

## 第32回衛星設計コンテスト

### アイデアの部 ミッション概要書

#### 1. 作品情報・応募者情報

作品名 傘型アンテナによる月面電波天文台の構築
副題 月の裏側に世界最大の電波天文台を構築するためのアンテナ設計や運搬・設置方法の提案
学校名 高知工業高等専門学校

#### 2. ミッションの概要

低周波電波受信用の傘型アンテナによる月面電波天文台を構築するミッションで、月着陸機に取り付けた折りたたみ傘型アンテナを月の上空約100mでバネの力で横方向に放出し、落下させて展開させ設置する。その後、円状に設置されたアンテナの中心に月着陸機が着陸し、アンテナから収集した観測データを月のハロー軌道を周回する中継衛星を介して地球に送信する。最終的には、月の裏側の複数のクレーターにこのアンテナを数千機設置し、世界最大の電波天文台を構築する。

#### 3. ミッションの目的と意義

##### (a) 目的

月の裏側に低周波電波を受信するLWA(Long Wavelength Array)アンテナを設置し電波天文台を構築することにより、地球上で行う宇宙電波観測の課題である人工電波の影響を受けないため、より質の高い観測を行うことが可能である。その結果、将来的な宇宙探査に大きく貢献し宇宙の起源の解明、地球外文明の発見等、宇宙研究の促進が期待される。

現在 JAXA が計画している月面電波天文台設置計画では、電波観測にダイポールアンテナが使用される予定であるが、ダイポールアンテナよりも受信できる電波の帯域が広く、高感度なLWAアンテナを使用することにより、従来の衛星軌道の宇宙電波望遠鏡より高性能かつ長期的に電波観測を行うことが目的である。本ミッションでは、アンテナを運搬しデータを収集する月着陸機と中継衛星は、スペースX社のスターシップに搭載して月に運搬することで、低コストかつ短期間でミッションを行うことを考えている。

##### (b) 重要性・技術的、社会的意義等

宇宙から来る低周波の電波は、銀河の形成や進化、超新星爆発の残骸、宇宙の構造など様々な情報を届けてくれる。このほかにも宇宙からくる電波により新たな星や地球外文明を発見することが可能であると考える。我々は、地球外文明も人類と同様に通信手段として電波を用いている可能性があると考えた。もし、地球外文明が電波を使用しているならば、常に宇宙空間に電波を放出していることになる。この放出されている電波を鮮明に観測し解析することができれば、その星の自転周期や地球外文明の存在を発見することも可能である。これらの重要な情報を確実に観測するために、太陽系内だけでなく太陽系外から放射される低周波の電波を観測することが可能である電波天文台が必要となる。そのため、我々は電離層がなく地球の人工電波の影響を受けない月に電波天文台を構築することを考えた。電離層がないため低周波の電波の観測が可能となり、地球外文明が使用している可能性のある電波を受信できる確率が上昇する。さらに、地球では気象や災害が原因で電波天文台が崩壊してしまう恐れがあるが、月には大気やプレートテクトニクスがないため長期に渡り電波観測を続けることが可能である。

技術的な面では、現状の宇宙科学でも月の裏側にアンテナの設置は可能であると考えており、最近では2024年6月3日に中国の無人月面探査機「嫦娥6号」が月の裏での着陸、サンプルの回収や地球との通信に成功していることから、我々のミッションで行う月の裏での着陸も不可能ではないと考える。月着陸機と中継衛星を月に運搬する方法については、現在スペースX社で開発されている宇宙ロケットとしては最大であるスターシップに搭載することで、実現可能であると考えている。

#### 4. ミッションの具体的な内容

##### (a) システム

月着陸機と中継衛星はスペースXのスターシップに搭載し、月へ運搬することを目標としている。スターシップの月周回軌道での軌道投入能力は100tでスペースは1100m<sup>3</sup>であるため月着陸機と中継衛星どちらも搭載することが可能である。スターシップから中継衛星と月着陸機の放出を行う。中継衛星の軌道は地球との交信が常に可能なハロー軌道を周回し、月着陸機は今年の2月に月面着陸に成功した「オデュッセウス」と同じように高度92kmほどから軌道投入を行いアンテナを高度100mから放出した後、月面に着陸する。

ミッションを行うにあたりLWAアンテナの構造を模倣して8本の骨を支えとして銅テープを貼って実際にアンテナを試作した。図1、2は、試作した傘型アンテナで、実際にアンテナとして使用できる特性であることを確認することができた。この傘型アンテナの大きさを3倍程度にしたものを折りたたみ月着陸機に取り付ける。



