－8月23日	7月30日頃	3
ペルセウス座流星群	7月17日－8月24日	8月13日頃	40
10月りゅう座流星群（ジャコビニ流星群）	10月6日－10月10日	10月8日頃	5
おうし座南流星群	9月10日－11月20日	10月10日頃	2
オリオン座流星群	10月2日－11月7日	10月21日頃	5
おうし座北流星群	10月20日－12月10日	11月12日頃	2
しし座流星群	11月6日－11月30日	11月18日頃	5
ふたご座流星群	12月4日－12月17日	12月14日頃	45

表01 主な流星群の一覧 「流星出現期間」は、流星群の流星が出現する可能性のある期間で、実際にはほとんど見られない可能性もある。「極大」とは、もっとも流星数が多くなる日。「極大時の1時間あたりの流星数」は、極大の夜に月明かりや街明かりの影響がなく、視界の開けた好条件の場所で1時間に見ることができると予想される流星数（<https://www.nao.ac.jp/astro/basic/major-meteor-shower.html> より作成）。

第10-1章 流星が反射する電波を受信して観測ができる？



## 2 流星は地上からの電波の反射を観測

流星の電離柱が反射した超短波をソフトウェアラジオで受信

### ●電波による流星の観測のための予備知識

電波で流星を観測すると聞くと、前回の太陽電波観測のように観測対象そのものが電波を出している、それを受信するように感じますが、流星の場合は異なります。もちろん、流星そのものが電波を発している可能性（15ページのカコミ参照）もありますが、これまで主に行われている流星の電波観測は、地球大気の中を飛翔する流星が地上から送信された電波を反射するので、それを受信するという方法で行われています（図05）。

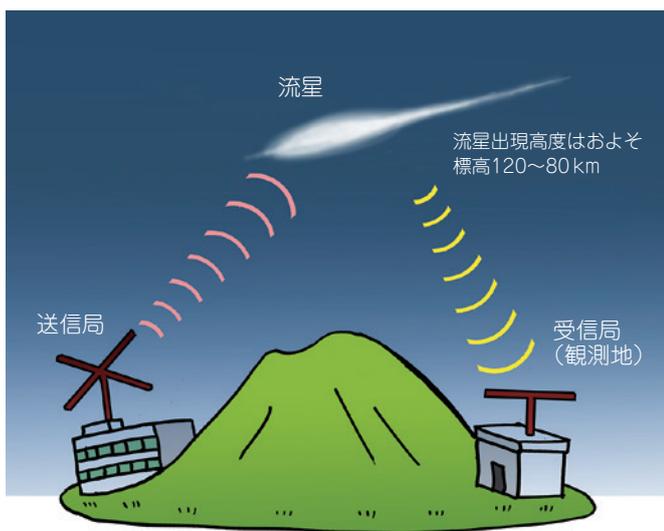


図05 物質の反射による電波を観測するには、ふたつの方式がある。送信アンテナと受信アンテナが同じ場所にあって、反射した電波を捉えるのを後方散乱方式と呼ぶ。これは、航空機管制や気象レーダーなどで使われている。また、ここで紹介する流星電波観測では、送信アンテナと受信アンテナが離れた場所にあるもので、前方散乱方式と呼んでいる。

流星が夜空で輝く原理は02ページで解説しましたが、流星が飛翔した後はしばらくの間、電離した物質が残されます。これを電離柱と呼んでいますが、この電離柱がFMやテレビ放送に使われるVHF帯（超短波・周波数30～300 MHz）の電波を反射するのです。したがって、観測する電波は、流星そのもので反射した電波ではないのですが、ここでは単純に流星での反射と記すことにします。

かつては遠方のFMラジオ局の電波を受信するFM流星観測が行われていました。流星が出現すると、普段は聞くことのできない遠方のラジオ局の音声が一瞬間こえるのです。1990年代以降は、アマチュア無線同好者との共同観測で、アマチュア無線の6mバンドと呼ばれる50 MHz帯によるHRO（Ham-band Radio Observation）が行われています。さらに近年では、再びFM放送の電波を用いたFRO（FM Radio Observation）や、航空機航法支援の電波を用いたVRO（VHF omni-directional radio range Observation）なども行われていますが、それぞれに長所短所があります。ここでは、現在一般的となっているHROによる流星電波観測を紹介しましょう。

HROの電波は、90年代後半より福井工業高等専門学校の前川公男氏の尽力によって、同校の電波研究会（コールサインJA9YDB）から53.750 MHzで送信されていましたが、現在では福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会が送信する53.755

MHz（JH9YYA）と宮崎大学無線部OB会が送信する50.017 MHz（JA6YBR）が利用できます。

このHROでは、基本的に電波を音声に変換して流星の出現を音として認識するという手法を取っています。観測には、アンテナと受信機が必要です。かつては、比較的高価なアマチュア無線機の利用や、専用の受信機が開発されたりしていましたが、近年はPCを利用したSDR（Software Defined Radio =ソフトウェア無線機）で安価に観測システムを構築可能です。

アンテナは、感度を追求するなら専用のアマチュア無線用アンテナを利用したいところですが、実験的に観測を試みるなら、きわめてシンプルな構造のダイポールアンテナでもなんとか実用になります。ここでは、ダイポールアンテナを製作してSDRでの流星電波観測の実際を紹介していきます。

SDRの仕組みは、これまでのラジオがアンテナで電波を受信し、アナログ的に同調回路で周波数を選び、検波器で信号を取り出して出力装置で信号を音声に変換（「アルマーの冒険」第07回参照）していたのに対し、同調回路より先をデジタル的に処理し、一部の機能やインターフェースをコンピューターのソフトウェアで行うというものです。しかも、技術の進歩によってUSB dongleと呼ばれるきわめてコンパクトな装置にまとめられています（図06・07）。価格も4000円程度で、PCとはUSBで接続し、専用のフリーウェアで運用が可能です。



図06 SDR Dongleは、Nooelec社製のNESDR SMARt v4 SDRを使用。インターネットの通販で4000円程度で購入できた。いろいろなタイプのSDRが販売されているが、温度変化による受信周波数変動を抑えることができる温度補償型水晶発振器（TCXO）内蔵機種がお勧め。また、SDR DongleのアンテナコネクタがSMA（オス）で、自作するアンテナのコネクタがF型（メス）なので、変換アダプタ（400円程度）も同時に購入した。

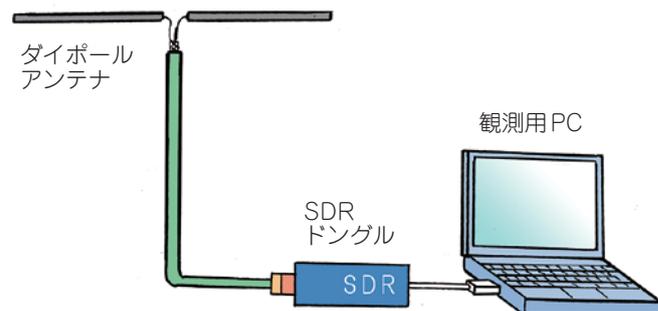


図07 流星電波観測を行うための機器は、アンテナ、同軸ケーブル、SDR Dongle、PCというシンプルな構成。もちろんPCにはSDRを動かすためのフリーウェアをインストールしている。さらに、流星観測専用のフリーウェアも配布されているので、合わせて使用している。

第10-2章 自作のアンテナを設置してよいよ観測開始だ 冒険



やあ

おはよう  
ございます

本町駅



アンテナ  
用意しました

ありが  
とう



ところで先生、  
流星のこと  
教えてください

それはね  
(02pで解説)



