

アルマー ALMAr 冒険の

第09回 「パラボラアンテナを作って 太陽の電波観測」



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、ひよんなことから「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。

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。

いざよい
(十六夜)

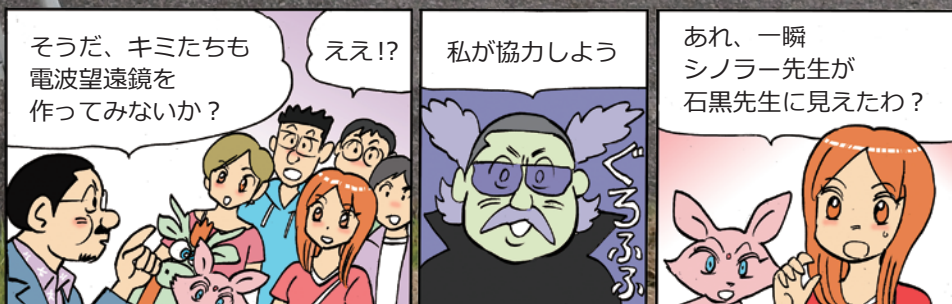
奈央とアルマーの前に現れた謎のメスネコ。可視光と電波の世界を見わける特殊能力の持ち主。電波宇宙や可視光宇宙について豊富な知識を持ち合わせている。どうやら、アルマーの過去を知り、電波宇宙の危機の原因やグランドアルマーの宝剣のありかを知っているようなのだが……。



