

月面電波天文台「すぶりんぐはずかむ〜ん」

高知工業高等専門学校

電気工学科

久保 洋晶

今井 雅文

中田 祐樹

専攻科

東 純平

指導教員

今井 一雅

1. ミッションの目的

低周波の宇宙電波は、太陽をはじめとする太陽系内惑星の電磁現象や超新星爆発以降の星の物理状態など、宇宙で起こる様々な現象をあらわしていると考えられており、宇宙の様々な謎を解明するために必要不可欠なものである。

低周波における高感度の宇宙電波の観測を行うことは、地球上では電離層の影響で 15MHz 以下の電波の観測は不可能であり、地球周回軌道においても地球からの電波雑音の影響を受けることなどから困難とされてきた。しかし、月は地球から近く、電離層も希薄であり、その裏側では、地球からの電波雑音の影響も受けず、低周波の宇宙電波の観測をすることが可能である。また、月面上であるため安定した観測を行うことができる。

今回のミッションでは、月の裏側での安定した低周波宇宙電波の観測を行う月面電波天文台システムを提案する。本来であれば、実際に月に人を送り、電波観測を行うべきであるが、実際に人が月面で、長期間にわたり電波観測を行うためには、月面基地を建設するところから始める必要があり、実現させるためには多大なコストや技術力が要求されるからである。

そこで我々は、人の手を借りず、自動で電波観測用アンテナ等を展開し、電波観測を行い、観測したデータを中継衛星を介して地球上に送る、無人の月面宇宙電波観測システムを検討し、月面での観測を低周波宇宙電波観測の新境地にすることを提案する。

今回のミッションでは、低周波の宇宙電波観測用のアンテナとして、一般的に用いられているダイポールアンテナではなく、より広帯域の電波を観測することができるログスパイラルアンテナを用いることにした。

2. ミッションの概要

観測用のログスパイラルアンテナをローバーから月面に展開する際、インフレータブル機構を使うことで安定したアンテナ展開を行う。

月の裏側は地球から見ることでできない場所であるため、月の裏側にあるローバーと直接通信をすることができない。そこで、月から 61,500km 離れた位置にある、地球-月系のラグランジュポイントの L2 を中心としたハロー軌道に中継衛星を設置し、この中継衛星を介し、月の裏側に展開したログスパイラルアンテナで観測したデータを地上局へ送る。

月面ローバーは、低周波宇宙電波を観測するログスパイラルアンテナ 8 基(左旋円偏波観測用 4 基、右旋円偏波観測用 4 基)、アンテナの展開状況を確認するカメラ、観測データを中継衛星に送信する送信機器、ローバーへの電力供給システム (①中継衛星で発電した電力を送電するマイクロ波送電又は

②ローバーで太陽電池パネルを広げて発電する太陽光発電システム) で構成している。

地上局は、中継衛星から送られたデータを受信するためのパラボラアンテナと、観測データを中央サーバに送るシステムで構成されている。データを受信するパラボラアンテナは、リアルタイムで中継衛星と通信できるように、地球上に複数設置する。また、中央サーバに送るシステムは、受信局で一時的に保存し、専用回線を通して中央サーバに送信する。この観測データを解析することで低周波の宇宙電波の新しい研究が可能となる。

3. システムの概要

3.1 ミッション全体について

図1にこのミッション全体のシステム概要図を示す。

このシステムは、地球-月系のラグランジュポイントのL2を中心とするハロー軌道上で活動する中継衛星と月面上で活動し月面低周波電波天文台となるローバーで構成されている。

