

木星電波観測システム LIMITLESS

一月面裏側における木星電波観測プロジェクトー

高知工業高等専門学校 電気情報工学科

島内 良章 森國 健吾 南 光成

指導教員 今井 一雅

1. ミッションの背景・目的

木星は太陽系最大の惑星で、地球から約 6 億 3000 万 km 離れており、自ら強い電波を出すなど、太陽系内で大変強い影響力を持っている。

木星から発生する最も強い電波（木星デカメートル電波）は、木星の自然エネルギーによって発生する。この木星から自然に放射される電波は、驚くべきことに地球でも強力に受信することができる。しかしながら、人工電波や地球の電離層の影響のため、地球からの電波観測には様々な制約がある。

近年、小型ロケットのイプシロンロケットの開発により、従来と異なって人工衛星を打ち上げることが容易に行えるようになってきた。そこで本ミッションでは小型ロケットを用いて、木星電波を観測するのに最適といえる月面裏側へ着陸機を着陸させ、月のラグランジュポイント L2 のハロー軌道に中継衛星を配置する。これはイプシロンロケット初の月着陸機を打ち上げる点において、新しい方向性を目指すことのできるミッションとなる。

このような新しい観測により、木星電波の放射機構の解明をめざすことができ、宇宙プラズマ物理の理解を深め、将来の地球のエネルギー問題を解決するための手がかりを得ることを目的とする。

なお、私達は、木星電波の謎の解明に限りは無いという意味を込めて、このミッションに「木星電波観測システム LIMITLESS」という名前を付けた。

2. ミッションの概要

「木星電波観測システム LIMITLESS」(図 1) は木星電波観測システムを搭載した着陸機と中継衛星を積んだイプシロンロケットを打ち上げ、着陸機と中継衛星を一緒に連結して、地球スイングバイによる加速を行いながら月の軌道まで到達させる。そこで着陸機と中継衛星を切り離し、着陸機は木星電波を観測するのに最適な月面裏側に着地させる。また中継衛星はラグランジュポイント L2 を周回するハロー軌道に投下する。

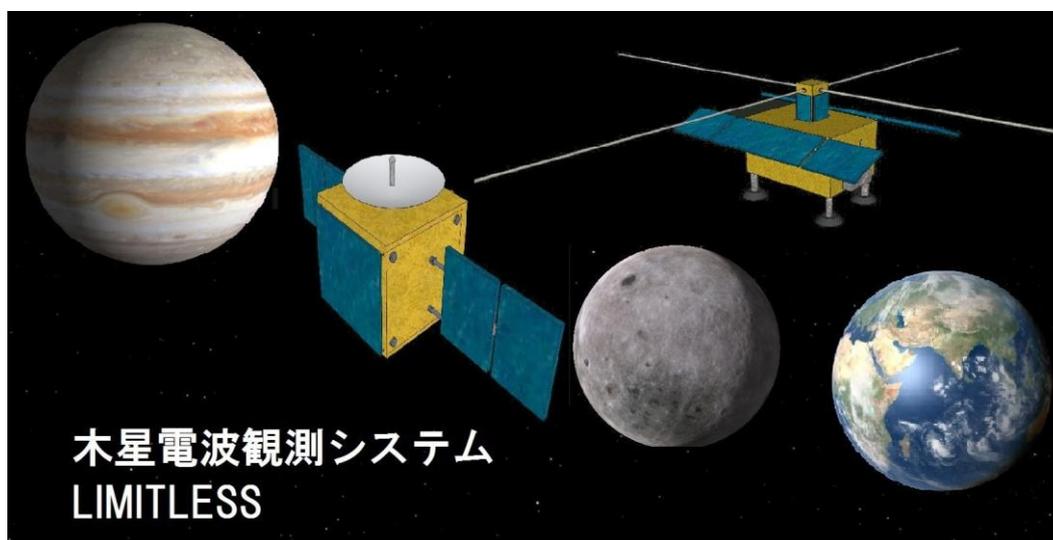


図 1 木星電波観測システム LIMITLESS

3. ミッションの設計

3.1 木星電波について

木星から自然に放射されるバースト状の電波は、地球でも強力に受信することができる。この木星電波は 1955 年に、アメリカのワシントン DC の郊外に位置するカーネギー研究所の宇宙電波観測所で「かに星雲」からの電波を観測中に偶然発見されたものである。観測周波数は短波帯（デカメートル波）の 22MHz で、ミルスクロス・アンテナという大型電波望遠鏡で観測されたデータに、突発的に現れるバースト状の謎の電波が観測された。この電波は、その年偶然「かに星雲」の近くにあった木星からの電波であることがデータ解析の結果、明らかとなった[1]。