木曽観測所に  
着いたよ

N大の人たちも  
来ているはずだ



やあ  
やあ

お久し  
ぶりです



N大の電波観測チームです

アベです



どうやって電波  
観測するんです？



まず、アンテナを  
設置します

ダイポール  
アンテナを  
持ってきました

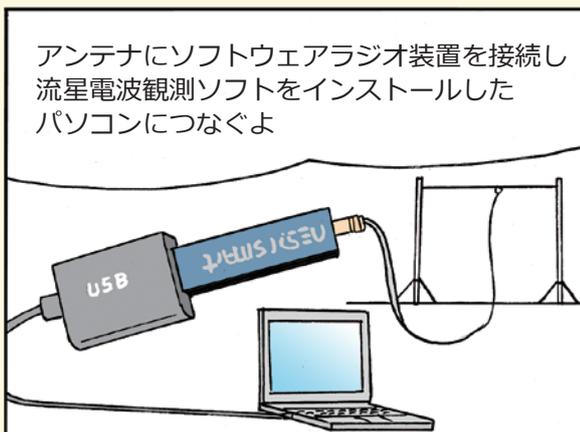


アンテナは電波源方向と  
直行するように

電波源？



じつは福井から電波が送信され  
ていて、それが流星に反射する  
ことで観測できるんだ



アンテナにソフトウェアラジオ装置を接続し  
流星電波観測ソフトをインストールした  
パソコンにつなぐよ



これだけの装置で流星  
電波観測ができるんだ

### 3 部品をそろえてアンテナを自作開始

もっとも単純で基本的なダイポールアンテナを作っていく

#### ●アンテナの材料は身近な電線

ここでは、今回の観測に使用したアンテナを紹介していきます。受信アンテナは、市販されている50 MHz帯用八木・宇田アンテナなどもありますが、ここではシンプルなダイポールアンテナを製作することにしました。ダイポールアンテナは、直線状に2本のエレメント（導線）を配置した構造で、最も基本的なアンテナです。そのため、アマチュア無線の自作アンテナとしても一般的なものです。アンテナの全長は、受信波長の半分（1/2波長）で、エレメントはさらにその半分（1/4波長）で製作します。

ダイポールアンテナの主な材料ですが、エレメントには一般家庭のAC100V電源延長用などに用いられるビニール平行コードを1本に割いて使うことにしました。また、電波をSDR Donglerに導く同軸ケーブルは、BS・CS放送受信用のS-5C-FBを使用しました。同軸ケーブルにはいくつか種類がありますが、インピーダンスと呼ばれるケーブルの仕様が75オームのものを使います。また、SDR Donglerとの接続には、同軸ケーブルの一端にF型接線（コネクタ）を取り付けます。いずれも、DIYショップで購入できるものばかりで、同軸ケーブルは10mを購入しましたが、費用は全部で2000円ほどでした。

観測に使用する電波が、福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会が送信する53.755 MHzとすると、波長は5577 mmになります。エレメントの長さは先に述べた通り、波長の1/4になるので1394 mmですが、実際はやや短めにします。電波は真空中では光速と同じですが、エレメントの中を進む場合はわずかに速度が遅くなるためです。短くする割合を短縮率と呼びますが、計算で求めることはむずかしく、本来ならアンテナの特性を調べながら決定することが多いようで、通常は95~98%程度だといえます。しかし、今回は測定器などを準備できなかったことと、問題があれば作り直すことも可能なため、おおむね96%の数値である1338 mmで作ってみました。

このエレメントは、同軸ケーブルの一端を加工して、直接ハンダ付けしてしまいました。そのためエレメントにするビニール平行コードは、あらかじめハンダ付け部分を考慮した長さ（約15 mm）を加えて切断しています。また、同軸ケーブルのエレメントをハンダ付けした反対側の端には、F型接線と呼ばれるコネクタを取り付けました。

仕上げに、絶縁と防水のためにハンダ付けした部分にビニールテープを巻いています（図08）。

#### アンテナのインピーダンスとは？

直流の電流では、電流を流れにくさを「抵抗値」で表し、その単位は $\Omega$ （オーム）です。ところが、アンテナの信号は波で伝わる交流で、信号を流れにくくさせる要因がいくつかあります。そのひとつがインピーダンスで、こちらの単位も $\Omega$ （オーム）で表します。アンテナから受信機へ電波を入力する場合、それぞれのインピーダンスが大きく異なると、信号の損失が大きくなります。アンテナからの同軸ケーブルと受信機の入力端子のインピーダンスをそろえるようにします。

エレメントと同軸ケーブルとの接合部分を給電点と呼びますが、ダイポールアンテナでエレメントを直線上に並べた場合、給電点のインピーダンスは73オームになります。本来なら、給電点にインピーダンスをそろえる仕組みが必要なのですが、誤差もわずかなので今回自作したダイポールアンテナでは省略しています。



#### ①材料

A：ビニール平行コード。ごく一般的な家庭用100V延長コードに使われるもの。VFF・1.25などと書かれている。3mあればじゅうぶん。5mで700円程度。B：同軸ケーブル。BS・CS放送受信用のS-5C-FBを使用した。75 $\Omega$ と表示されていれば問題ない。最低限、アンテナからUSBチューナーまでの長さが必要。10mで1000円程度。C：5C用F型接線。同軸ケーブルに取り付けるコネクタ。FP-5Aを使用した。100円程度。D：絶縁用ビニールテープ。絶縁と防水のため、アンテナとなるビニール平行コードと同軸ケーブルをハンダ付けした部分に巻く。100円程度。



#### ②コネクタ接続の準備



#### ③エレメントのハンダ付け準備02

ビニール平行コードを1338 mm + 15 mmで切断し、割いて1本ずつに分けてから、それぞれの片端の15 mmの被服をむいておく。



#### ③コネクタ接続完了

F型接線を同軸ケーブルの一端に取り付ける。



#### ④エレメントのハンダ付け

エレメントを同軸ケーブルにハンダ付けする。



#### ④エレメントのハンダ付け準備01

同軸ケーブルの另一端を加工して、エレメントをハンダ付けできるようにする。

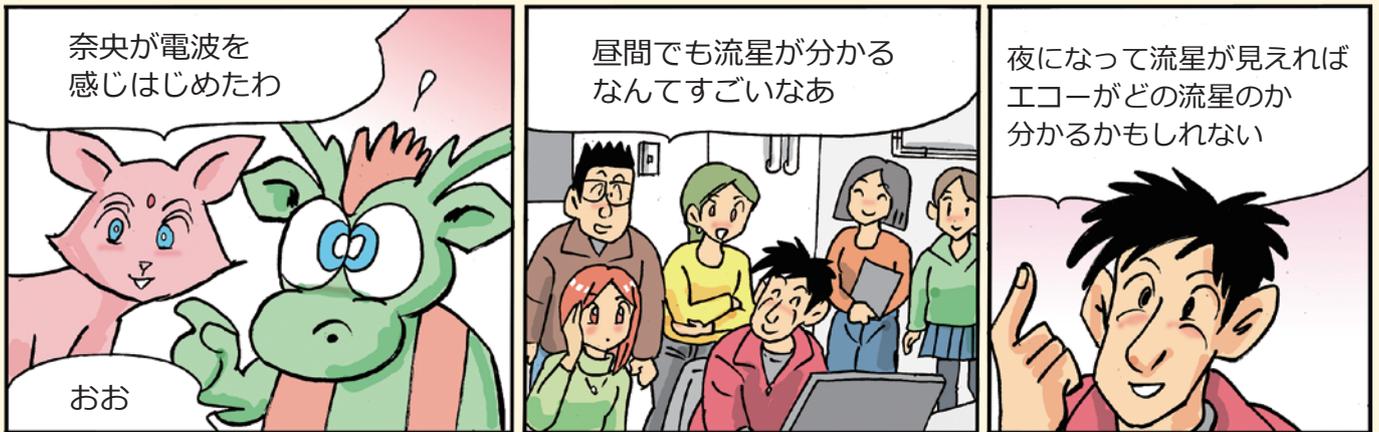
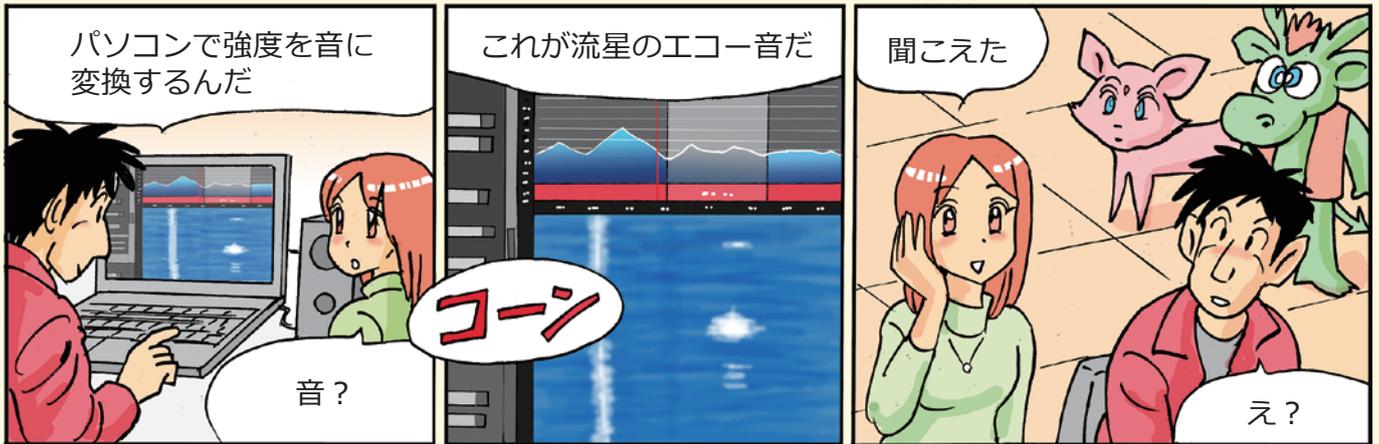