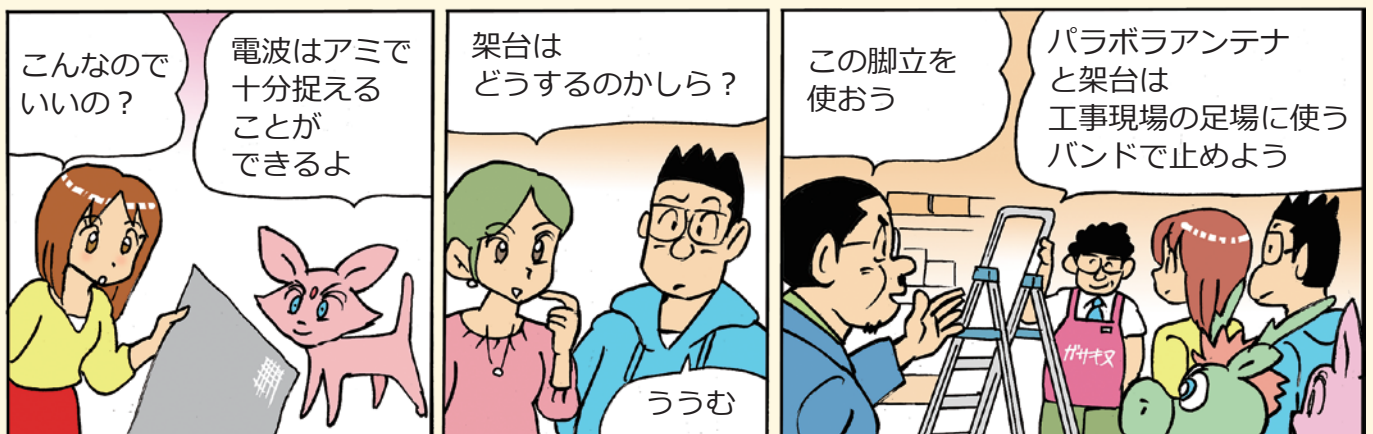
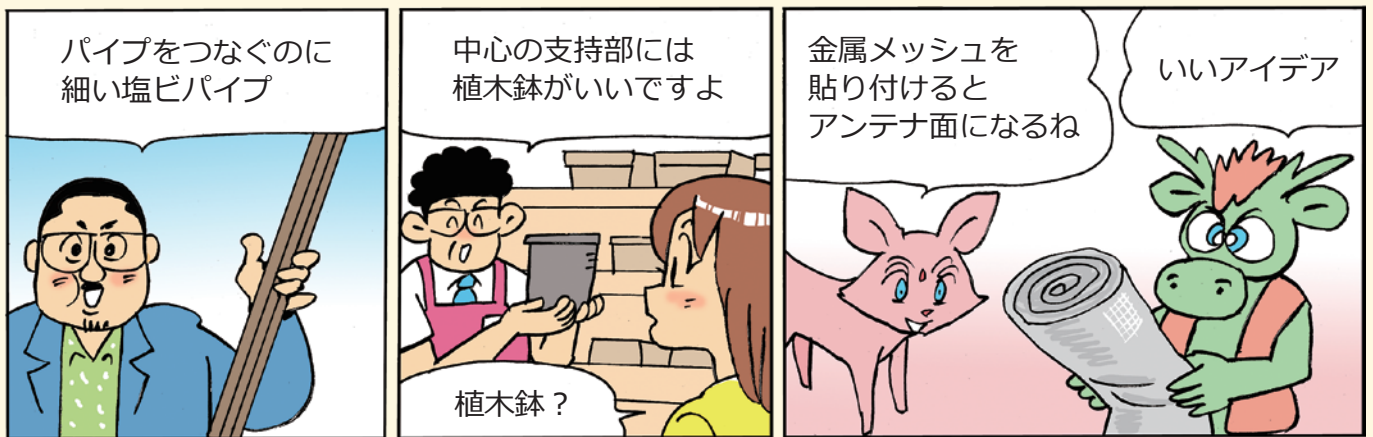
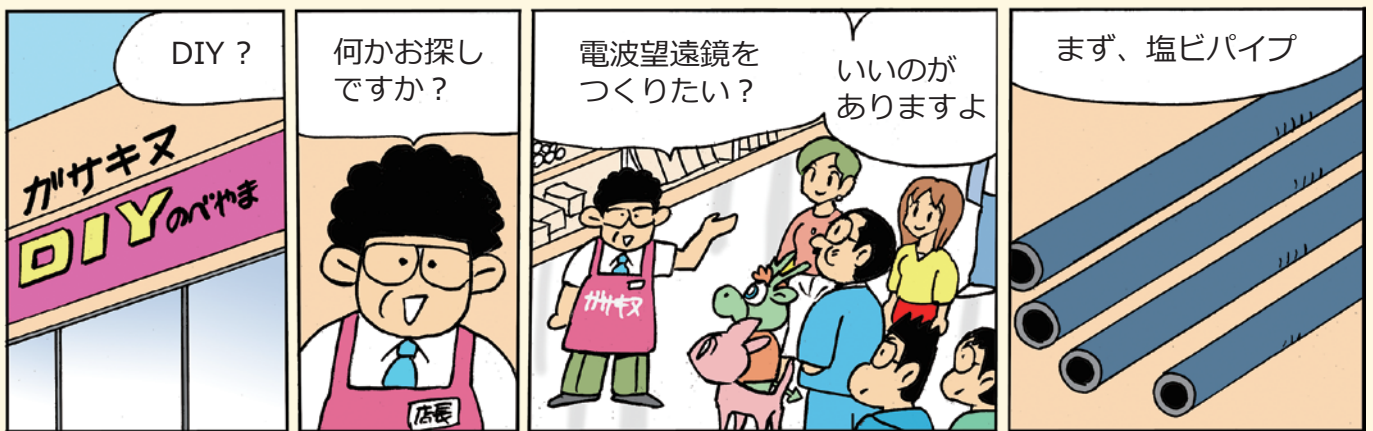
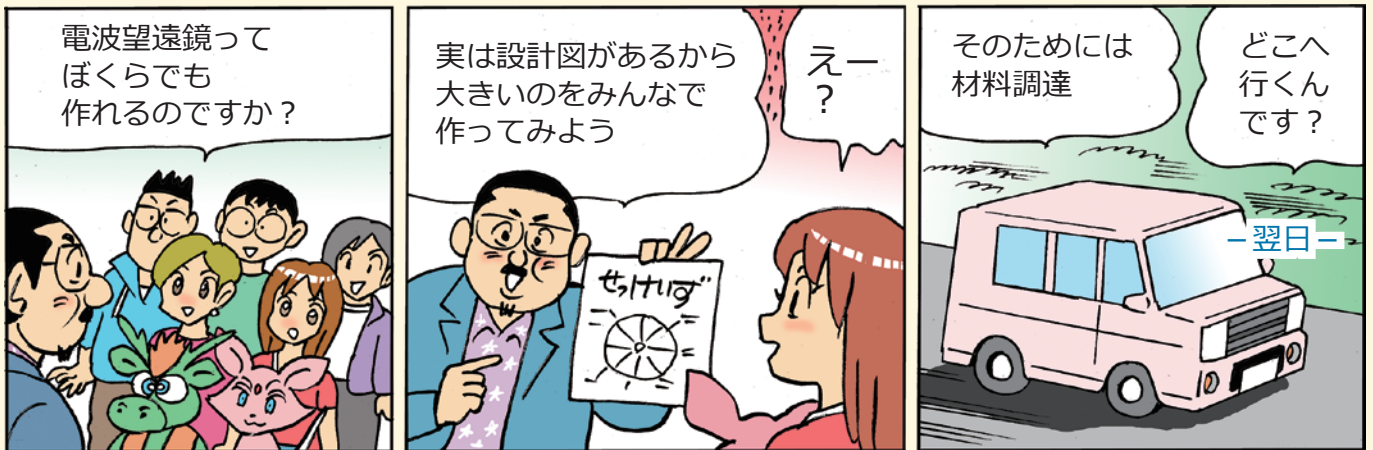
★前号・第08回