図1 試作した傘型アンテナ(1)



図2 試作した傘型アンテナ(2)

図3の様に、閉じたアンテナを50個程度取り付けられた月着陸機が月面から上空約100mに到達すると、内部のバネによりアンテナが横に押し出されて放出される。放出されたアンテナは自由落下し、月の地面に突き刺さり固定される。アンテナを地面に固定するために、シャークアンカーを取り付ける方法を考案した。図4は実際のシャークアンカーの形をCADで再現したものである。

シャークアンカーは本来、支柱を地面にしっかりと固定するための機構であり、固定するにはハンマーなどで打ちつけてくぎのように固定する。アンテナの設置方法は上空から落下させて突き刺す方法であるため、シャークアンカーによりアンテナが地面に打ちつけられ確実に固定できると考える。また、アンテナが垂直方向にまっすぐ落下する必要があるため、シャークアンカーの内部に重りを取り付け、月の地面に突き刺さり固定した後にアンテナを展開する。

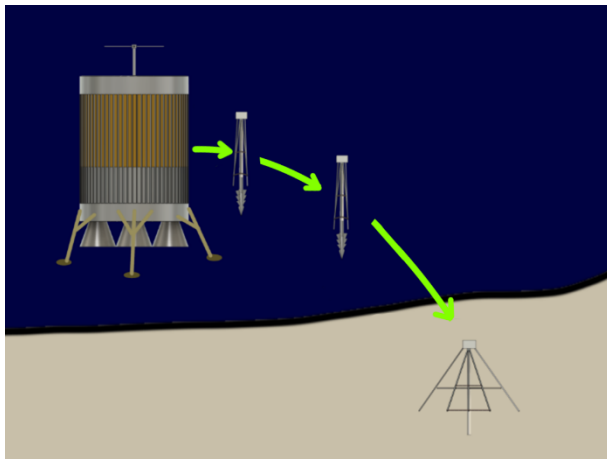


図3 アンテナの放出

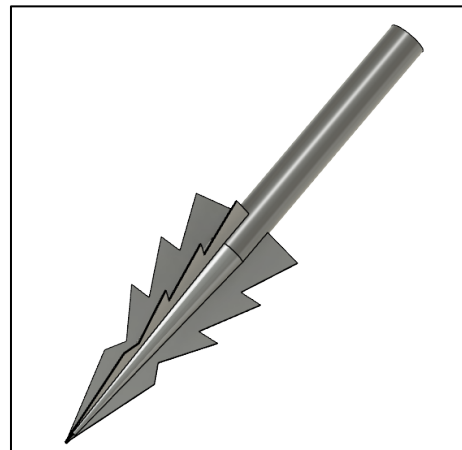


図4 シャークアンカー

円柱状の月着陸機からアンテナが同時に放出されるため、アンテナはクレーターの中にほぼ等間隔に近い円状に設置され、円状に並んだアンテナの中心に着陸機が着陸する（図5）。

中心にある円柱月着陸機が各アンテナから観測データを収集し、月をハロー軌道で周回している中継衛星にデータを送信する。そして中継衛星から地球にデータ送信をする（図6）。



図5 アンテナを円状に配置

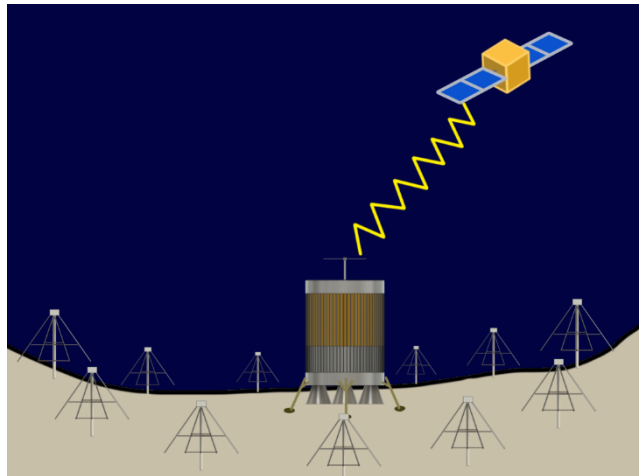


図6 中継衛星にデータを送信

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

具体的には、月着陸機と中継衛星をスペースX社が開発しているスターシップに搭載し、月まで運搬し月着陸機が着陸する前にアンテナを放出し設置する。

実現のために、月面にアンテナを運ぶための月着陸機開発や、アンテナを落下させた際にシャークアンカーがしっかりと地面に固定されているか、地面に固定されたアンテナの展開方法がどのような環境でも安定して行うことができるのか具体的な実験を行う必要があると考える。また、月の裏側でも十分に太陽光がとどき、太陽が当たる期間である半月の充電で、次に充電できるまでの期間分のバッテリーを、月着陸機及び通信システムに確保できるかを調査する必要がある。