#### ⑦完成

絶縁と防水のため、ビニールテープを巻いて完成。

図08 ダイポールアンテナの製作

第10-3章 電波を音声に変換して流星の出現を音で捉えた 冒険



## 4 ふたご座流星群で実際に観測

東京大学木曾観測所夜天光観測棟屋上にアンテナを展開

### ● ついに捉えたふたご座流星群の流星エコー

自作したダイポールアンテナとSDRを使ったシステムは、数回のテスト観測を経て、ふたご座流星群をターゲットにして実際に観測を行うことにしました。観測地としては、長野県木曾郡木曾町にある東京大学木曾観測所の協力を得て、木曾観測所内にある夜天光観測棟をお借りすることができました。こうして、ふたご座流星群が最もたくさん流れると予想される極大日前後、2021年12月11日から14日までの3夜にわたって観測を行うことができました。

ダイポールアンテナは、平屋建ての夜天光観測棟屋上に設置しましたが、強度のない電線のエレメントを空中で直線上に張らなければいけません。そこで、まずは手持ちの写真ストロボ用のスタンド2基に細いビニールロープを渡し、そのロープにエレメントをできるだけ弛まないようにビニールテープで貼り付けることにしました。それでも、同軸ケーブルの重さでビニールロープがたわんで給電点が下がってしまうため、スタンドをもう1基用意して給電点の支えにしました(図09)。



図09 木曾観測所の夜天光観測棟屋上に設置した流星電波観測用の自作ダイポールアンテナ。背景の雪を被った山は木曾御岳だ。アンテナを設置する方位角は、以下の国土地理院のサイトを用いて算出した (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2sf.html>)。また、送信場所である福井県立大学と観測地である木曾観測所の緯度経度は、Google マップを利用して取得した。ちなみに木曾観測所からの福井県立大学の方位は真北から東回りに286度強(すなわち真西から北側に約16度)、距離は126kmほどである。

ところで、ダイポールアンテナはすべての方向からやってくる電波を同じ感度で受信することができません。その感度には、エレメントを軸とした穴のないドーナツのような指向性があります。つまり、エレメントの延長線方向には感度がまったくないことになります。そこでアンテナは、送信場所である福井県立大学に対してエレメントが直交するような方向で、地面に水平に設置することにしました。

12月の木曾地方の夜間は、SDRのソフトウェアを運用するノートPCの動作保証温度をはるかに下回ってしまうことから、PCは屋内に設置し、SDR ドングルはPCから15mのUSB リピーターを介して10mの同軸ケーブルの先端に取り付けました(図10)。

ノートPCはWindows10をインストールしたもので、SDRのソフトウェアとしては、WindowsやMacOS、Linuxで動作する「SDRSharp」と呼ばれるフリーウェアを使用しました(図11)。

SDRSharpには、AM放送やワイドFM放送など、いくつかの

受信モードが選択できますが、流星の電波観測では「USB (Upper Side Band) モード」を選択します。これは、アマチュア無線の運用方式のひとつです。SDRSharpの受信中心周波数は、福井県立大学の53.755 MHzに合わせればよいように思いますが、実はわずかに低い周波数を使います。USBモードでの受信では、中心周波数から離れた周波数の信号を捉えると、中心周波数から捉えた周波数の差分の周波数の音声に変換してPCのスピーカーから出力することができるためです(図12)。



図10 ダイポールアンテナから伸びる同軸ケーブルにSDRドングルを接続し、さらにUSBリピーターで階下の窓から屋内に引き込んでいる。PCからのノイズがSDRドングルに影響を与えるケースもあるらしく、SDRドングルはPCのUSBポートに直接差すよりも、ハブやリピーターで少し離れたほうがよいこともあるという。

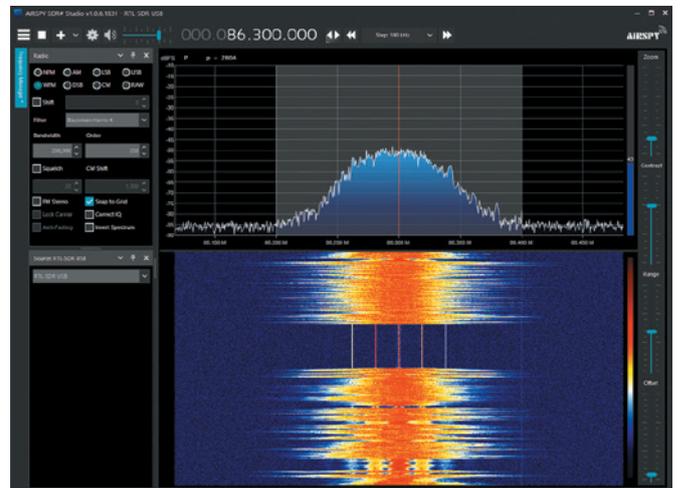


図11 SDRドングルのドライバインストールなど、多少手間がかかるが、インターネット上にインストールの参考になるサイトがいくつか見られるので、検索してみよう。SDRに関する書籍もいくつか出版されている。また、何より電波が受信できなければ、使い方も分からないだろう。そこで、家庭用のテレビアンテナにつなぎ、近くのFMラジオ局を受信して使い方のコツをマスターすることをお勧めしたい。画像はFMラジオを受信中の「SDRSharp」の画像だ。左側に設定パネル、右上のグラフは横軸が周波数で縦軸が信号の大きさを示している「スペクトル画面」。右下のグラフは、「ウォーターフォール画面」だ。これは縦軸が時間、横軸が周波数で、右上のスペクトル画面の信号の大きさを色分けして示したものが、リアルタイムで上から下へと流れるように表示される。



図12 セットアップされたノートPC。流星の出現を音で聞くために外付けのスピーカーを用意して、PCのヘッドホン端子に接続している。流星が出現すると、「コツ」や「コーン」という音で知らせてくれる。

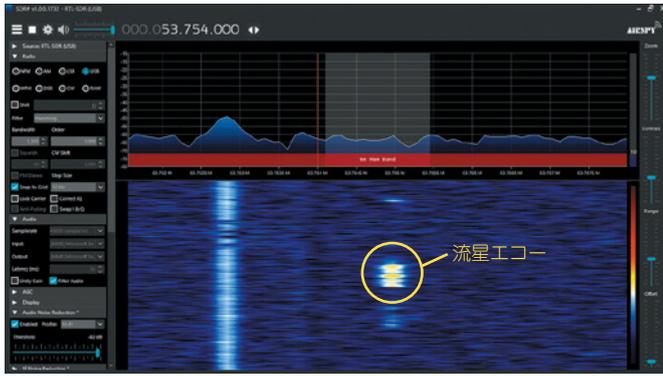


図13 SDRSharpで、流星エコーを受信した直後の画面。スペクトル画面の赤い縦線が、受信周波数の53.754 MHz。ウォーターフォール画面で、受信波長から1000 kHzだけ高い周波数である53.755 MHzの付近に黄色い塊が見えるが、これが流星のエコーだ。白い帯は、どこからか53.753 MHz付近の電波を送信しているところがあるようで、流星観測としてはノイズとなる。受信時のノイズをできるだけ減らすため、実際に受信する周波数の幅(Bandwidth)を1350 kHzにまで狭めることにして、ノイズリダクションもかけている。