木星電波の放射機構を説明するためにさまざまなモデルが提唱されている。図 2 はモジュレーション・レーン法に基づいたコニカルシート状のビーム構造のモデル図である[1,2]。我々は木星電波観測データのダイナミックスペクトラムを解析することによって電波放射の仕組みをモデルで説明したいと考える。また地上 VLBI 観測によって電波源の大きさが上限 1000km とされている[2]が、後述のスペース VLBI によって、分解能を遥かに高くし、木星電波源の大きさを解明したい。

この木星電波放射のエネルギーは強力であり、効率の良いエネルギー変換メカニズムが働いていると考えることができる。メカニズムを解明することは、人類にとって役に立つものであると考える。

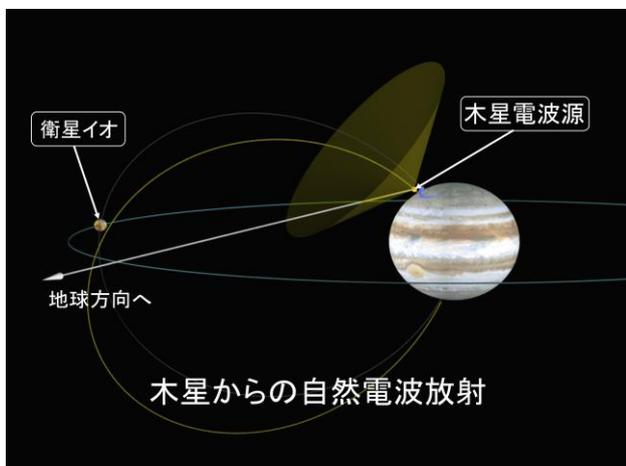


図 2 木星電波のコニカルシート状のビーム構造

3.2 月面裏側における電波観測について

月面は、木星電波を観測するのに最適な環境だといえる。月面の裏側に観測システムを着陸させ、木星電波の観測をする。なぜ月面裏側で観測をするのか、その理由として月面裏側での電波観測による利点を挙げる[3]。

- 地球の人工電波の影響を受けない
- 地上波無線周波数干渉を受けない
- 地球近傍の空間の中で最も電波が静かな場所
- 電離層が希薄であるため、低周波の電波観測が可能

以上のことから、月は遮へい板のような働きをしていると考えることができる。よって、月面の裏側が木星の電波観測において優れた環境であるといえる。

また、月面裏側で観測できることは、長時間の時間積分を可能とし、今まで発見することができなかった弱い電波成分の検出も可能となる。

3.3 地球と月の間でのスペース VLBI の実現

VLBI (Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干渉計) は、遠く離れた天体から放射される電波を、複数のアンテナで同時に受信し、観測データの A/D 変換を経て、原子時計で記録された時間情報を観測データに付加して保存する[4]。

月のスペースと地球上の観測地点の木星電波観測データを相関処理することによって木星の詳細な構造、電波源の大きさを解明することができるシステムとなる。具体的には、木星電波観測システムの着陸機に小型原子時計を搭載し、その観測データと地球上の木星電波観測点である図 3 の VLBI 観測点のデータと相関処理を行う。



図 3 世界規模の VLBI ネットワーク

スペース VLBI において基線を長くすることで分解能が高くなる。地球上での最大分解能は約 1000km とされている[2]が、地球と月の間でのスペース VLBI を実現することによって、約 20km の最大分解能を実現することができる。これによって、最大分解能が約 20km の干渉パターンを用いて電波源の空間的な情報を得ることが可能となる。