1つのアンテナ約5kgを月の上空100mから自由落下させた場合、約18.0m/s(約64.8km/h)となる。この速さで月面にアンテナが突き刺さった場合、月面の塵が舞い上がるはずである。アポロ計画の際は舞い上がった塵により計器に傷がついたり隙間に入り込んだりし、ミッションの弊害となった。この塵により月着陸の弊害やアンテナ本体に不具合が起きる可能性がある。これらのシミュレーションを行うために、今年の2月22日に月面着陸に成功したオデュッセウスが行った「着陸により月面の塵がどのように舞い上がるかを測定する」のデータを活用したいと考えている。

## 5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

電波望遠鏡を宇宙に打ち上げる方法は過去に実現されているが、地球を周回するためのエネルギーが必要になり複雑な機器などの開発や実験を行わないといけなくなる。もし、軌道修正システムで問題が起きた場合、打ち上げた電波望遠鏡自体が無駄になってしまい、もう一度打ち上げるための膨大な費用や時間がかかってしまう。しかし、我々が考案する月面電波天文台は月の裏の複数のクレーターにアンテナを設置し、月を周回する中継衛星を介して地球にデータを送信するため中継衛星に不具合が起きたとしてもアンテナ自体を失うことはない。さらに、月の自転周期は約27日のため観測するには十分な時間があり、従来の打ち上げ型電波望遠鏡より長期的に安定して運用することが可能であると考えられる。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

宇宙の起源の解明や地球外文明の探査に貢献できる。地球からの電波や電離層の影響を受けず観測を行うことができるため、LWAアンテナを使用した低周波の5~90MHzでの宇宙電波観測に対応できる。このため、最大の謎である宇宙の誕生や銀河団の形成、さらには地球外文明の発見など天文学者や宇宙開発の研究者が大きな発見をすることが可能である。

アンテナの設置方法として月の上空から落下させて突き刺す方式を考案した。これが成功すれば、月面上で建築を行うための材料や固定方法などで新しい価値を見出す可能性がある。

以上

# 傘型アンテナによる月面電波天文台の構築

高知工業高等専門学校

福原颯馬 溝渕遥人 西岡美文 中川陽菜 澤本蒼太

### 1. ミッションの背景

現在行われている宇宙の電波観測では、様々なことが発見されている。最近では、2024年4月8日にうみへび銀河団の中にある領域で今までにない電波放射が発見されている。この領域ではX線観測でも衝突などの特徴的な構造が見つかっていないため、従来よりも低い周波数での観測が重要になってくるという考え方もある。このような低周波電波放射を観測することは、銀河団の進化や宇宙線のメカニズムなどの解明、地球外文明の発見につながるため、これからの宇宙探査では地球では観測しにくい低周波の電波を鮮明にとらえ、解析することのできる月面電波天文台が必要になる。

太陽からは数10MHz以下、木星からは30MHz近辺の強い低周波数帯の電波が放出されている。電離層の影響で、地球から10MHz以下の周波数帯を観測することは困難だが、宇宙空間での観測により、太陽からの電波放射は低周波数帯まで続いていることや、木星からはヘクトメートル波帯や、キロメートル波帯においても電波が放射されていることが明らかとなった。さらに、天王星、海王星からもキロメートル波の電波が放射されていることが発見されている。一方、地球からも宇宙空間に向かって、キロメートル波帯で非常に強い自然電波が放射されていることが、初期の衛星観測などで見つかっている。

惑星からの電波放射メカニズムやダイナミクスなどは解明されておらず、銀河背景放射のスペクトル分布や、銀河系内および銀河系外電波源の低周波数帯での分布は調べられていない。こうした低周波の電波放射を安定に観測するために電離層や地球上の人工電波源や地球のオーロラに伴うキロメートル波放射からの混信の影響を受けない月の裏側が適しており、高感度の観測も可能となる。これらの理由から我々は、将来的な電波による宇宙観測を行うために月の裏側に電波天文台を設置することを提案する。

実際に、高知県仁淀川町ではLWA(Long Wavelength Array)というアンテナシステムにより木星から放射される電波観測を行っている。図1、2は実際のLWA-Niyodoで、電波の障害がない山奥での電波観測を行っている。我々も月面でこのようなLWAアンテナを大規模に設置することを考えている。