「高校生たちが作る 太陽電波望遠鏡」 までのあらすじ

蒼天高校天文部のメンバーたちは、野辺山電波観測所のシノラー先生に連れられて、長野県駒ヶ根工業高校を訪問。高校生が自作した太陽電波観測用のパラボラアンテナや製作途中の太陽電波干渉計を見学した。さらに、パラボラアンテナを作ってみることをシノラー先生に提案されるが、奈央といざよいは、シノラー先生を探る謎の力に気付き始めていた。
(※右のまんがは第08回の最後のシーンです)



第9-1章 DIYでパラボラアンテナの材料を探すぞ 冒険



よみがえれ、伝説の4m…、改め3mパラボラ！

かつて石黒正人先生が自作したパラボラアンテナの復活計画がスタート

●2回の野辺山宇宙電波観測所倉庫大捜索

2018年夏、アルマーの冒険制作スタッフは、野辺山宇宙電波観測所内にある自然科学研究機構野辺山展示室（旧干涉計棟）の倉庫で「4mパラボラアンテナ」のパーツを探そうと、資材の山に分け入り、眼を凝らしていました。

その4mパラボラアンテナとは、NHKによって制作・放送された「課外授業 ようこそ先輩」という番組（1998～2016）で使われたものでした。分野を問わず、さまざまな著名人が自分の母校に出向いて、後輩たちに自身の仕事の大切さを体験してもらいながら交流を深めるという内容の番組で、2003年にBSハカセこと石黒正人先生もご出演。電波天文学の理解を深めてもらおうと、後輩の子どもたちといっしょに、自作の4mパラボラアンテナを完成させ、太陽からやってくる波長約21cm（1400MHz帯）の電波を受信したのだといいます。

じつは、以前からアルマーの冒険制作スタッフも、パラボラアンテナを自作して電波での天体観測を行ってみたいものだと話し合っていました。そこへ、石黒先生から番組で使ったというパラボラアンテナのパーツがそのまま一式残っているはずだ、との耳寄りな情報が…。番組放送当時の写真を見ると、金属メッシュの反射面をもつ立派なパラボラアンテナではありませんか。

そこで、最初から自作したオリジナルではありませんが、ぜひそのパラボラアンテナをもう一度組み立てて、太陽電波を受信するまでを体験しよう、ということになりました。「伝説の4mパラボラアンテナ復活計画」のスタートです。

2回にわたる倉庫の捜索によって、順次パーツが見つかり、残されていたパラボラアンテナの完成写真と付き合わせて、すべての主要パーツを揃えることができました。



(左) さまざまな機器や資材の奥に、チラリと見えたパイプの束。パラボラの骨組み「ハッケン！！」。
(中) とりあえず、発掘したパーツ一式を並べてみた。野辺山観測所広報担当の衣笠健三さんには、たいへんお世話になりました。ありがとうございました。
(右) 企画・構成兼フォトライターの川村が最後のパーツを奇跡的に発見。なぜかこのパーツのみ紙に包まれ、他のパーツとは離れた場所にさりげなく落ちて（置かれて？）いたのだ。「ぐろふふふ」。

そして2019年夏、いよいよ組み立てです。野辺山宇宙電波観測所の工作室をお借りして、組み立てていきます。ところが、パラボラアンテナの形が現れ始めて、ハタと気が付きました。思ったよりも小さいのです（？）。石黒先生によれば直径4mだということでしたが、パラボラ面のカーブを構成する塩ビパイプの長さが、どう見ても人の背丈よりも短いのです。「もしかすると、口径は3mだったかなあ。うーん、長さ1.8mのパイプを使ったような気がしていて、それで4mと思い込んでいたかも（笑）。こうしてアルマーの冒険制作スタッフによる伝説の4m改め、3mパラボラアンテナが復活することになったのです。