分解能が約 20km という試算は図 4 の式を用いて計算した。木星電波の観測周波数は 22MHz であるため、光速との関係を用い波長 λ は 13.63[m] と計算できる。基線 B は地球と月の距離 3.84×10^5 [km] で、地球と木星の距離 6.39×10^8 [km] (公転しているため一定ではない) を用いて下の図 4 の中の式を用いると、22[km] となる。もちろん理論上であり、木星も公転しているため、基線長の変化は若干あるが、最大分解能約 20[km] を実現は実現可能である。

角度 $\theta = \frac{\lambda}{B}$ [rad] 分解能 $\tan^{-1} \theta \times \text{底辺}$

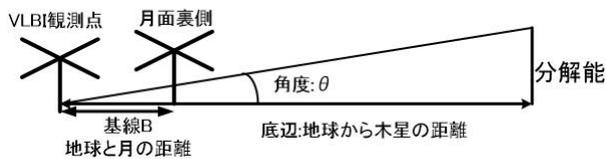


図 4 VLBI の概要図

3.4 システム概要

木星電波観測システムの観測データのやり取りの概略を図 5 に示す。着陸機が受信した木星電波のデータは中継衛星を経て地上に送信される。そのデータと地上観測局(VLBI 観測)のデータを相関処理させ解析を進めることになる。

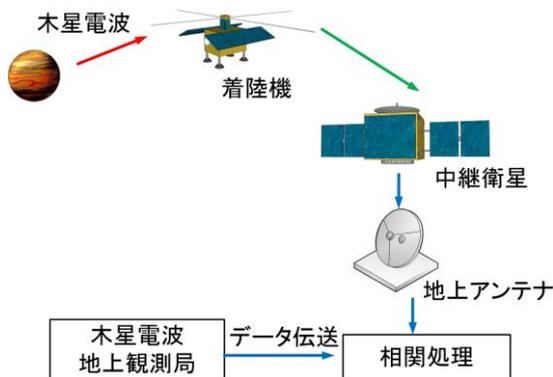


図 5 観測データの処理

木星電波観測システムの中継衛星と着陸機の概要を以下に示す。

●中継衛星

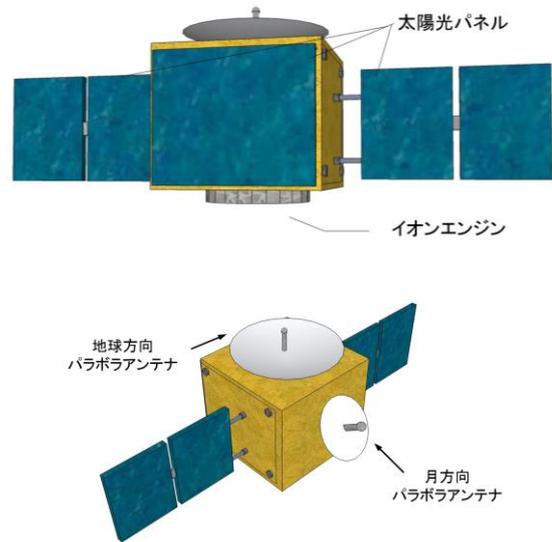


図 6 中継衛星

表 1 中継衛星の性能目標

サイズ	W1000×D1000×H2000[mm]	
質量	衛星全体	280kg
	衛星内訳	電源:30kg 通信・データ処理系:10kg 姿勢制御系:60kg 太陽光パネル:20kg 構造系:40kg ミッション系:20kg 燃料系:100kg
軌道	ハロー軌道(L2)	
姿勢制御	三軸姿勢制御 (コントロールド・バイアスモーメント方式)	
通信バンド	Xバンド	
ビットレート	1.4Mbps	
二次電池	宇宙用リチウムイオン二次電池	
主要ミッション機器	太陽光パネル、姿勢制御系、着陸機からのデータ受信機、燃料エンジン、地球へのデータ送信機	