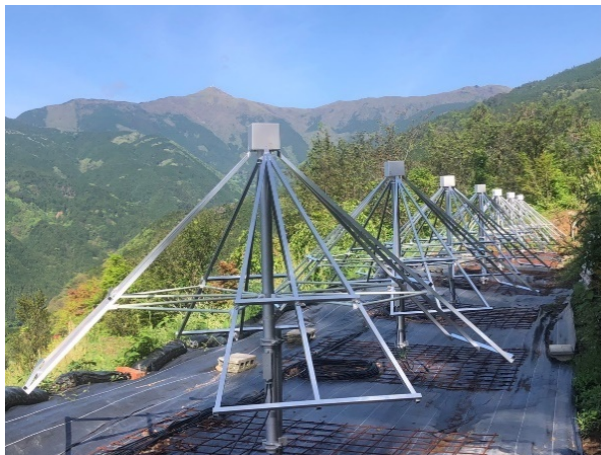


図1 LWA-Niyodo (1)

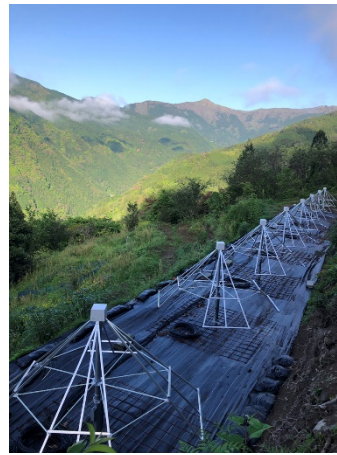


図2 LWA-Niyodo (2)

## 2. アンテナの設置方法

アンテナを設置する方法として当初は月面ローバーを用いて月の裏全体にアンテナを設置する方法を検討していたが、月の表側と裏側の標高を色分けして可視化した画像（参考文献参照）を比較したところ（図 3、4、5）、裏側では多くのクレーターが存在しており高低差が激しいため、月の裏全体にアンテナを設置するのは困難であると考えた。

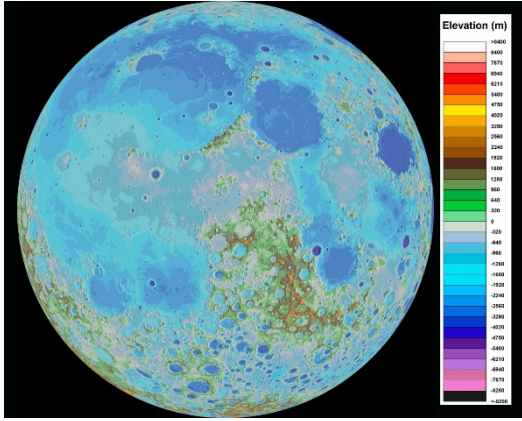


図 3 表側

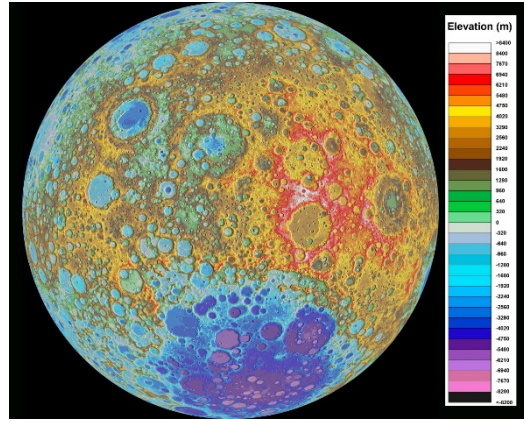


図 4 裏側

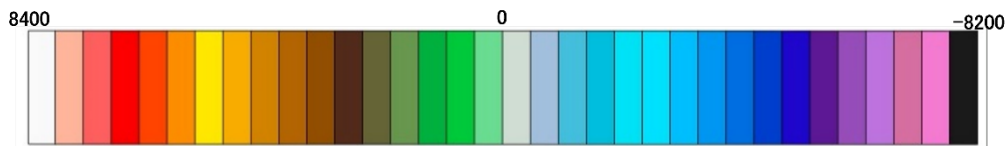


図 5 標高[m]

図 5 のように、灰色と黄緑色の間を標高 0m として、標高が 320m ずつ上がるごとに一色ずつ変化している。最も標高が高い場所で 8400m、最も低い場所で -8200m となっており、高低差は約 1 万 6000m になる。高低差が激しい月の裏側でアンテナを設置するために、我々はクレーターに着目し、月面画像からクレーターの中は比較的高低差が少ないことを見つけた。図 6 は、大きさや高低差などを考慮して、月面天文台を設置する最適なクレーターを選別し番号を付けて分類した。