「ようこそ先輩」で使われた石黒先生自作のパラボラアンテナ。

●アンテナの主な性能諸元／各部素材（当時）

形式：口径3mパラボラアンテナ／手動経緯台式
アンテナフレーム：塩ビパイプ（スチールワイヤテンション式）
パラボラ中心部の塩ビパイプ支持部：プラスチック植木鉢
パラボラ面：ステンレスメッシュ（網戸用）
受信フィード：5素子八木・宇田アンテナ（再現時は3素子）
受信フィード支持部：床拭きモップ用の柄の伸縮式パイプ
中心周波数：1420MHz（1400～1427MHzが、水素21cm線の観測を保護するため、電波法で放射禁止帯となっている）
架台：3段アルミ脚立経緯台式
垂直可動部／鉄パイプ＋クランプ
水平回転部／なし（人力持ち上げ式）



2003年にNHKで放映された「課外授業 ようこそ先輩」でいっしょに電波望遠鏡を作った小学生の「後輩」たちがプレゼントしてくれたパラボラアンテナの寄せ書き。「当時の生徒さんたちは、今、20歳代後半。この望遠鏡作りがきっかけで、関係する仕事に就いている人がいるかもと思うと楽しいですね」（石黒先生）。

第9-2章 塩ビパイプにテンションをかけて骨組みに 冒険

設計図どおりに組み立てていこう

けっこうおもしろいね

植木鉢を載せる台座のまわりにパイプを固定するためのネジフックをつける

植木鉢にパイプを差し込んで曲げる

塩ビパイプの一端を固定して曲げると自然に放物線を描くのだ

中心から針金で引っ張り塩ビパイプを固定する

各所を止めていく

だんだんできてきた

三角形に加工した金属メッシュを張ってパラボラ面を作っていこう

痛た

縛る針金に気をつけて

植木鉢のうしろに受信フィードを差し込む

受信フィードの位置は焦点に

どの辺かしら？

パラボラの直径と深さから計算できるよ

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

部品を展開して組み立てスタート

パラボラアンテナの仕組みを学びながら組み立てを進める

●材料一式はDIYショップで調達

電波望遠鏡としてのパラボラアンテナ (parabolic antenna、parabola antenna) は、電波を集めるアンテナ面はもちろん、電波を受信する受信機や架台など、その役割によっていくつかのコンポーネントに分類されます。そこでここでは、石黒先生の3mパラボラアンテナを組み立てながら、電波望遠鏡としての仕組みを部分ごとにやや詳しく解説していきましょう。

ところで、今回復活させた3mパラボラアンテナは、石黒先生の「構成部品はできるかぎりDIYショップ（いわゆるホームセンター）で入手できるものであること」というコンセプトで製作されていました。そのため、構成部品には安価な市販品をベースに独自の工夫が施されています。これからパラボラアンテナを自作してみたいという方には、参考になるのではないのでしょうか。

さて、パラボラアンテナでいちばん目立つのは、電波を集めるために皿のようにへこんだ円形の「パラボラ面」でしょう。パラボラとは「放物線」のことで、その形は、

$$y = ax^2$$

で描かれます。この放物線をy軸中心に回転したものが、パラボラアンテナの面になるのです。したがって、正しい名称としては「回転放物面（回転パラボラ面）」となるのですが、一般的には単に「パラボラ」や「パラボラ面」、もしくは「放物面」などとも呼ばれています。

パラボラ面は、光の望遠鏡であるニュートン反射式望遠鏡の主鏡にも使われています。それは、パラボラ面の正面からやって来た平行光線を焦点の一点に集めることができるという特性を持っているからです。電波望遠鏡でも、やはりパラボラ面は電波を焦点に集めることができます。

均質な素材の棒の一端を固定して曲げると、放物線に近似されるということで、3mパラボラアンテナの骨組みは塩ビパイプです。パラボラ面の放射状に広がる骨組みの中心に植木鉢を流用したハブを作り、これに塩ビパイプの一端を固定、さらにもう一端を細いスチールワイヤーでテンションをかけて引っ張ることで曲線状に曲げています。放射状のパイプは、30度ごとに計12本あります。さらに隣り合うそれぞれの外周と中間を2本のパイプでつないで、パラボラ面の骨組みにしています。



図01 野辺山宇宙電波観測所のワークショップの一角をお借りして、いよいよパラボラアンテナの組み立て開始。BSハカセは、15年ぶりの再会に、感涙？ まずは発掘された全パーツを並べて、記念にパチリ。



図02 パラボラアンテナの中心部は、アルミ板とその上に逆さまに伏せたプラスチック製の植木鉢がベースとなっている。アルミ板の下の鉄パイプは、パラボラアンテナの仰角を動かすための回転軸だ。植木鉢の外周を取り巻くように塩ビパイプ用の継ぎ手を固定して、パラボラ面の骨組みを構成する塩ビパイプの片端を差し込んでいく。この時点で、すでにアンテナ直径は4mではなく、3mであることが発覚！