観測データは、中継衛星を介し地球上の地上局へ送られる。

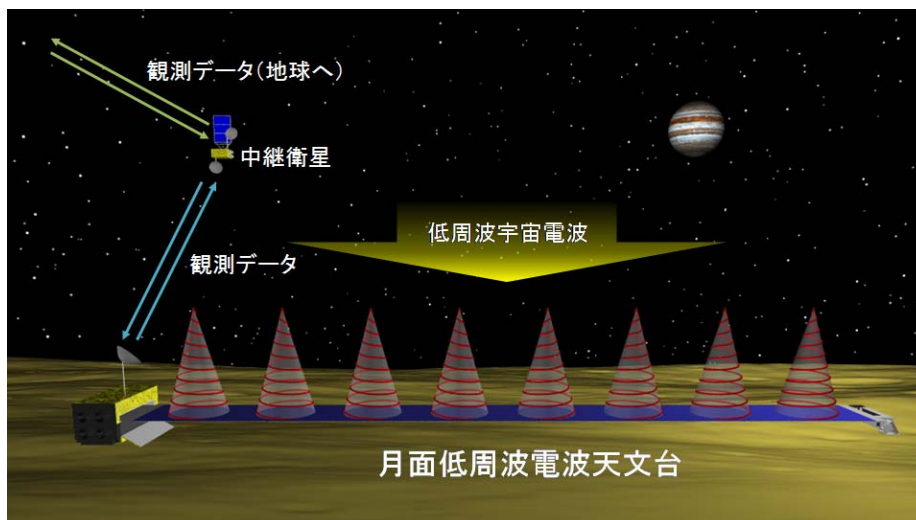


図 1 システム概要図

3.2 月面ローバーのシステム

図2、図3に月面にローバーを設置した様子を示す。

月面ローバーは、搭載されているログスパイラルアンテナのレイで低周波の宇宙電波を観測し、中継衛星を介して観測データを地球上の地上局へ送信する。

月面ローバーの本体部分は、二段構造になっており、上段部にデータ送信機器や通信用アンテナを収納している。下段部には、ロール状にログスパイラルアンテナを収納している。着陸後、アンテナが取り付けられたシートを展開する。その後、ガスを各アンテナのインフレータブル機構へ注入し、アンテナを展開する。

展開後、中継衛星に向けパイロット信号を送信する。通信テストや機器の初期チェックを兼ねて展開後のアンテナの様子を撮影した写真を中継衛星を介して地上局へ送る。初期チェック後、運用に入る。アンテナは、フロリダ大学にあるログスパイラルアレイアンテナ(図4)を基に設計し、ベース幅:7m、高さ:10mとした。アンテナは全部で8基設置し、4基を左旋円偏波観測用、残りの4基を右旋円偏波観測用アンテナとする。このようなアンテナを収納し、観測機器等を搭載するため、ローバーの大きさは3.5m×3.5m×9mの直方体形となる。