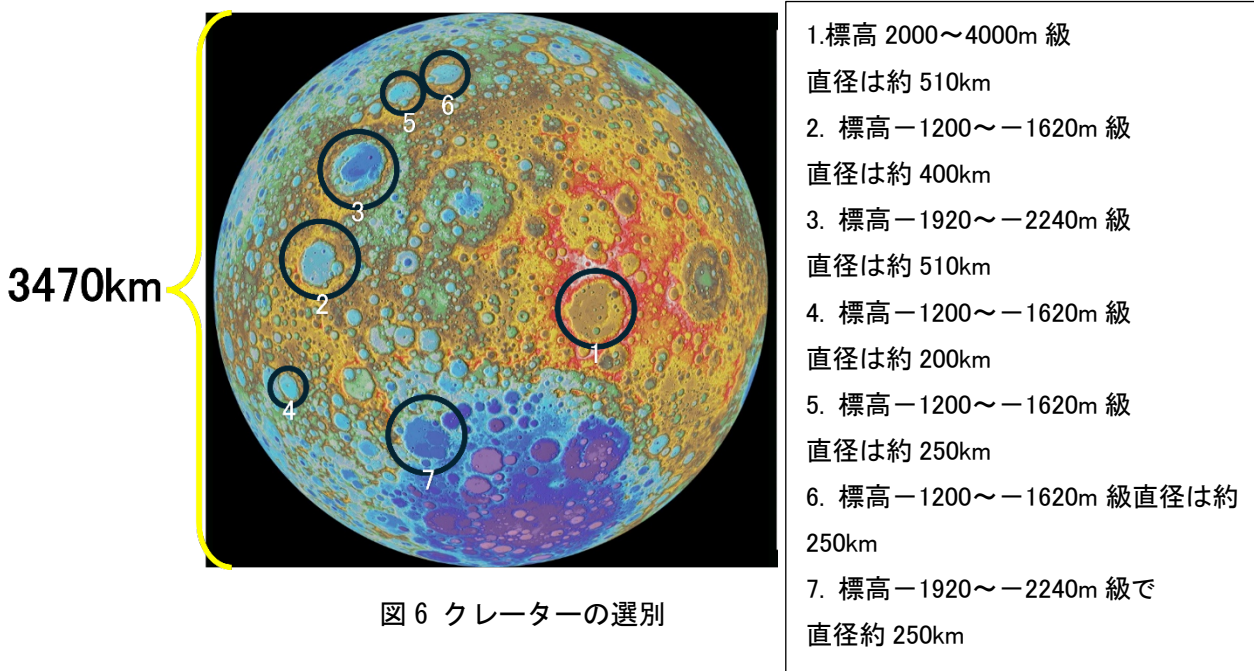


図 6 クレーターの選別

### 3. アンテナの設置シミュレーション

Python を用いて 5kg の傘型アンテナを月の上空 100m 地点から自由落下させたときのシミュレーションを行った。速度は 18.02m/s、時間は 11.092s、衝突エネルギーは 812J となり図 7、8、9 のグラフのような結果となった。地球上で考えると、812J のエネルギーは 5kg の物体を 16.5m (ビルの 5 階程度) の高さから落としたときとほぼ同じ衝突エネルギーとなり、シャークアンカーを月面に突き刺すには十分なエネルギーであることが分かった。