今回は、53.754 MHzで受信することにしました。53.754 MHzでは、流星に反射した53.755 MHzの電波を受信すると、その差分の1 kHzの音として聞こえるのです。人間の音の可聴周波数は20~20000 Hz程度で、人の声がおおむね100~1000 Hzなので、流星の出現を少し甲高い音として聞き取るのが可能になるのです。この音を「流星エコー」と呼んでいます。短いものは「コッ」や「コン」と聞こえ、ロングエコーと呼ばれる長いものは「コーーン」という感じです(図13)。

### ● SDRSharp と MROFFT の連携でデータ取得

HROでの流星の電波観測において、もうひとつ有用かつ必須なソフトウェアがあります。流星の出現を音として知ることができるのですが、たとえば計数観測(出現した数を数える)を行うには、耳を澄まして流星の出現を待ち、音がしたら時刻や音の特徴を記録しなくてはなりません。

そこで、せっかくPCを使って観測するので、音を検知してデータを自動的に残せるソフトウェアを使います。国内では、かなり以前からWindows用のフリーウェアである「HROFFT」やその同等仕様の「MROFFT」が定番です。HROFFTは、オンラインで簡単に入手できないため、今回はMROFFTを使用しました(<https://www.nap.jp/michi/meteor/mrofft/index.html>)。

MROFFTは、音声をフーリエ変換して、縦軸に音の周波数のスペクトル、横軸に時刻、さらに音声の大きさによってスペクトルに色を付けてリアルタイムでグラフを描くことができます。また、10分ごとにその画面コピーを画像データとして自動保存してくれます。

もともと、HROFFTやMROFFTは、無線機からの音声出力をPCのマイク入力(もしくはLINE入力)につないで、アナログ的な音声の受け渡しをしていました。SDRを使用した観測では、SDRSharpもMROFFTも同じPC上で動いているの



図14 PCの内部で、SDRSharpからMROFFTへ音声を流すにはステレオミキサーを有効にする必要がある。

で、SDRSharpからの音声は、Windows10に装備されている「サウンドミキサー」を利用して、MROFFTに入力しました(図14)。

ちなみに、PC内でSDRSharpからMROFFTへは、音量を最大で音声信号を渡しています。そのため、SDRSharpの音声はそのまま大音量でノートPCに内蔵されたスピーカーから出力されてしまいます。そのままでは、流星のエコーはもちろん、常にノイズがうるさいため、音量調整機能がついたスピーカーを外付けにしています(09ページ図12)。

こうして、3夜にわたってふたご座流星群を観測しました。極大予想は14日16時でしたが、14日に放射点がほぼ天頂で南中する1時台には合計120個ほどの流星エコーを捉えることができました。ただし、MROFFTの画面のノイズが多いため、明らかなエコーのみを数えた結果です(図15)。

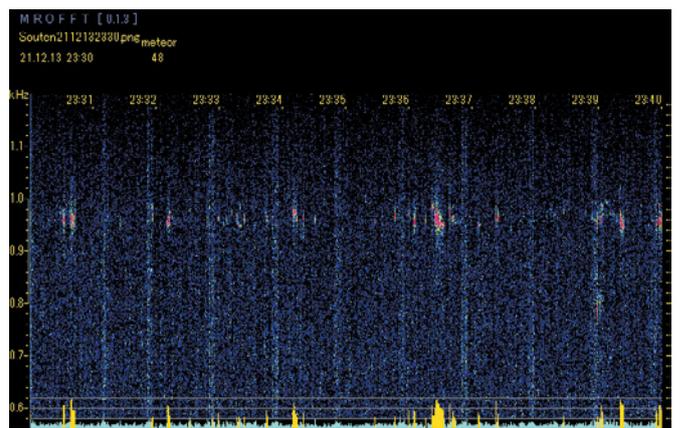


図15 ふたご座流星群極大のころで、放射点が天頂付近まで登りつめている時間帯のMROFFTデータ。赤い部分は、強い電波を受けてエコーが発生したことを示す。10分間で数十個のエコーを観測した。

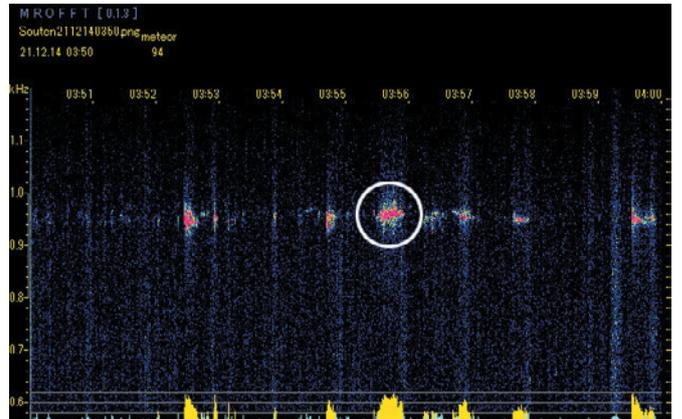
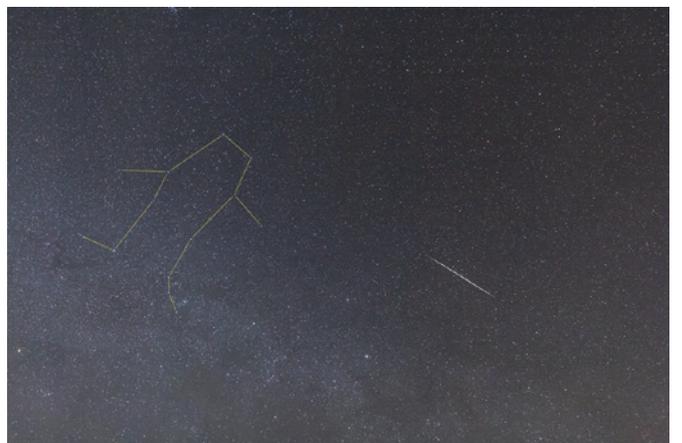


図16 デジタルカメラでの光学観測(上)と電波観測(下)で同一と思われる流星をゲット。出現時刻を照らし合わせて確認した。カメラでは写っているが、電波では捉えられないものやその逆もいくつもあった。

また、今回の観測では、電波の観測と同時にデジタルカメラの撮影による光学観測を行い、電波と光学でいくつかの同じと思われる流星を捉えることができました (図16)。

ちなみに観測データは、木曽観測所で主に光学観測を行って

た日本大学理工学部の阿部新助准教授の観測チームに提供して、研究に役立てていただけることになりました。成果が出せるほどのデータなのかはまったく分かりませんが、結果が楽しみです。

## 5 流星を電波で観測するメリット・デメリット

流星は夜だけではなく、昼間の明るい空でも出現している

流星の電波観測の最大のメリットは、天候に関係なく、曇っていても、雨が降っていても、さらにはなんと、昼間の明るい空でも流星の出現を知ることができるということでしょう (図17)。

実は、昼間にしか観測できない流星群もたくさんあるのです (表02)。2009年以降、国際天文学連合 (IAU) が認定した流星群は総計112個ありますが、そのうちの14個が「昼間流星群 (ちゅうかんりゅうせいぐん・Daytime)」と呼ばれるものです。

これらは、放射点が太陽に近いため、夜間にはまったく見えない、もしくは条件がよくても薄明中でしか眼視や写真の光学的観測ができない流星群なのです。ところが、電波なら観測可能です。

もっとも、電波が万能かといえば、デメリットもたくさんあります。今回のダイポールアンテナを使ったHROでは、アンテナに指向性があるため、空全体を同時に観測することはできません。また、エコーの強さや長さから流星の光学的特徴を得ることも今のところは不可能です。エコーを捉えたからといって、それが流星群の流星なのか、散在流星なのか、天球上での出現位置を特定することもできません。ノイズとの戦いも大きな課題です (図18・19)。今回の観測中も突然ノイズレベルが上がって、観測不能になった時間帯もありました。これは、光学での観測でも天候が悪くなるのと同じようなことでしょう。

電波の前方散乱を用いたHROのような観測方法とは別に、能動的な後方散乱を用いた観測方法もあります。たとえば、京大生存圏研究所・信楽MU観測所のMUレーダー (14ページ) は、フェーズドアレイレーダーと呼ばれる大規模なシステムで、自ら電波を送信し、流星に反射した電波を受信することで、流星の出現位置や速度を探知できます。他にも、世界中で電波を用いた流星の観測が行われています。

とはいえ、光学的特徴までをすべて得られるわけではありません。今後は、電波と光学 (紫外・可視・赤外) を連携させて、さらに流星の研究が進められていくことでしょう。