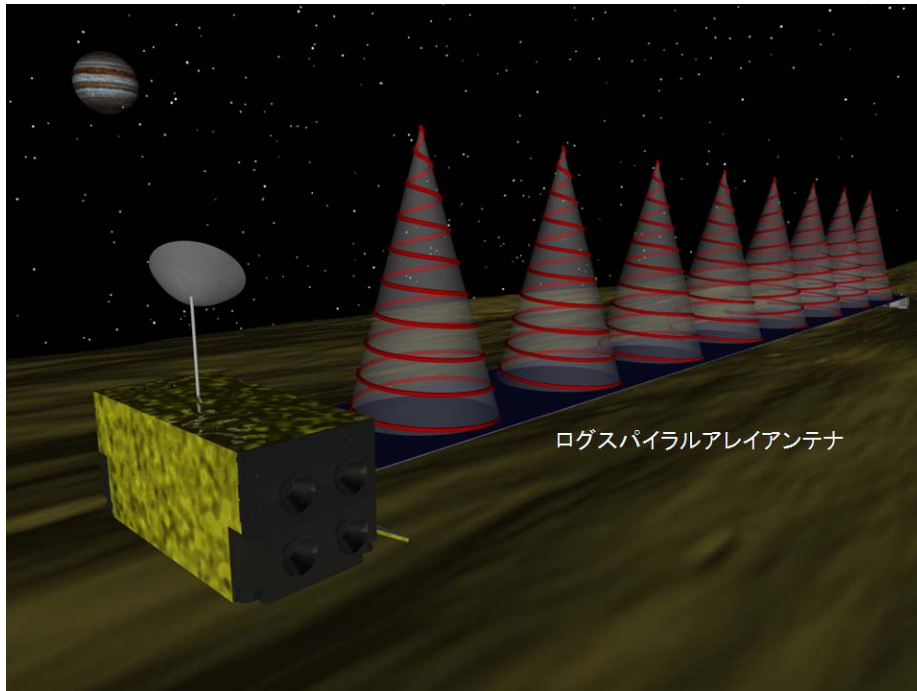


図 2 月面に設置したローバー

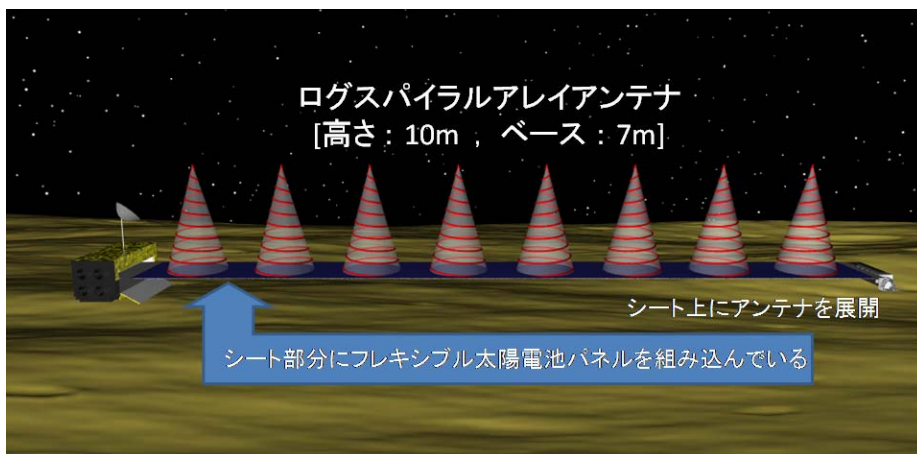


図 3 月面ローバーの概要図



図 4 フロリダ大学のログスパイラルアンテナ

3.3 中継衛星のシステム

中継衛星は、ローバーからの観測データを地球へ中継したり地球からの指示をローバーへ中継したりする。中継衛星は地球上の地上局と月面ローバー双方で常時通信を行える状態である必要がある。そのため、地球と月の裏側両方から常に見ることができ、地球-月系のラグランジュポイントのL2を中心とするハロー軌道上で活動することが望ましいと考えられる。ハロー軌道に設置した中継衛星及び地球と月間の物理的位置関係を図5に示す。

①マイクロ波送電システムを用いる場合、中継衛星に搭載する太陽電池パネル(1枚あたり 2m^2)は288枚で、最大で288kWの発電電力を確保する。打ち上げ時の中継衛星の大きさは、 $4\text{m}\times 4\text{m}\times 2\text{m}$ の直方体である。②ローバーでの太陽光発電システムを用いる場合、中継衛星に搭載する太陽電池パネル(1枚あたり 2m^2)は3枚で、最大で3kWの発電電力を確保する。打ち上げ時の中継衛星の大きさは、 $1\text{m}\times 2\text{m}\times 1.5\text{m}$ の直方体である。

月面電波観測システムで低周波の宇宙電波を観測する流れとしては、本体から切り離された中継衛星は搭載しているブースターを使い、ハロー軌道に向かう。軌道投入後、太陽電池パネルや通信用のアンテナを展開し、地上局と月面ローバーからのパイロット信号を待つ。パイロット信号を受信した後、月面ローバーから送られてきたアンテナ展開後の様子を写した写真を地上局へ中継し、通信チェックと機器の初期チェックを行う。初期チェック完了後、運用に入る。