● 着陸機

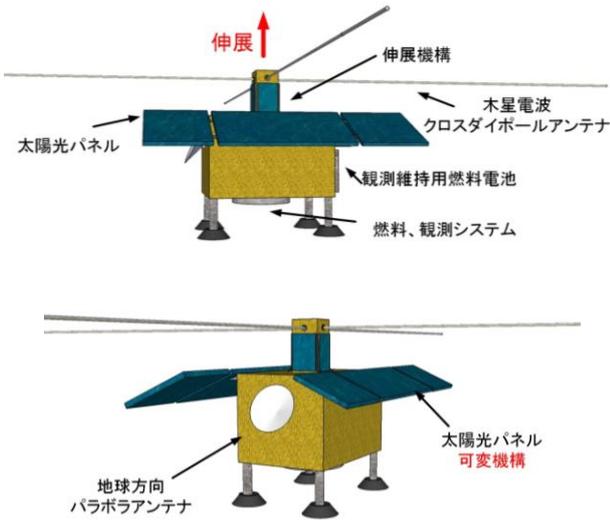


図7 月着陸機

表2 月着陸機の性能目標

サイズ	W1000×D1000×H1400[mm]	
質量	機器全体	400kg
	機器内訳	電源:30kg 通信・データ処理系:10kg 姿勢制御系:30kg 太陽光パネル:30kg 構造系:30kg ミッション系:20kg 化学燃料:250kg
通信バンド	Xバンド	
ビットレート	300kbps	
データ記録容量	400GB (SSD)	
二次電池	宇宙用リチウムイオン二次電池 (約 13Ah)	
主要ミッション機器	木星電波受信用クロスダイポールアンテナ(全長 7.5m/観測周波数 20MHz)、木星電波受信装置、太陽光パネル、水素燃料エンジン、地球との VLBI に用いる小型原子時計	

図8に木星電波受信装置の概略を示す。アンテナから電波を電気信号に変え、アンプで増幅し、木星電波の周波数(20MHz~25MHz)に観測対象を絞るため周波数フィルタリングを行う。そのデータ A/D 変換し、時間情報を付記する。そして着陸機のデータ記録装置に格納するとともに、中継衛星を通して地上局に観測データを送信する。

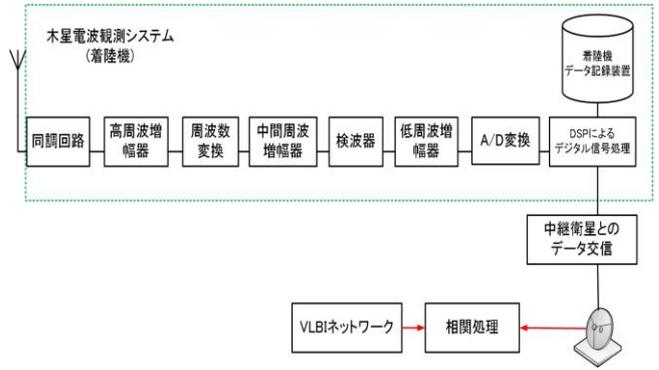


図8 受信機の構成

表3には木星電波を受信する際に必要な構成部品を示す。この試算は LLFAST の文献を参考にした[2]。

表3 木星電波観測システムの主要構成部品と仕様

要素	内訳	重量 [kg]	電力 [W]	備考
アンテナ部	ダイポールアンテナ	7	11	伸展時に電力発生
アナログ処理部	増幅器など	1	0.8	観測時に電力発生
デジタル処理部	FPGA など	1	2.1	
データレコーダ	SSD	0.2	0.9	
周波数標準		1	2.5~10	起動時に約 10W 以降は 3W 程度を想定
合計		重量: 10.2kg	電力: 11W(伸展時) 10W~20W	

表3の主要構成品については熱耐久試験なども考慮する必要があり、さらなる構成品の検討が不可欠である。

3.5 姿勢制御

中継衛星の姿勢制御に三軸制御方式のコントロール・バイアスモーメンタム方式を用いる。

まず、三軸制御方式を用いた理由としては衛星の形状や搭載機器の配置、アンテナの形状に関して自由度が大きく、また大電力の発生が可能であるといった利点があるからである。