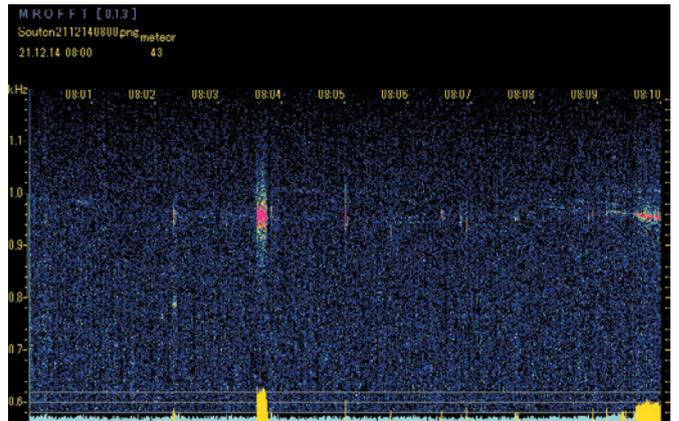


図17 すでに日の出を迎えた早朝にキャッチした流星エコー。昼間でも観測できるのは大きなメリットだ。

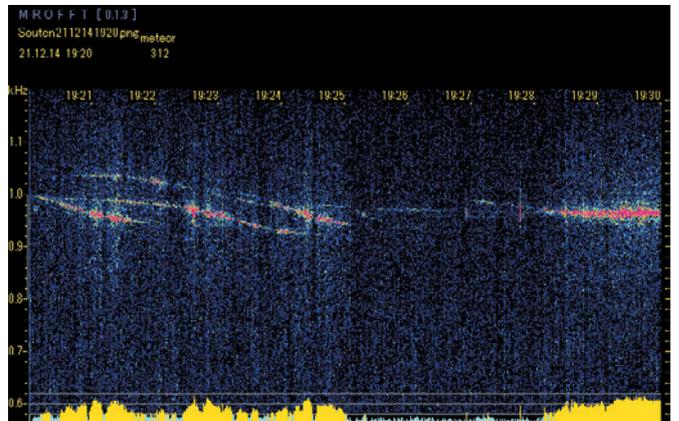


図18 斜めにラインが流れているのは、航空機による反射電波。航空機がたくさん飛来するとノイズに埋もれて観測不可能になる。

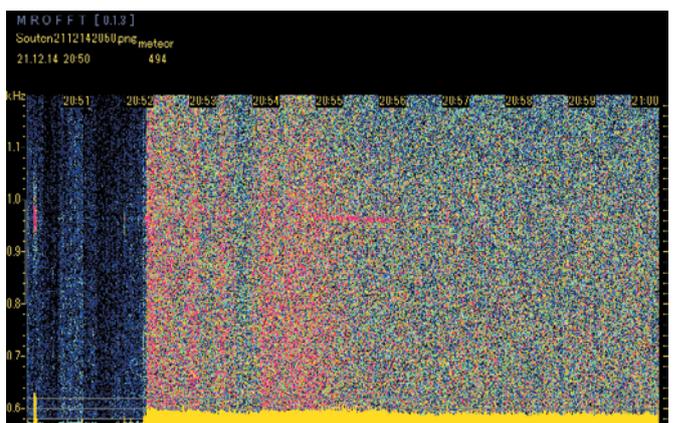


図19 突然、ノイズレベルが急激に上がって、観測不能に。なぜこうなるのかは原因不明で、SDRSharpの出力ゲインをかなり下げて対応した。

流星群名	極大日
いて座ξ 昼間流星群	1月25日
みずがめ座κ 昼間流星群	3月21日
4月うお座 昼間流星群	4月23日
くじら座ω 北 昼間流星群	5月9日
くじら座ω 南 昼間流星群	5月9日
5月おひつじ座 南 昼間流星群	5月14日
おひつじ座 昼間流星群	6月8日
ペルセウス座ζ 昼間流星群	6月10日
おうし座λ 昼間流星群	6月17日
おうし座β 昼間流星群	6月29日
オリオン座ξ 昼間流星群	7月25日
かに座ζ 昼間流星群	8月20日
しし座κ 昼間流星群	9月24日
ろくぶんぎ座 昼間流星群	9月28日

表02 昼間流星群の一覧と極大日 (国立天文台の流星群の和名一覧より)

## 6 ふたご座流星群の起原に迫る DESTINY+ 計画

2028年に小惑星フェートンへのフライバイを予定

流星群の母天体は、ダストの軌道からほとんどが彗星であることが分かっていますが、いくつかは小惑星ではないかと考えられています。なかでも代表的な小惑星起原の流星群といえば、ふたご座流星群でしょう。母天体は、「小惑星フェートン(小惑星番号3200)」とされています。

フェートンの公転周期は約1.43年。最も太陽に近づく近日点は水星よりも内側の約0.14 au(太陽-地球間の1/7ほど)にあり、黄道面から傾いた細長い楕円軌道を持っています。地球に接近することもある「地球接近小惑星」でもあります(図20)。

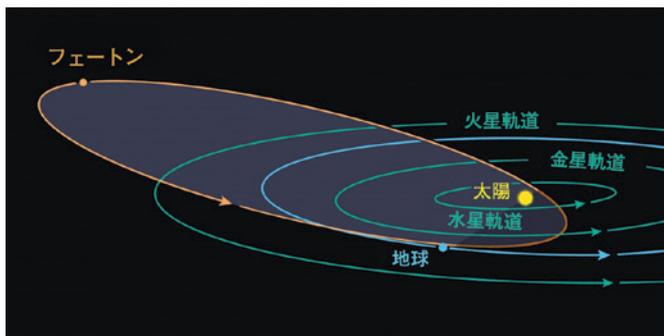


図20 小惑星フェートンの軌道は、彗星のようにかなり細長いのが特徴的である。もちろん、ふたご座流星群のダストが地球に到達するためには、フェートンと地球の軌道が交差していることが必要だ。

フェートンは1983年に発見され、その軌道からふたご座流星群の母天体であることが指摘されました。かつては、流星群の母天体は彗星であると考えられていたため、フェートンは揮発物質やダストを放出し尽くした「枯渇彗星核」や「彗星・小惑星遷移天体」だと唱える研究者もいました。その後の観測で、フェートンは太陽に近づいたときのみ、おそらく表面が太陽の強烈な熱に炙られて崩壊することでダストを放出していることが分かり、現在では「活動的小惑星」というカテゴリーに分類されています。このように、フェートンはかなり特異な存在です。

そんなフェートンの素性に迫るべく、深宇宙探査技術実証機「DESTINY+ (ディスティニープラス) 図21」が計画されています。衛星開発はJAXA(宇宙航空研究開発機構)、探査の予備調査や観測機器開発は千葉工業大学が中心となって進められているプロジェクトです。

探査では、あらかじめ地上から詳細な観測を行い、その天体のさまざまな情報を集めておく必要があります。その地上観測の取りまとめ役でもある吉田二美さん(産業医科大学・千葉工業大学)にお話をうかがいました。

「フェートンは、小惑星のなかでも表面が暗く、炭素や有機物を含む天体や隕石とスペクトルが似ているため、フェートンにも炭素や有機物があるのでは? と考えられています。そのダストがふたご座流星群となって地上にやってきているわけです」。

じつは流星以外にも、さまざまな由来を持つ「惑星間ダスト」が年間4万トンも地球に降り注いでいると考えられています。きわめて小さなダストは流星のように光らずに成層圏や地表で回収されていますが、その分析から惑星間ダストは炭素や有機物を豊富に含んでいることが分かっています。有機物は生命に不可欠な物質で、地球生命に誕生にはこうした惑星間ダストが関わっている可能性もあります。そのため、宇宙空間でフェートンや惑星間ダストを捉えて研究することは大きな意義があるのです(図22)。

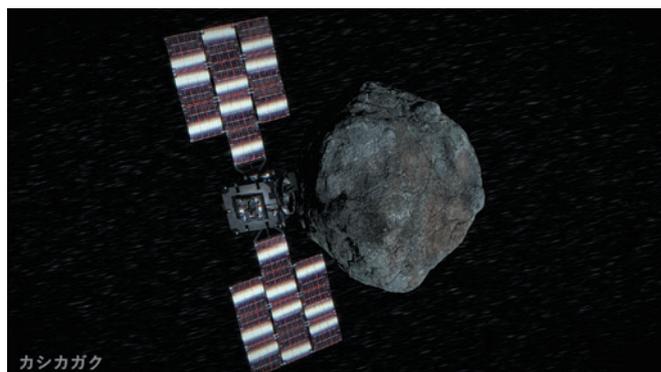


図21 フェートンをフライバイする深宇宙探査技術実証機DESTINY+の想像図。実際のフェートンは長径約6kmで、双方の距離は約500km。(JAXA/カシカガク)