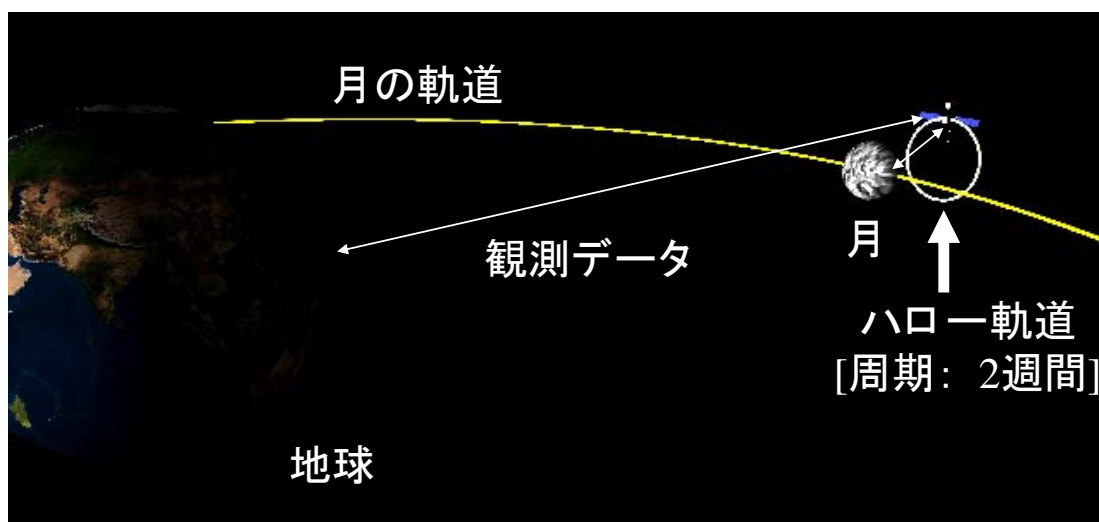


図5 中継衛星と地球や月との位置関係

3.4 ロールケーキ型収納方式

ロールケーキ型収納方式とは、シートに取り付けた多数のログスパイラルアンテナをロール状に丸め、ローバーの本体の中に収納する方式である。ログスパイラルアンテナは、対数螺旋状に巻かれたアンテナ線で成り立っているため、縦方向に縮めればアンテナに用いる線、1本分の厚さになり、非常に薄くなる。この特徴を生かすと、縦方向に縮めた後、ロール状に巻くことができる。この方式を用いることで多くのログスパイラルアンテナをコンパクトにまとめることができる。また、均等な間隔で収納することができるため、アンテナ間の干渉が起きにくくなるというメリットがある。今回のミッションではこの方式を用いることで、長さ70m、幅7mのシートを高さ1.4m、幅7mの円筒状にまとめることができた。

3.5 ローバーへの電力供給システム

3.5.1 マイクロ波送電の場合

ローバーに電力を供給する方法として、中継衛星の太陽電池パネルで発電した電力をマイクロ波送電により、ローバーに電力を送ることを検討した。マイクロ波送電のメリットは、太陽の当たる昼間しか発電できない太陽光発電と比べ、夜でも電力を供給できることである。

提案する中継衛星の送信アンテナには、集積回路と平面アンテナとを一体化させたアクティブ集積アンテナを、ローバーの受信アンテナには、円形マイクロストリップパッチアンテナの表面にスリットを入れたアンテナを用いることを検討した。これは、太陽発電衛星 SPS2000 の技術で用いられようとしている技術である。

今回のミッションでは、ハロー軌道上にいる中継衛星から 61,500km 離れた月面にいるローバーに 100W の電力を送ることである。また、ローバーの受信アンテナは、観測アンテナと一緒に展開する。この受信アンテナの面積は 60m×7m である。SPS2000 で使用される予定の周波数 2.45GHz を用いた場合、中継衛星のアンテナの直径は約 6km で、ローバーに 100W の電力を供給できると推測される。また、今後マイクロ波送電で使われる可能性のある周波数 5.8GHz を用いた場合、中継衛星のアンテナの直径は約 2.6km にすることができる。この方法では、中継衛星とローバーとの間のエネルギー変換効率は約 0.035%となる。

3.5.2 太陽光発電システムの場合

ローバーのアンテナを展開したシート上にフレキシブルな太陽光パネルを敷き詰めることで、昼間に発電し、ローバーに搭載された電気二重層キャパシタに蓄電する。このフレキシブルな太陽光パネルは a-Si/a-SiGe タンデム構造で、トップセルとしてアモルファスシリコン太陽電池を、ボトムセルとしてアモルファスシリコンゲルマニウム太陽電池とする 2 層構造になっている。この太陽光パネルは SCAF (Series-Connection through Aperture Formed on Film Substrate) 構造と呼ばれる直列接続構造を採用している。また、紫外線などが与える影響への対策として、太陽光パネルにフッ素系フィルムの ETFE (Ethylene Tetrafluorethylene) を採用しているため耐久性に優れている。太陽の当たる昼間に月面で 200W の電力を発電し、電波観測用にローバーへ 100W 供給し、残りの電力 100W は電気二重層キャパシタへ蓄電する。夜間観測時には、昼間に蓄電した電気二重層キャパシタから電力をローバーに供給する。このシステムでは、単位モジュール (68 セル) 当たりの最大電力が 12W で、面積は 253mm×900mm である。これより、ローバーのシート上に単位モジュールを 18 個 (面積 4.1m²) のせれば良いことになる。