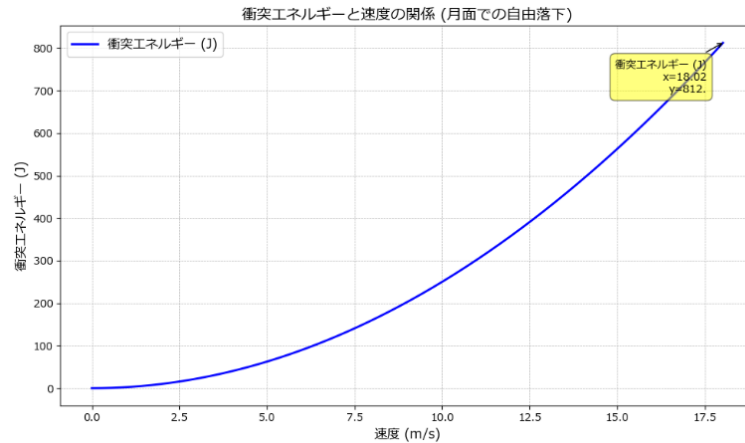


図 7 衝突エネルギーと速度

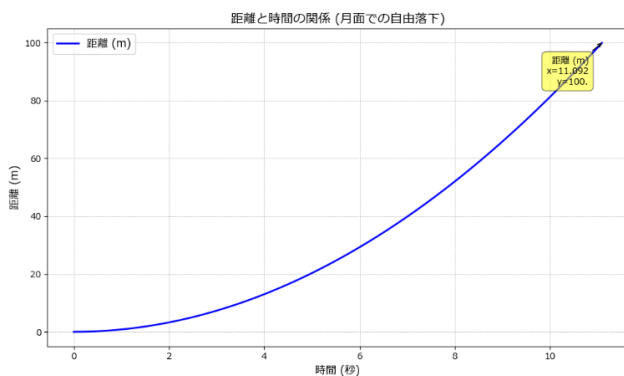


図 8 距離と時間

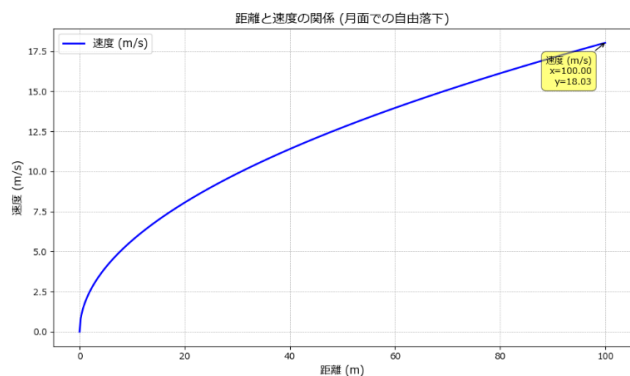


図 9 距離と速度

製作したシャークアンカーをアンテナに取り付け、比較的粒子の小さな砂を選んで実際に設置をした(図 10、11)。シャークアンカーの構造上、一度突き刺さると抜けにくく安定してアンテナを設置できることが分かった。



図 10 試作したシャークアンカー



図 11 傘型アンテナの設置実験の様子

#### 4. アンテナの設計

図 12 のように、LWA アンテナは 4 方向にアンテナが展開された形をしている。この形を 8 本骨の傘を用いることで再現できるのではないかと考え、市販の傘を用いて作成した。LWA アンテナは、低周波観測用のアンテナであるため、5~90MHz の低周波での観測に対応している。4 方向にアンテナが展開されることで、右旋と左旋の 2 成分の電波をハイブリッド回路を接続することで同時に観測することができるようになっている。

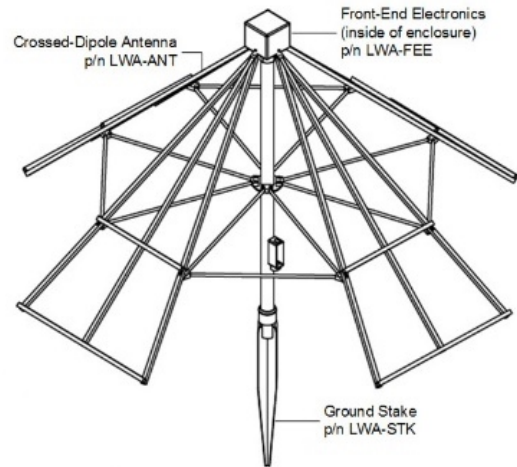


図 12 LWA アンテナの形状 (参考文献参照)

モデルにした LWA アンテナの寸法を図 13 に示す。二等辺三角形になっており、中心のタイポールアンテナの左側から 0.6m の点に、直角にアンテナが配置されている。この直角のアンテナは、中心のタイポールアンテナを 1/3 にした点に配置されていることが図 13 からわかる。

##### 【作成した傘型アンテナ】

市販の傘を LWA アンテナに見立てて、銅テープを貼りアンテナとした。LWA アンテナは、4 方向に素子を展開する形状をしたアンテナである。この形状を再現するために 8 本骨の傘を利用することで再現することに成功した。