「DESTINY+ 探査機搭載の科学機器としては、望遠追尾カメラ(TCAP)、マルチバンドカメラ(MCAP)、それとダストアナライザ(DDA)の3種類の準備が進められています」。

TCAPは、秒速36kmの速度ですれ違いざまにフェートン地表の撮影を行います。MCAPは分光観測用で、フェートン表面の物質の分布を計測します。また、DDAは宇宙空間でダストを取り込み、化学組成や質量、速度などをその場で分析ができる装置です。

「探査機はフェートンから距離500kmほどの位置を高速で通り過ぎるだけなので、表面の撮影を行うには、カメラの露出をあらかじめ適切に合わせておく必要があります。そのため、フェートンの反射率を調べないとはいけません。明るさが分かっても直径や形状が分からなければ、表面の反射率を計算できません。そこで、フェートンによる恒星食を観測することで、その形を明らかにしようと考えました」。

小惑星の恒星食の観測とは、小惑星が恒星の前を通過して恒星の光を遮る時間を計測することです。小惑星が恒星の光を遮ってできる影は、皆既日食が見られる皆既帯のように帯状になります。その帯の中の複数箇所を観測を行うことで、小惑星の形を推定することが可能になります。

「たくさんの観測点が必要になるので、アマチュアのみさんと協力して観測を進めています。フライバイまでまだ時間がありますので、興味のある方はフェートンの恒星食に参加してみませんか?」

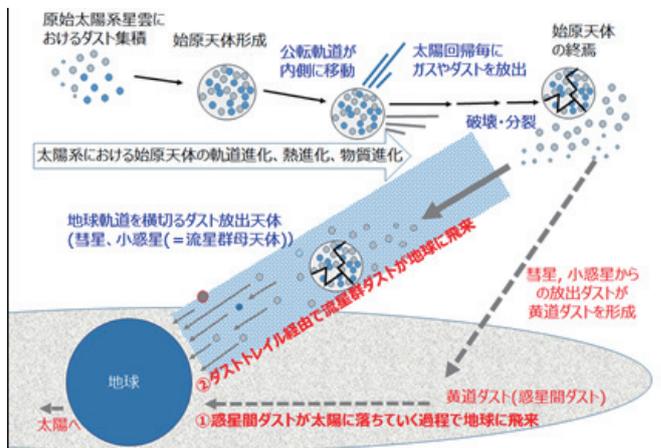


図22 地球にやってくるダストの経路はふたつある。ひとつは太陽系の生成初期にできた原始天体がやがて破壊・分裂してダスト(黄道ダスト)を生み出し、それが太陽に引き寄せられ行く途中で地球と遭遇する場合(図中①)。もうひとつは、彗星や小惑星が放出したダスト・トレイルの軌道が地球と交差している場合(図中②)だ(千葉工業大学 惑星探査研究センター提供)。

# 7 HRO を発展させて流星出現位置を特定

## 電波干渉計とレーダーを合わせた観測システム

今回行ったHROによる電波観測では、さまざまな制約から空に現れた流星エコーをすべて捉えることができるわけではありません。もちろん、捉えられた流星エコーが空のどの位置に出現した流星のものなのかを判断することも不可能です。

そこで、こうした欠点を改善し、さまざまな手法で空のどの位置に流星が出現したかを探知できるシステムの構築を高知工科大学が学生研究の一環として行っています。学生を指導しているシステム工学群教授である山本真行さんにお話をうかがいました。「ひとつは、電波干渉計です。複数のアンテナで電波到来時間差を位相差として検出し、到来方向を算出するという手法です(図23)。

ふたつのアンテナで受信した電波を比較し、位相差を求めることで電波のやってきた方向が推測できます。これは、アルマ望遠鏡が電波源の天体の位置を正確に計測するのと同じ方法です。高知工科大学のシステムは、福井高専電波

同好会や福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会の送信する電波を利用したHROですが、2005年にアンテナ3基を設置して観測を開始したそうです。当初は、1基のアンテナに対してもう2基を東西と南北に並べ、それぞれのアンテナペアで得られた位相差から電波のやってきた方向を計算したといいます。

さらに、2009年にはアンテナ5基を偏芯した十字形に配置して、さらなる精度向上を進めています。アンテナには、電波受信の指向性と感度の両面から有利なクロス八木・宇田アンテナが使われています(図24)。

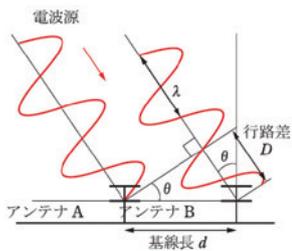


図23 位相差を調べることで電波のやってくる方向を知ることができる原理は、アルマ望遠鏡と同じである。



図24 アンテナはクロス八木・宇田アンテナを5基、東西南北の方位に合わせて十字に並べている。東西、南北のアンテナの間隔は、同じにしてしまうと中央のアンテナとの位相差が等しくなってしまうので、それぞれ一方は観測波長と同じ(1.0λ)、もう一方は1.5倍(1.5λ)として、電波のやってくる方向をより正確に検出できるようにしている。

実際の観測では、高感度のビデオカメラによる光学観測との連携で、受信強度がじゅうぶんにあり、継続時間が4秒以上の流星エコーに関して、誤差10度以内に80%の一致率を得ているそうです。

「さらに流星の出現方向が分かっても実際の距離までは分からないという背景が電波干渉計を利用したこれまでの学生研究ではありました。そこで、電波を自ら送信して後方散乱を受信するレーダーを併用する方法を学生とともに考案しました」。

修士研究を通じて無線技術に興味をもった佐藤匠さんはアマチュア無線免許を取得し、自らの技術と経験を生かせる修士研究として電波干渉計と後方散乱によるレーダー観測を組み合わせたシステムを構築しました。しかし、残念ながら時間的な制約もあり、じゅうぶんな観測成果を挙げられなかったそうです。

「これまでの研究は、おもに学生の論文執筆で行ってきたものです。論文を書いた学生が卒業してしまうと、次に興味のある学生が研究室にやって来てくれないかぎり、研究が途絶えてしまうのが残念でもありますね」。

これから電波や流星の研究をしてみたいという中学生や高校生は、進路として高知工科大学を目指してみたいかがでしょう。

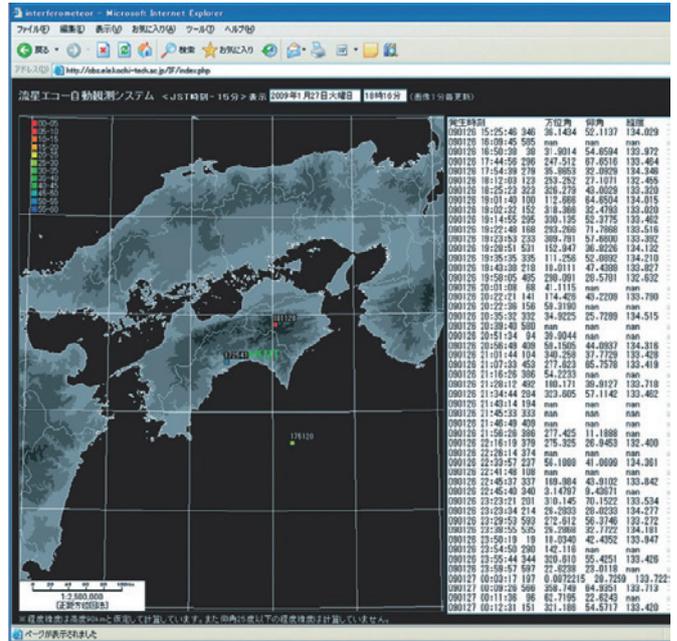


図25 流星エコー自動観測システムの表示画面の例。地図上に過去1時間分の流星位置と時刻を表示、右欄にテキストデータで表示する。

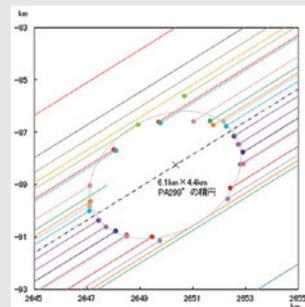
### 掩蔽観測に参加しよう！

小惑星フライバイの一発勝負の撮影では、過不足な露出にならないように事前の調査が必須です。たとえ、地上から明るさが分かっても、実際のサイズが分からなければ、表面の正しい反射率が求められません。残念ながら小惑星では、小さすぎて地上から空間分解して形や大きさを見ることができません。