図03 放射状に配置されたパイプは、外側の一端をスチールワイヤーで中央部に引っ張り、湾曲させることで近似的にパラボラ面を作っていく。パイプの中間には塩ビパイプの継ぎ手を利用して補強のためのステーを装着。固定にはパイプと継ぎ手に穴を空けてボルトで共締めだ。



肝心のパラボラ面の素材は、金属板では加工がたいへんなので、ステンレスメッシュ（網戸用の細かい金網）を使用しています。ステンレスメッシュは型紙を作ってパラボラ面を12分割した扇形に切り出し、骨組みの隙間を埋めるように細かい針金で固定しました。

ところで、電波望遠鏡のパラボラ面はどの

くらいの精度が必要なのでしょう。一般的には、観測波長の1/20以下といわれています。今回は波長が約21cmの電波を観測するので、およそ1cm程度のデコボコは許されるということです（実際には、もう少し大きくパラボラ面がうねっていましたが…）。デコボコが少なく、理想的なパラボラ面に近いほど、電波をしっかりと集められるので、受信感度も高くなります。

また、メッシュのパラボラ面では、電波が通り抜けてしまわないか心配になりますが、これもパラボラ面の精度と同様に、1cm程度の穴があっても問題ありません。



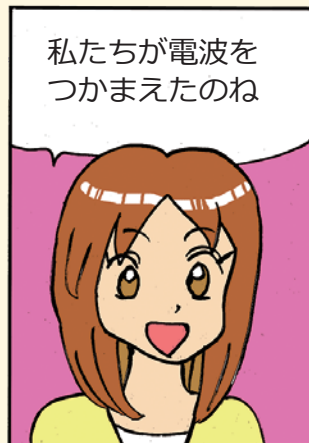
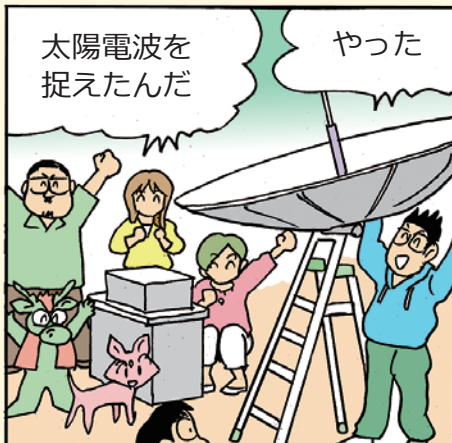
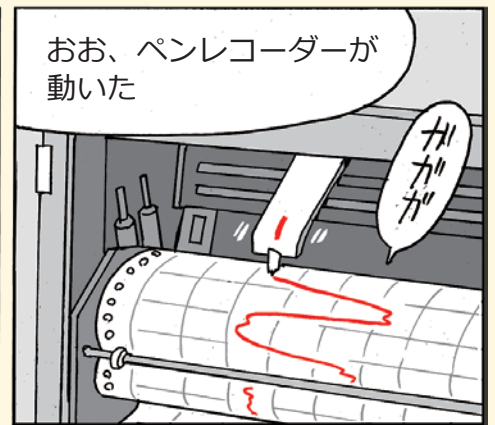
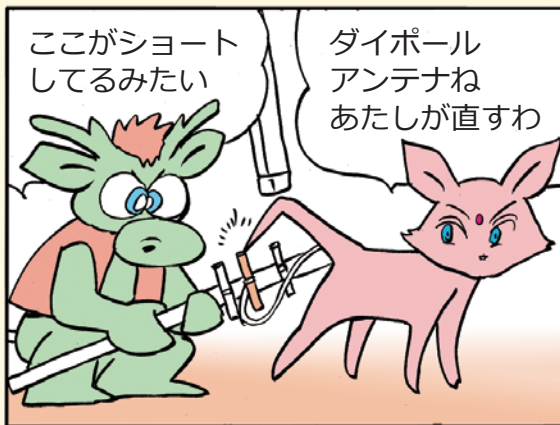
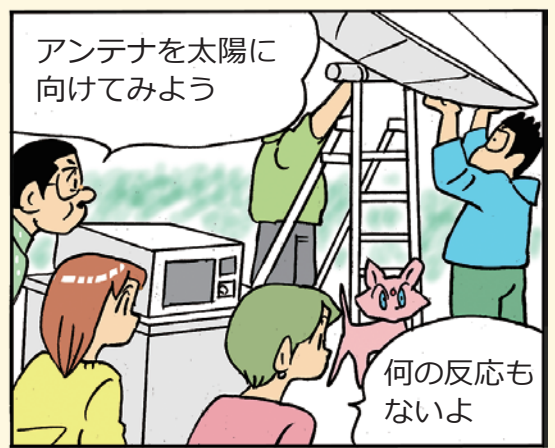
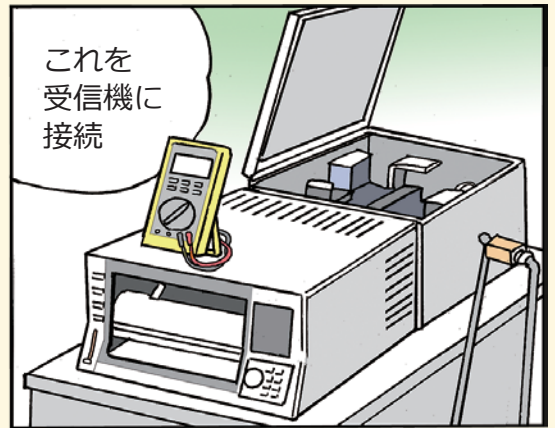