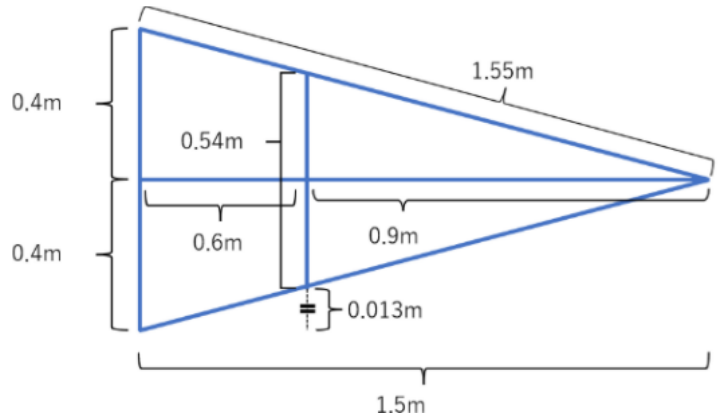


図 13 LWA アンテナの寸法

図 14 は傘型アンテナの概形を示したイラストである。イラストから 8 本骨の傘を用いることで、正確に再現することができることが分かる。今回の実験では同じ構造の傘型アンテナを開傘時直約 120cm の傘で作成し、特性の測定を行った。

##### 【傘型アンテナの電気的な特性】

傘のビニールに付いている八本骨の折り目に従って銅テープを外側から貼ることで正確に貼ることができ、アンテナとして機能させている。図 14 を基本の形状として、そこにいくつかの銅テープを追加することで特性の向上を目指している。

図 16 に示すのは、ベクトルネットワークアナライザ NanoVNA によって得られた、基本構造傘型アンテナの SWR である。一般にアンテナとして機能するといわれる SWR2.0 のラインは図 16 の NanoVNA の画面の一番下の横線である。SWR の値は黄色のグラフで示されている。画面左側から 10MHz~800MHz までの値が表示されている。

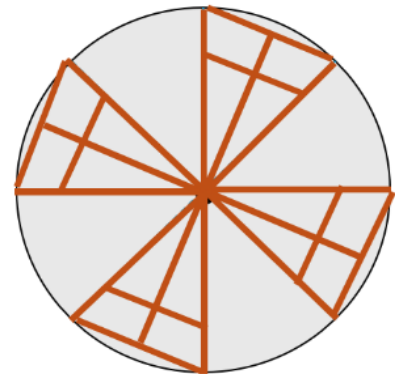


図 14 傘型アンテナの概形

低周波では SWR の値が高く、黄色のグラフは高い値でありアンテナとして機能していないが、徐々に高周波になるにつれ一定とは言えないが SWR は低くなる傾向にあるといえる。しかし低周波では SWR の値が少し高く、高周波での受信に向いているアンテナになった。銅テープの貼り付け方にもこだわった。銅テープを傘の内側に張り付けることで、給電点を内側に持つことに成功した。銅テープの上側に養生テープを貼ることで銅テープの強度を上げた。この貼り付けかたにより、傘型アンテナの特徴である、閉じて開けるという大きなメリットを銅テープが剥がれることなく行えるようになっている。

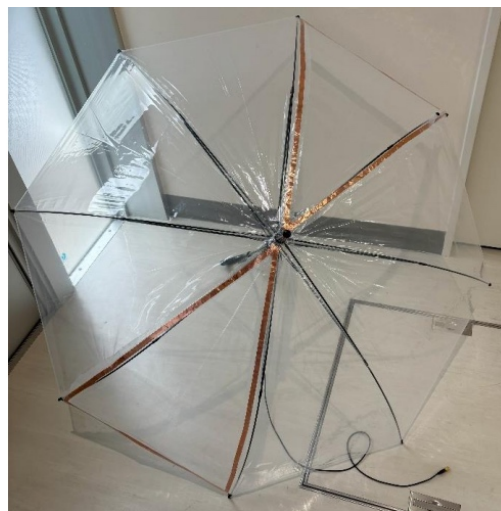


図 15 傘型アンテナの基本形状

次に、全体の特性を良くすると考えられる、基本形状のアンテナの三角形真ん中に垂線を下す形の銅テープを追加してみる。図 17 に作成したものを示す。横向きに加えた素子は、ある一定の周波数帯の電波の SWR の値を下げることを確認している。



図 16 基本形状の特性

図 15 の基本形状のアンテナでは SWR が 6 を超えるような値を示している箇所があったが、今回のアンテナでは 6 を超す箇所はなく全体的に、黄色のグラフも滑らかになっており、値が下がっていることを確認した。この結果により、三角アンテナの面積を大きくする役割を果たす、垂線の銅テープは全体の結果を良くすることにつながることを確認した。

その結果、作成したアンテナが図 17,18 である。縦向きの素子をそれぞれ 2 本ずつ追加して、アンテナの面積をより大きくする工夫をしている。この図 18 のアンテナにより得られた特性の画像が、図 19 である。