図9のコントロール・バイアスモーメンタム方式は軌道面に垂直な軸に取り付けた比較的大型のモーメンタムホイールと呼ばれる大型のコマを常に高速で回転させて、その回転によって大きな角運動量を獲ることによって衛星の主軸を安定させ、他の二軸には小型のホイールを用いて通常のバイアスモーメンタム方式と比べより精度が高い方式である[5]。

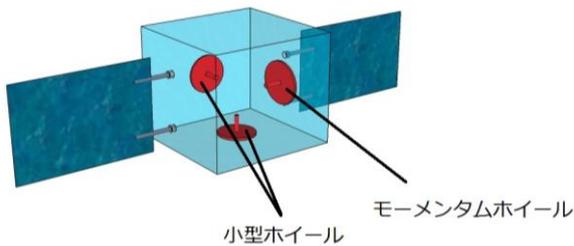


図9 コントロール・バイアスモーメンタム方式

3.6 着陸機に搭載するアンテナ

着陸機の中継衛星用には低利得アンテナを用いる。低利得アンテナは通信速度が低く、一度に送れる情報量が限られるが、高利得アンテナのように正確に中継衛星の方向に向く必要がないためエネルギーの無駄を省くことができる。そして木星電波観測用のクロスダイポールアンテナを用いることによって指向性を上向きにとるようになる。

木星電波受信用クロスダイポールアンテナ(図10)は全長7.5mの観測周波数20MHzのものを使用する。全長7.5mの半分にあたる3.75mは観測周波数20MHzにおける波長の4分の1に相当す

る。波長の4分の1にすることによって大きな電気信号(電波)を得ることを考える。アンテナの理想的な反射係数は-1.0であるので、入射波と反射波が重なり合う。その時、一番大きな電気信号得ることができる波長は4分の1にあたる。

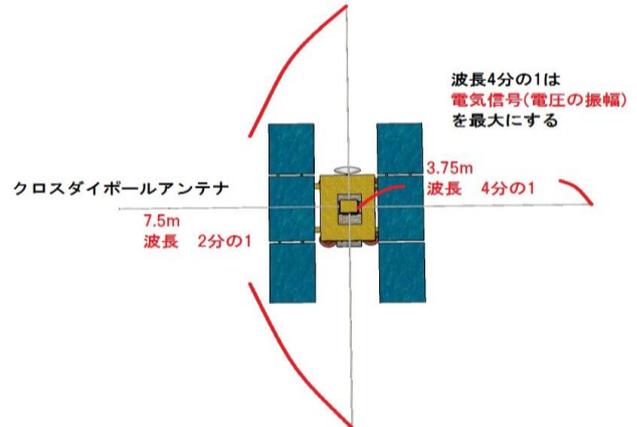


図10 木星電波クロスダイポールアンテナ

3.7 中継衛星に搭載するアンテナ

図11に示すように、中継衛星には月面裏側から木星電波の観測データを受信するためのパラボラアンテナ(直径50cm)を取り付ける。

中継衛星の軌道はL2のハロー軌道であるため、衛星から月には近いが地球には遠い。よって地球にデータを送るためのパラボラアンテナは、直径1mのものを採用した。

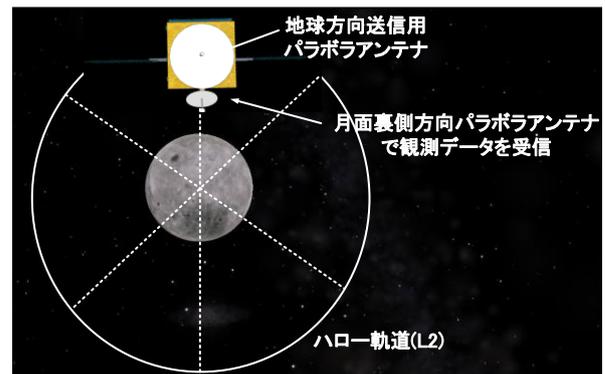


図11 地球から見た中継衛星とそのアンテナ

3.8 打ち上げロケット

着陸機・中継衛星を打ち上げるためには、それに対応したロケットが必要となる。日本の固体ロケットの開発の流れを表4に示す。表3より打ち上げロケットには打ち上げ能力が大きく、全重量が比較的軽いものが要求されることがわかる。