そこで、地上から小惑星の大きさを計る方法として、小惑星の恒星食を利用します。日食時の太陽と月のように、恒星の前を小惑星が通過するときには、恒星の光を遮った小惑星の影が地上に落ちていきます。また、小惑星の天球上での移動速度は分かっていますから、たくさんの地点で小惑星が恒星を遮っている時間をできるだけ正確に測定することで、小惑星の影の形を描き出すことができるのです。

フェートンも恒星食を利用することで、形状や大きさを調べる試みが行われています。2021年10月4日には、プロとアマチュアの合同チームによって、国内36地点でフェートンの恒星食の観測が行われ、そのうち18地点で実際に食が観測されました。そして、見事に影の形を描き出すことに成功しました。DESTINY+ 探査機がフライバイするまで、まだ何度も恒星食観測の機会がありますので、興味のある方は観測に参加してみたいかがでしょうか？

★観測方法の詳細は以下のサイトに  
<https://fumi-yoshida.wixsite.com/occultation-ws>



佐賀市星空学習館の早水勉さんによってフェートンの掩蔽観測データがまとめられ、描かれた整形図。6.1km x 4.4kmの楕円形状が浮かび上がった。

図24：「佐藤匠, 前方散乱方式を用いた流星レーダー観測手法の開発および5ch流星電波干渉計との同時観測の試み, 令和2年度 高知工科大学 修士論文, 2021」より  
 図23、25：「山本真行, 桢口和弥, 前方散乱法を用いた流星電波エコー自動方探システム, 電子情報通信学会誌 Vol. 94, No. 10, 2011」より

## 8 電波観測と光学観測が連携して流星を観測

地上に降り注ぐ惑星間ダストの総量は1日1トンと推定

今回の電波観測を行うにあたって、お世話になった東京大学木曾観測所でも流星に関わる観測を行っています。木曾観測所の主力観測機器は、シャープな光学系で広い視野を得られる「口径105cmのシュミット望遠鏡」です（図26）。1974年に開設され、かつては一辺6度の視野を持つ35.6×35.6cmの写真乾板での新天体の搜索などさまざまな観測を行ってきましたが、電子撮像素子の時代となり、現在では最新の技術を取り入れて開発された「トモエゴゼン（Tomo-e Gozen）」による観測が進められています。



図26 木曾観測所のシュミット望遠鏡は、口径105cm、焦点距離330cmという仕様で、きわめて明るい視野を持つ。同形式の光学系としては世界第4位の口径である。現在は完全にリモートでの運用が可能となっており、トモエゴゼンによる自動観測が行われている。

トモエゴゼンとは、84個のCMOSイメージセンサーをモザイク状に配置した超高感度動画カメラを核とする観測システムです（図27）しかも、イメージセンサーひとつの視野が、満月の見かけとほぼ同じ大きさに相当するので、一度に満月のおよそ84倍の面積という広い星空を撮影できます。また、静止画が主だった天体の観測に動画を取り入れ、これまで見つけることがむずかしかった短時間で変動する現象を捉えることができます。

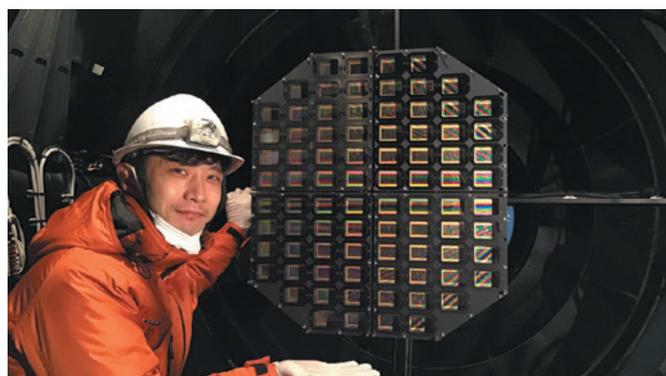


図27 84個のCMOSセンサーを並べたトモエゴゼンの撮像部。

そのトモエゴゼンと電波観測を組み合わせ、独創的な流星観測を行った研究結果が発表されています。論文の筆頭著者でもある東京大学天文学教育研究センター特任助教の大澤亮さんにお話をうかがいました。大澤さんは、恒星間ダストの研究をされながら、トモエゴゼンの開発に関わってきたそうです。「トモエゴゼンという新しい観測機器が完成して、その長所を活かした新しい観測手法が生まれれば、新しい成果が得られるはず

です。そこで、これまでにない新たな観測のひとつとして惑星間ダスト、つまり流星の観測を行ってみようと考えました。じつは、トモエゴゼンは目に見えない10等級ほどの暗い流星を捉えることができるのです」。

そして、まったく新しいスタイルとして、京大大学生存圏研究所・信楽MU観測所のMUレーダーを用いて、電波と光学を連携させた観測を行うことにしたそうです。

MUレーダーは、主に地上10～500kmほどの中層や超高層大気を観測するために作られた大型大気観測のフェーズドアレイレーダーです（図28）。直径103mのエリアにクロスハム・宇田アンテナ475本を設置し、それぞれのアンテナから特定方向へ位相をそろえた電波を送信できます。さらに反射してくる電波を受信する機能を持っています（図29）。



図28 直径103mの円の中に整然と並べられた475本のアンテナ。空のあらゆる方向へ位相をそろえた電波を送信するだけでなく、1秒間に2500回という高速で電波の方向を変えることができる。



図29 地上にズラリと並ぶクロスハム・宇田アンテナには、それぞれ半導体小型送受信機が取り付けられ、電波の送信と受信を行うことができる。MUレーダーは本来、上空の風や大気の乱流の立体構造を観測するための装置だが、大気中の流星（ヘッド・プラズマ）がMUレーダーの使用周波数の電波を反射することから流星観測も可能だ。

MUレーダーでは、以前から流星の反射電波を捉えていました。流星の先端に発生しているプラズマによって反射されてきた電波を観測することから、「流星ヘッド・エコ観測」と呼ばれています。この手法では、流星の出現した高度方位、距離に加えて、

速度も分かります。さらに反射電波の強さから、「レーダー反射断面積」と呼ばれる流星のプラズマのサイズも判断できるのです。しかし、流星の明るさは観測することができません。

そこで、トモエゴゼンの出番です。MUレーダーが観測できる範囲の空に、シュミット望遠鏡を向けるのです。流星が出現すれば、トモエゴゼンでその明るさを、さらにMUレーダーで速度とプラズマのサイズを計測できます。

ダストの質量と速度による流星の明るさについては、すでに関係性が知られているので、流星の明るさと速度が分かれば、そこからダストの質量を求めることが可能です。したがって、双方の観測データを突き合わせれば、MUレーダーで観測した流星のレーダー反射断面積からダストの質量を推定できる相関式が求められるというわけです。

実際に大澤さんの研究グループは、2018年4月18日から21日の4日間で合計228個の散在流星（流星群に属さない流星）を捉えました。さらに2009年から2010年にかけて収集したMUレーダーと高感度CCDカメラによる同時観測103件も合わせて、レーダー反射断面積と流星の明るさの関係を調べ、明るい流星から肉眼では見えない10等級の流星において、おおむねひとつの関係式で表せることを見いだしました。

この関係式を2009年から2015年にMUレーダーで観測された流星ヘッドエコーのデータに当てはめると、毎日に流星として地球に突入してくるダストの量は、およそ1トンほどと見積もられることが分かりました（図30）。

太陽系では、彗星や小惑星を起源とした惑星間ダストが絶えず生成されています。地球の軌道付近に存在するダストは、そのほとんどが0.001 mgから10 mgの質量だと考えられていますが、密度が低いために直接観測することは困難でした。大澤さんの研究