3.5.3 太陽光発電システムの採用

今回、ローバーへの電力供給方法として、中継衛星で発電した電力を送電するマイクロ波送電とローバーに太陽電池パネルを広げて発電する太陽光発電システムについて比較・検討を行った。周波数 2.45GHz でマイクロ波送電を行った場合、中継衛星ーローバー間のエネルギー効率が約 0.035%となる。これより、エネルギー効率を上げるためには送電する周波数を高くする必要があることが分かった。

一方、太陽光発電システムの場合、ローバーのシート上に太陽電池パネルを広げ、電力をマイクロ波送電より容易に確保できる。これらの条件より、ローバーへの電力供給方法として、太陽光発電システムを採用することにした。

3.6 打ち上げから月面への軟着陸までの流れ

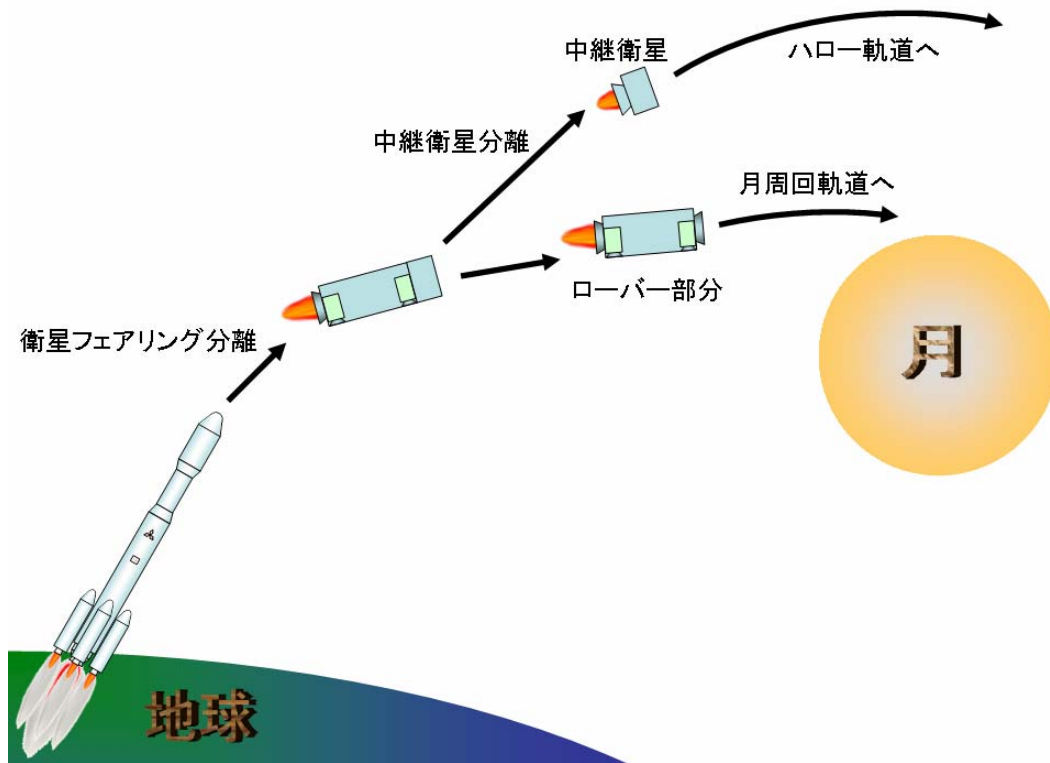


図 6 打ち上げから衛星分離まで

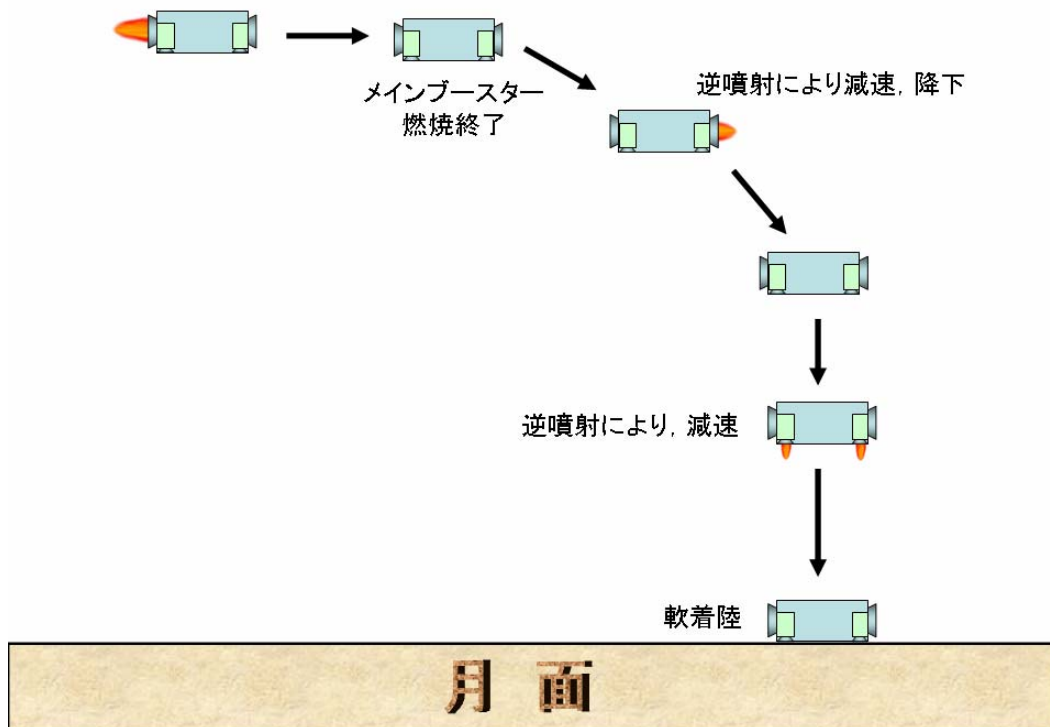


図 7 軟着陸の様子

図 6, 図 7 に打ち上げから, 月面への軟着陸の流れを示す.

打ち上げは, 現在 JAXA で開発中の H-II B ロケットを用いて行うことを考えている. あるいは, NASA の開発中ロケットであるアレス V を用いれば打ち上げることが可能になると考えている. 打ち上げ後, 月の極周回軌道に向かい, 中継衛星を分離する. 分離後, 中継衛星は地球-月系のラグランジュポイントの L2 を中心とするハロー軌道に向かう. 月面ローバーは, 月の裏側に向かい, 赤道付近に軟着陸する.

4. まとめ