表4 打ち上げロケットの比較

ロケット	M-3S	M-3S II	M-V	イプシロン
最初に打ち上げた年	1980	1985	1997	2013
全長(m)	23.8	27.8	30.7	24.4
直径(m)	1.41	1.41	2.5	2.5
全重量(t)	48.7	61	139	91
打ち上げ能力(kg)	300	770	1800	1200

2006年に終了した固体ロケットでは世界最高性能のM-Vロケットに変わり、イプシロンロケットが新たに開発された。イプシロンロケットは従来の打ち上げロケットより安価であるため、限られた日本の宇宙開発予算で打ち上げることが可能である。

またイプシロンロケットを用いることによる利点を以下に挙げる。

- ① PBS(ポスト・ブースト・ステージ)という軌道調整専用の小型液体燃料ロケットをオプションとして搭載することにより、衛星側の負担を軽減している。
- ② 搭載電子機器の信号接続をLANに置き換え軽量化を図り、各搭載機器を自立的に整備・点検をネットワーク経由でノートパソコン一台を用いて管理できるモバイル管制を実現した。
- ③ M-Vロケットの固体ロケットシステム技術を改良し、大型のH-IIAロケットとの機器・部品を共通化することにより開発・製造・打ち上げ費用を大幅に削減することができる。

小型衛星打上げ用に計画されているイプシロンロケットは地球周回軌道のオプション形態のペイロード(約700kg)を搭載することができる[6]。小型液体推進系を用いることによって月面着陸の精度が上げることができるため月惑星ミッションに挑戦することが十分に可能である。

3.9 軌道設計と着陸

打ち上げた後、地球スイングバイを幾度か行って加速させることによって、月の軌道まで到達させる。スイングバイを利用することで燃料の消費を防ぐことができる。そして月の軌道上で中継衛星と着陸機を切り離す。ラグランジュポイントL2を周回するハロー軌道に中継衛星を投下する。また月面裏側に電波観測システムの着陸機を着陸させるため月周回軌道に投下する(図12参照)。

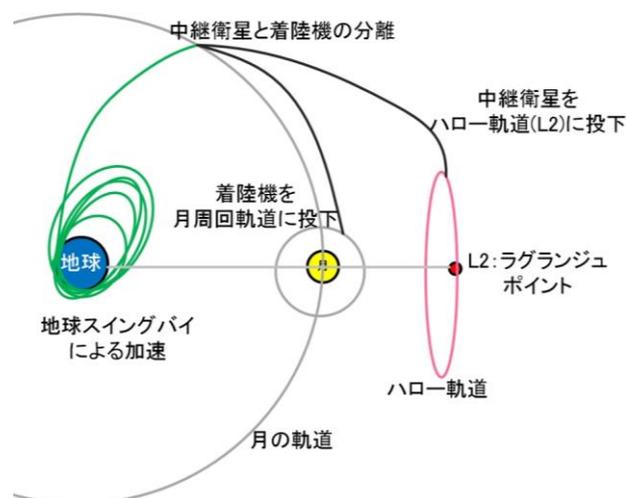


図12 軌道設計

月着陸は容易ではないためかなりの精度が要求される。特に逆噴射でのコントロールによって着陸を試みる必要がある。従って大量の燃料を用いるため衛星設計のサイズをコンパクトにする必要がある。

月周回軌道に投入後、着陸機は図13のように円軌道を描いて動く。着陸は円軌道に接し、月面にもほぼ接するような楕円軌道に遷移することで着陸することができる。

私達は月周回軌道の平均高度である約310kmより低い200kmを遠月点とし減速することにより、月に着陸させることを考えた。遠月点から近月点に接するためには円速度に逆らって噴射(逆噴射)する必要がある。また近月面に到達すると今までの速度の方向とは逆に噴射して速度ベクトルの合成を0にすることで、月面に着陸させることができる。