グループがMUレーダーで検出した流星は、0.01 mgから1g程度のダストによるもので、これによって地球近傍に存在するダストの質量による割合も分かってきました。

今後も電波と光学を連携させた観測で、地球近傍に存在する惑星間ダストを調べていけば、太陽系小天体の活動や微小な粒子の進化の解明へとつながることでしょう。

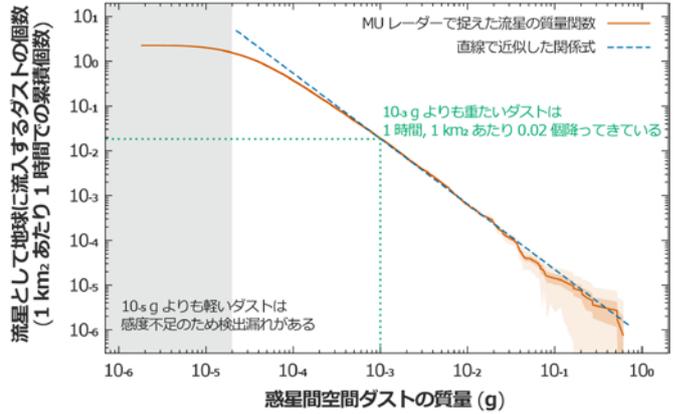
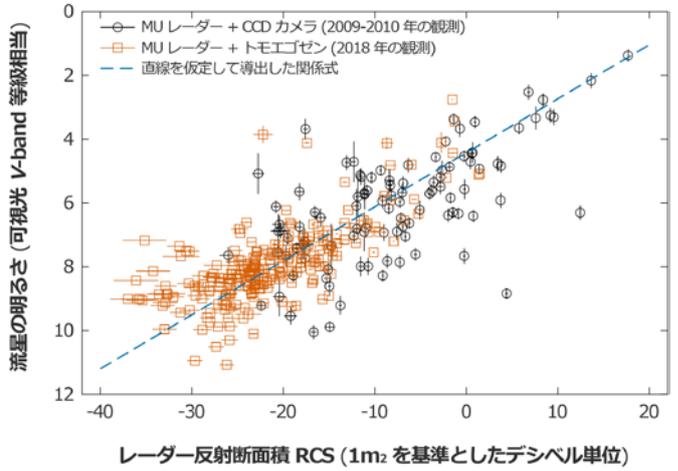
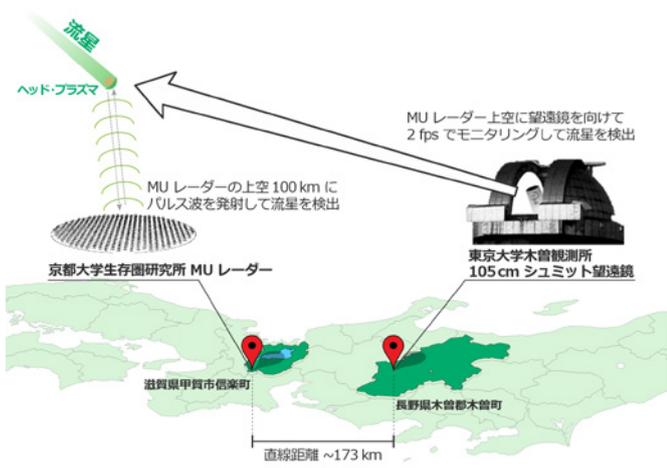


図30 (左) 木曾観測所とMUレーダーによる同時観測の概念図。MUレーダーでは上空100 kmの流星を観測し、173km離れた位置にあるトモエゴゼンがMUレーダーの監視している空域を横から観測する。

(上) トモエゴゼンとMUレーダーで同時観測した流星の可視光の明るさとレーダー反射断面積との関係は、2等級から10等級まで、ほぼ直線な関係が成り立つことが分かった。

(下) 観測結果から、過去にMUレーダーが捉えた流星(=惑星間空間ダスト)の質量と地球に流入している個数の関係を示す。軽いダストほど多く、その関係はほぼ直線で近似できる。軽いダストは感度不足のため、すべてを捉えていないと考えられる。



### 流星の電波観測の特徴～アルマ望遠鏡とどう違う？～

今回は流星の電波観測を行いました。アルマ望遠鏡が観測している天体とは、その観測スタイルがかなり異なります。それはまず、電波を放射している天体とは違って、流星が電波を放射しているわけではなく、人為的に送信された電波の反射を捉えているということです。また、何光年も離れた天体からやってくるかすかな電波ではなく、地上という至近距離で地球大気圏内の現象の観測であり、なおかつ、観測に使用する電波の周波数や強度などは、観測者が利便性を考慮して自由に決めることが可能です(電波送信には免許が必要な場合もあります)。

HROでの流星の電波観測では、有志によって送信されている電波を利用してもらうわけですが、MUレーダーならひとつのアンテナで送信も受信も行うことができ、電波の位相を合わせて任意の方向に送信することも可能です。

もうひとつは、流星は特定の位置にある天体ではなく、いつ、どこに現れるか予想できない現象なので、アルマ望遠鏡のようにたくさんのパラボラアンテナを一齐にひとつの天体に向け、「電波写真」を得ることができません。今回ご紹介した高知工科大学の5素子電波干渉計は、アルマ望遠鏡と基本的には同じ電波干渉計で、ふたつのアンテナ(アンテナペア)で受信した電波の位相差を求めることで、電波源の位置を探ることができます。しかし、アルマ望遠鏡ではさらに方位や距離の異なるたくさんのアンテナペアのデータを「相関器」と呼ばれるコンピューターで演算を行い、「開口合成」で「天体の像」を作ること可能です。

近年、オランダの電波干渉計である「LOFAR (Low Frequency ARray)」が、観測データから流星の経路を画像化させて驚かせました。観測者によれば、流星そのものが電波を放射しているのか、地上のさまざまな電波の反射なのか不明とはしているものの、明らかに流星の像が得られています。今後研究が進めば、流星の電波観測も新たな段階へ進むことになるでしょう。

## 自作アンテナとSDR Dongleで観測を体験して

今回は、アルマーの冒険制作チームがにわか勉強と試行錯誤の末、流星の電波観測に挑戦しました。かつては高価なアマチュア無線機を必要としたHROですが、安価なSDR Dongleで流星の電波観測が実用になるのか、身をもって体験してみました。アルマ望遠鏡のような干渉計への道はまだまだ果てしなく遠いのですが、少しは前進したでしょうか。



図31 アルマーの冒険制作チームと同日に、日本大学理工学部航空宇宙工学科の阿部新助准教授（右から二人目）率いる観測チームもふたご座流星群の光学観測のため、木曽観測所に滞在していました。情報交換などでも交流を深め、アルマーの冒険制作チームの電波観測データを研究に提供することに。はたして。。。



図32 今回の流星の電波観測では、木曽観測所のみなさんにたいへんお世話になりました。夜間の戸外は氷点下の環境でしたが、暖かい部屋と寝具、何より3度の食事（とてもおいしい！）も手配していただきました。シュミット望遠鏡ドームを背景に、小林尚人観測所長（真ん中）、スタッフの森由貴さん（左から二人目）といっしょに制作スタッフも記念撮影。

背景画像：ふたご座流星群の電波観測を行った「東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曽観測所」の「シュミット望遠鏡ドーム」に降る大火球。撮影は2021年12月14日夜。この夜は、たくさんの流星を見ることができた。

### ●次号予告

「今回は木星電波を捉える」の予定です。より波長の長い電波を捉えるため長大なダイポールアンテナを製作します。サイエンスのコーナーは、惑星についてさまざまな観測成果を紹介します。お楽しみに。

### ●「アルマーの冒険」制作ユニット

絵／藤井龍二

写真・文・構成／川村 晶(クレジット表記のない画像はすべて川村撮影/作成)

監修・制作協力／渡部潤一(国立天文台)、阿部新助(日本大学)、吉田二美(産業医科大学)、山本真行(高知工科大学)、大澤 亮(東京大学天文学教育研究センター)、小林尚人・森 由貴(東京大学天文学教育研究センター木曽観測所)、京大大学生存圏研究所、唐崎健嗣(合同会社ブラネタリウムワークス)

編集／高田裕行

デザイン／久保麻紀



### 「アルマーの冒険」10回

発行日／2022年3月1日

発行／国立天文台天文情報センター出版室

★「アルマーの冒険」バックナンバーは

<https://www.nao.ac.jp/about-naoj/reports/naoj-news/almar/>をご覧ください。