本ミッションで得られる一番大きな成果は, 地球上や地球周回軌道上では観測することが不可能な低周波の宇宙電波の観測を, 広帯域の観測が可能なログスパイラルアンテナを用い, 月面で観測を行うことによって可能にすることである. 低周波の宇宙電波は, 太陽をはじめとする太陽系内惑星の電磁現象や超新星爆発以降の星の物理状態など, 宇宙で起こる様々な現象をあらわしていると考えられている. 低周波の宇宙電波の観測が可能になることで, 宇宙の初期構造など数々の宇宙に関する謎の解明につながり, 宇宙物理学の発展に貢献できると期待される.

参考文献

- [1] 月面低周波電波天文研究会 (LLFAST) : LLFAST 中間報告資料
- [2] フロリダ大学・UFRO Online : <http://ufro1.astro.ufl.edu/observatory.htm>
- [3] Neil J. Cornish : derivation of Lagrange's result
<http://map.gsfc.nasa.gov/ContentMedia/lagrange.pdf>
- [4] 宇宙科学研究報告 特集 第 43 号 太陽発電衛星 SPS2000 研究成果報告 :
<http://www.isas.ac.jp/publications/hokokuSP/hokokuSP43/hokokuSP43.pdf>
- [5] 月周回衛星「かぐや」 : http://www.selene.jaxa.jp/index_j.htm
- [6] フィルムタイプ フレキシブル太陽電池 :
<http://www.fesys.co.jp/sougou/seihin/fwave/index.html>