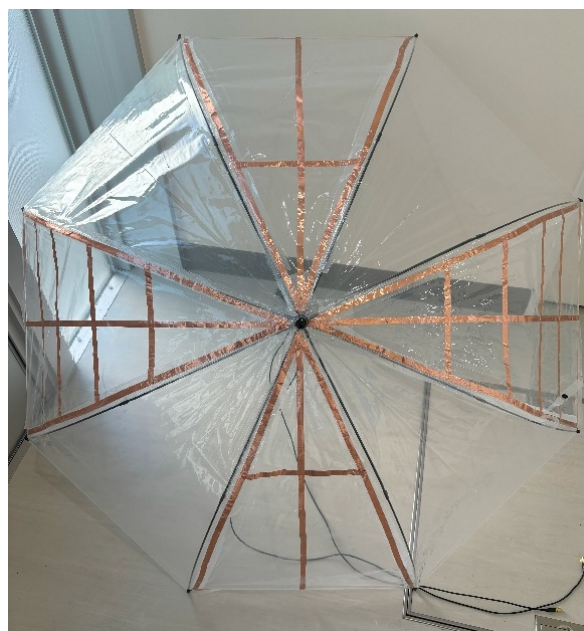


図 17 傘型アンテナ 1

明らかに今までの特性のデータに比べて全体の SWR の値が下がっていることが確認できる。この結果により、傘を用いた傘型アンテナは、LWA アンテナと同様に広帯域の使用が可能であることを確認できた。以上のことから、より大きな傘を用いることにより、より低周波の電波を受信できると考えている。





図 18 傘型アンテナ 2

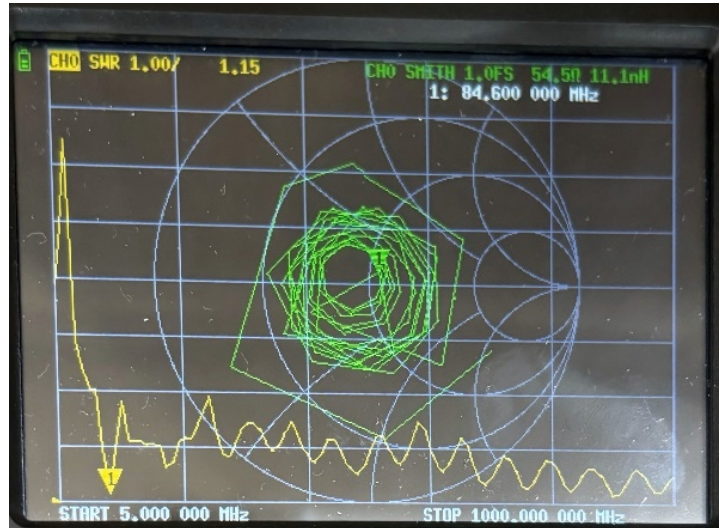


図 19 傘型アンテナ 2 の特性

## 5. 今後の展望、ミッションの独創性

傘で LWA アンテナを模倣することができ、改良した傘型アンテナでは広い周波数範囲で SWR が 1 に近いためアンテナとして十分に使用できることが分かった。折りたたみが可能なため、月面に運搬する際、より多くのアンテナを運搬することが可能となる。これらの実験データを活用して、電気的特性が良く強度や耐熱性などにも優れているアンテナを開発し、将来的に月面で使用できるアンテナを製作したい。

ミッションの独創性としては、月の裏側に着目しクレーターの中での電波天文台の構築を考案したことである。電離層がなく地球の人工電波からの影響が少なく、動物や災害などの外的要因による影響などがない月面では、地球よりも長期的な観測を続けることができると考える。

クレーターの中は比較的高低差が少ないためアンテナを設置するのに最適であると考えた。複数のクレーターの中にそれぞれ電波天文台を構築することで同時に別方向の観測が可能であるため、宇宙の電波観測に多くの研究者が参加することが可能となり、宇宙の起源の解明や地球外文明からの電波の発見に繋がっていくと考えている。

## 6. 参考文献

Long Wavelength Array Active Crossed-Dipole Antenna

LWA Active Crossed-Dipole Antenna (reeve.com)

アメリカ企業の無人船「オディシウス」、月面着陸に成功 民間初 BBC NEWS JAPAN

<https://00m.in/fpwcv> (短縮 URL)

うみへび座銀河団で謎の電波放射を発見 国立天文台水沢

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2024/20240408-mizusawa.html>

標高で色分けした月の表と裏の地形マップ astropics

<https://astropics.bookbright.co.jp/lunar-topography>

「次期月探査計画」科学観測提案(1999. 10. 16 案) 近藤哲朗 通信総合研究所鹿島宇宙通信センター

[https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/moon-lowf/teian\\_oct1999.html](https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/moon-lowf/teian_oct1999.html)