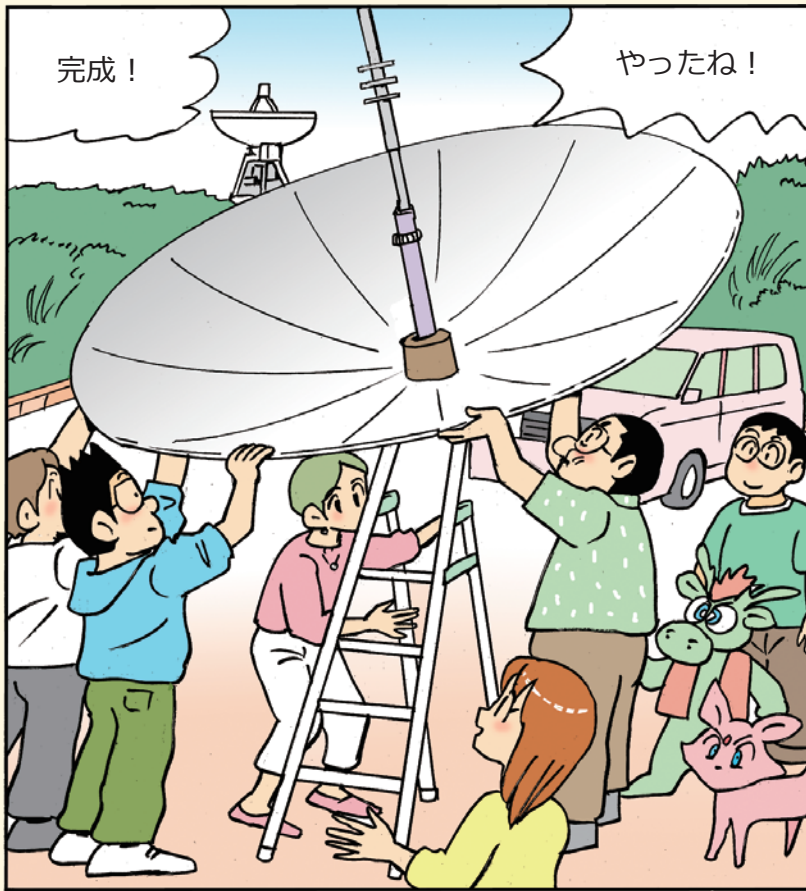
図04 だいぶ形になってきたパラボラ面の骨組み。ここでひとつ問題発生。骨組みを完成させると、なんと工作室のドアから外に出せそうにないことに気が付いた。とりあえず、骨組みを完成させて、再度一部を分解して運び出すことに……。



図05 何の変哲もないようなアルミ製の脚立。脚立の上に、回転軸となる鉄パイプの受けとしてクランプを取り付けた角材をボルトで固定。庭木の手入れでも使ってきた。仰角の調整は、寸切りボルト（長いねじ）これがパラボラアンテナを支えにして行うように工夫されている。の架台となるのだ。



第9-3章 太陽電波を受けてペンレコーダーが動いた！ 冒険



太陽電波受信の要は金属の棒？

電波を捉えるのは基本の受信フィードと信号処理

●電波を捉えるのは基本の受信フィードと信号処理

パラボラ面はその焦点に電波を集めますが、実際に電波を捉えるのは焦点の位置に設置された小さな受信フィードです。3m

パラボラアンテナでは、観測波長の半分(1/2波長)の長さ約10cmほどの銅のパイプを使っています。この銅のパイプを観測波長の1/4の長さに当たるおよそ5cmの間隔でアルミの角パイプ上に3本並べます。もちろん、3本の銅のパイプとアルミの角パイプは、きちんと絶縁してあります。真ん中のパイプは受信機につながれ、本当の意味でのアンテナです。また、3本の銅のパイプのうち、パラボラ面に近いものは電波を導く導波器、遠いものは後ろに逃げた電波を反射させて受信効率を高める反射器と呼ばれます(図04)。実はこのスタイル、高性能なアンテナの基本であり、地上放送のテレビアンテナでもある「八木・宇田アンテナ」形式なのです。