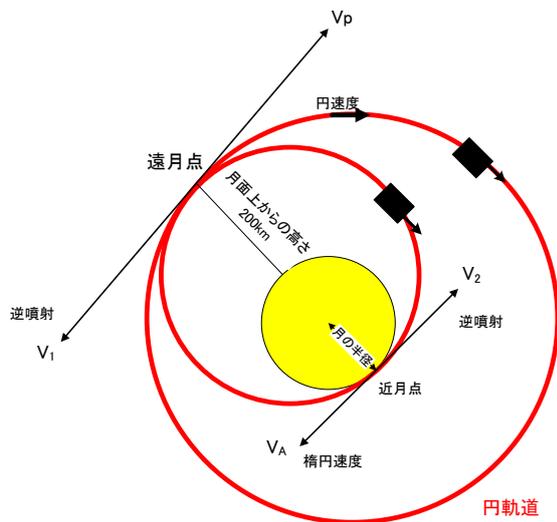


図 13 月面着陸

ここで月の半径と質量からそれぞれの速度を求める。この軌道上の円速度を文献[7]に従い 1.584km/s とすると遠月点での V_p は 1.542km/s となる必要があるので、 V_1 で 0.042km/s の速度で逆噴射する必要がある。速度 V_p を与える(逆噴射して円速度を小さくする)と近月点に接する軌道に降下する。また近月面から着陸するためには $V_A=1.719\text{km/s}$ で円軌道を描いているため同じ速度の大きさを逆に噴射することで月面に軟着陸することができる。

着陸機の逆噴射に用いる燃料として過酸化水素を考えた。過酸化水素は自己分解を起こす推進剤を触媒等で分解する。よって推進剤にプラスして酸化剤を搭載する必要がない。過酸化水素水の反応式 $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ で発熱反応を起こす。この発熱反応を燃料に使う。反応式の右辺に注目すると水と酸素が発生するということがわかるため、無害である。よって宇宙に毒性がある物質を拡散しないためにも有効ではないかと考えた。

4. まとめ

本ミッションは、究極の観測場所である月面裏側に、木星電波観測システムを搭載した着陸機を着陸させる。また、地球に観測データを送信するために L2 のハロー軌道に中継衛星を配置した。これにより、地球の人工電波や電離層の影響を受けない月面裏側で木星電波を観測することにより、

長時間の積分を可能とし、今まで発見ができなかった弱い電波成分の検出も可能となる。さらに、スペース VLBI で基線を長くとることによって、地上観測よりも遥かに高い分解能で木星電波源の大きさを測定することが可能となる。

この着陸機に木星電波観測用クロスダイポールアンテナを使用することによって、指向性を上向きにして木星電波を受信することができる。中継衛星にはパラボラアンテナを2つ取り付けることで地球方向と月面裏側方向の電波を送受信することができ、常に地球との通信を確保できるようにしている。

また、本ミッションで考えているイプシロンロケットによって、月着陸機を打ち上げることは、初の試みとなる。着陸する際の逆噴射は燃料を大量に使用するので、最適な燃料を積み込むことで月裏側に精度よく着陸させることが我々の提案であり、これらのことを考慮して衛星全体の設計を行った。

このミッションで木星の電波放射の謎の解明や、将来の本格的な月面裏側の電波天文台建設への第一歩としたい。

参考文献

- [1]今井一雅: 電波技術協会報 FORN **285** (2012) 30
- [2]SELENE-2 科学観測機器検討チーム: SELENE-2 科学観測機器 検討書 (2009) 第 12 章 低周波電波望遠鏡(LLFAST) 305
- [3]Mark Wiczorek: Science from the Farside of the Moon
- [4]高橋富士信、近藤哲明、高橋幸雄: VLBI 技術 (オーム社,1997)
- [5]宇宙情報センターJAXA <http://spaceinfo.jaxa.jp/>
- [6]JAXA ホームページ <http://www.jaxa.jp/>
- [7]虎尾正久:宇宙航行の数学 (森北出版,1970)
- [8]寺田博、松岡正敏、田中貴美恵、鶴飼千亜妃: NEC 技報 **64** (2011) 113