この八木・宇田アンテナをパラボラ面の焦点位置に設置すれば、アンテナの完成です。焦点の位置は、パラボラ面の深さから計算で求めることができました。

こうして、アンテナはなんとか形になりましたが、受信した電波を電圧に変換して、人が視覚的に理解できるようにする受信機のシステムまで自作というのはあまりにハードルが高すぎるのと、部品をDIYショップで入手するのもさすがに困難です。そこで、今回はシノラー先生こと篠原徳之さんにお任せしました。実は、事前に石黒先生と使用する機器について打ち合わせいただき、さらにはなぜかショートしていたダイポールアンテナの修復までの神対応。

そのおかげで、実際に太陽電波の観測を行った日は、曇りがちな天候でしたが、わずかな晴れ間から太陽が顔を出したタイミングを狙ってアンテナを向け、なんとか太陽からの波長約21cmの電波を受信することに成功したのです。



図01 まずは、パラボラ面作り。スタッフ総出で金網を固定していく。



図02 2枚の金網を重ねて、いっしょに細い針金で塩ビパイプの骨組みに縛り付けていく地道な作業。



図03 パラボラ面が完成し、いよいよ受信フィードの取り付け。ここで、問題発生だ。このパラボラの焦点位置を忘れてしまったという石黒先生。しかし、さっと方程式を解き、パラボラ面の底からの長さを算出し、事なきを得た。

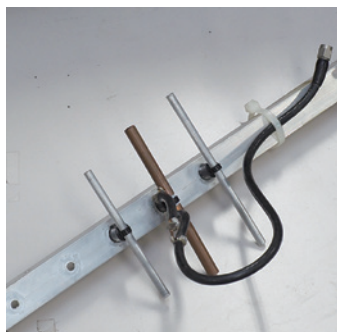


図04 受信フィードは、八木・宇田アンテナのスタイルで利得を稼ぐ。ダイポールアンテナは、波長の半分の長さよりもほんの少し短めに、導波器はさらに少し短め、反射器はわずかに長めに作るのがコツ(もちろん、理論的な理由があり)。



図05 これでパラボラアンテナの完成だ！



図06 (左) またも問題発生。なぜか、電波が受信できない。信号処理系の回路を納めた配電箱をのぞき込み、「なんでだろう？」と石黒先生。

図07 (右) 問題は、なんとダイポールアンテナのショート!? 原因がわかれば、楽勝だ。篠原さんの半田ごてさばきで一瞬にして解決。

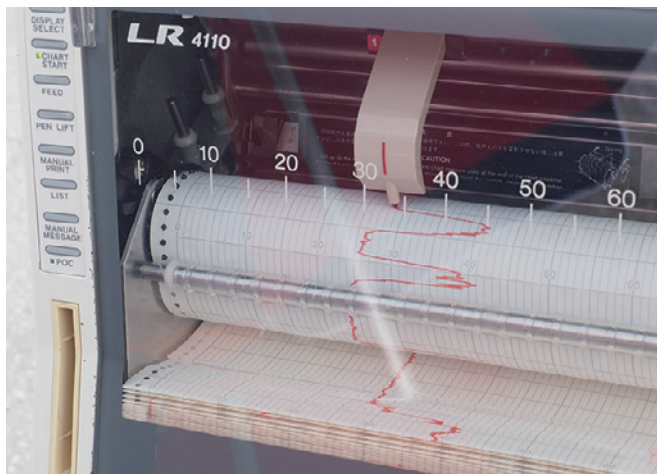


図08 人力でパラボラアンテナを太陽の方向に向けたり故意に方向をずらしたりして、ペンレコーダーのペンが連動して振れることを確認した(ペンが右に振れるほど電波が強い)。これで確かに太陽からの電波を受信したのだ。

完成したパラボラアンテナの焦点の位置(お皿の底から受信機までの長さ: f)は、アンテナの半径と深さから以下の式を使って求めることができます。

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

y : パラボラの深さ方向の距離、 x : パラボラの半径方向の距離

3mパラボラアンテナの受信機の構成

受信機はアンテナで受信した微弱な電波を増幅し、電波強度に応じた直流電圧を発生させる装置です。

今回、受信機は篠原さんに用意してもらいました。アンテナで捉えられた信号がどのように処理されるのか、必要な部品とともに簡単にご紹介しましょう。ほとんどすべての部品は金属製の配電箱（シールドケース）に納められています（図01）。

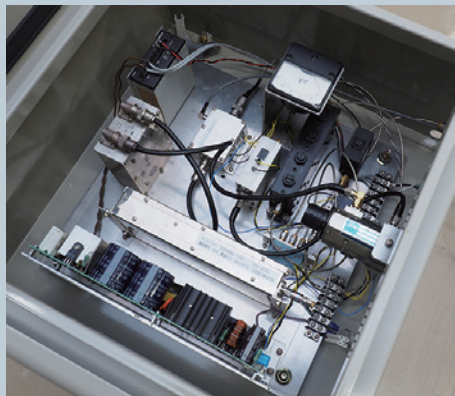


図01 配電盤などを入れる金属製の配電箱に電波を電圧に変換する機器が詰め込まれている。

まず、「アンテナ」に入った電波は、同軸ケーブルの中を進んで「アンプ」で増幅されます。さらに「バンドパスフィルター1」で選択的に1420 MHz付近の周波数の電波のみが先へと通されます。続いて電波は「ミキサー」に入ります。周波数が高い信号は、直接処理を行うことが難しいため、ミキサーを使って1420 MHzの電波とローカル発振器からの1320 MHzの電波とを混合することにより差周波数である100 MHzの周波数に変換されます。入りに仮に1220 MHzの電波もあったとすると、こちらも100 MHzに変換されて区別がつかなくなるので、この不要波を除去するためにバンドパスフィルター1が必要となります。ミキサー出力をアンプで増幅してから「バンドパスフィルター2」を通して、100 MHz付近の電波のみが「検波器」へと進みます。検波器によって電波強度に比例する直流電圧へと変換され、初めて「電圧計」や「ペンレコーダー」で電波の強弱を目で見ることができるようになるのです（図02）。

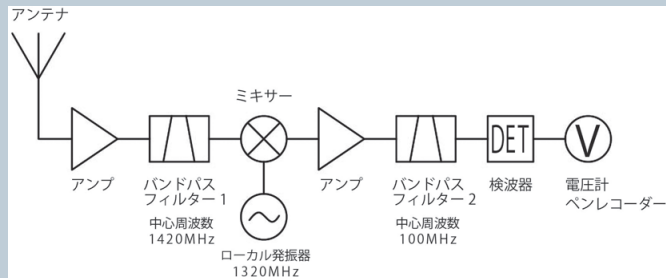


図02 今回の受信機の構成をブロック図に示しました。

●21 cm線の話

今回の観測に用いたのは、周波数1420 MHz付近の電波です。宇宙からは、水素が発する周波数1420.4 MHz、波長21.1 cmの電波（輝線スペクトル）、通称「21 cm線」がやって来ています。水素の電波は天文学的に重要とされ、この波長付近の1400～1427 MHzの電波は法律で発することが禁じられています。したがって、人工の電波源によるノイズが少ない周波数帯なのです。ちなみに今回観測したのは、太陽からの連続スペクトルの一部で、21 cm線そのものではありません。

●パラボラアンテナの角度分解能

「角度分解能」とは、天体の構造をどこまで細かく見分けられるかを示す数値ですが、パラボラアンテナの電波望遠鏡を使った場合、おおむね以下のような式で表せます。

$$\theta \approx 1.2\lambda / D$$

（ θ ：角度分解能（ラジアン） λ ：波長 D ：アンテナの直径）

直径3m、波長21 cm (0.21 m) とすると、

$$1.2 \times 0.21 \div 3 = 0.084 \text{ラジアン} \approx \text{約5度}$$

つまり、3mのパラボラアンテナで波長21 cmの電波を捉えた場合、角度分解能は、約5度ということになります。

太陽の見かけの直径は約0.5度なので、アンテナの方向が多少太陽からずれていても、太陽からの電波を捕まえやすいといえるでしょう。



事前に石黒先生と篠原さんによって、念入りにチェックされる受信機。とても楽しそうな二人だけの世界？

●「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（星の手帖社）

監修／平松正顕（国立天文台アルマプロジェクト）

編集／高田裕行

デザイン／久保麻紀

特別ゲスト／石黒正人（国立天文台名誉教授）

篠原徳之（国立天文台太陽観測科学プロジェクト）

「アルマーの冒険」09回

発行日／2019年11月1日

発行／国立天文台天文情報センター出版室

制作協力／アルマプロジェクト・野辺山宇宙電波観測所

★「アルマーの冒険」バックナンバーは
<http://www.nao.ac.jp/naoj-news/almar/> をご覧ください。