

# 月惑星探査を支える軌道計画と要素技術

寺田 博・松岡 正敏  
田中 貴美恵・鵜飼 千亜妃

## 要 旨

月惑星探査機の軌道計画は、地球周回衛星とは異なる技術が必要です。NECでは長期にわたり、現在の宇宙航空研究開発機構（JAXA）殿の協力の下、多くの月惑星探査機の軌道計画を担当しました。本稿では、軌道計画立案のための主要な要素技術の概要と、それを利用した各プロジェクトにおける軌道計画の特徴について報告します。

## キーワード

●軌道計画 ●月惑星探査機 ●スイングバイ ●ロンチウインドウ ●電気推進 ●惑星探査 ●月探査

## 1. はじめに

2010年6月13日小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰還し、大きな話題となりました。「はやぶさ」は地球帰還までに数々のアクシデントを乗り越えてきましたが、アクシデントが発生するたびに軌道計画を作り直す必要がありました。この軌道計画の見直しを短期間で的確に立案できたのは、1990年に打ち上げられた工学実験衛星「ひてん」以来、20年以上、月惑星探査機の軌道計画立案を行ってきた実績による経験と技術の積み重ねがあったからです。

また、月惑星探査機の軌道計画は、探査機のプロトタイプ設計の段階から、打ち上げ後のミッション終了までの長期間にわたり継続する、重要な役割でもあります。

## 2. 要素技術の概要

### (1) ロンチウインドウの設計

月惑星探査機は、当たり前ですが、地球以外の天体（月、火星など）を目標に打ち上げられます。目標とする天体も軌道運動をしているので、宇宙空間で目標天体と出会うタイミング、つまり、ランデブーのタイミングがずれてしまうと、再会には数カ月から数年待たなければなりません。そのためロンチウインドウ（ロケットを打ち上げる日時や方向）設計は、地球と目標天体の位置における時々刻々の変化も考慮して、高い精度で計算する必要があります。また、打ち上げ時刻も方向も、打上日ごとに変える必

要があるため、地球周回衛星に比べると非常に複雑になります。

図1は月への軌道を模式的に表した図です。ロケットは打ち上げられるといったんパーキング軌道と呼ばれる地球周回軌道に入ります。この時点でのロケットの速度方向ベクトルと地球中心で作られる面（パーキング軌道面）に到着時の月が無ければ、探査機は月に到達するのは難しくなります。図1は打ち上げ時刻が早すぎて、パーキング軌道面と到着時の月がずれていることを示していますが、地球の自転を利用してもう少し後で打ち上げるとパーキング軌道面

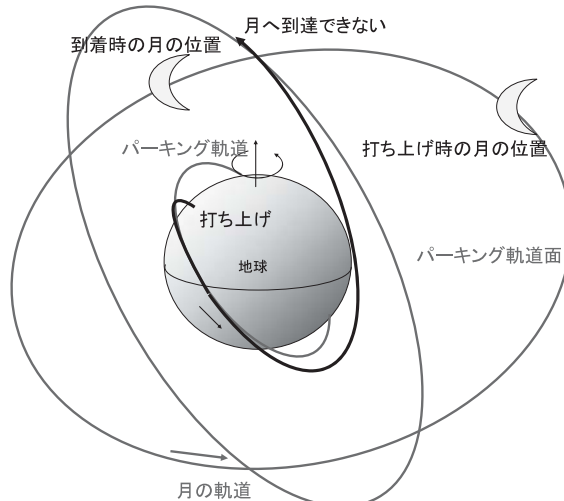


図1 ロンチウインドウの概念 (1)

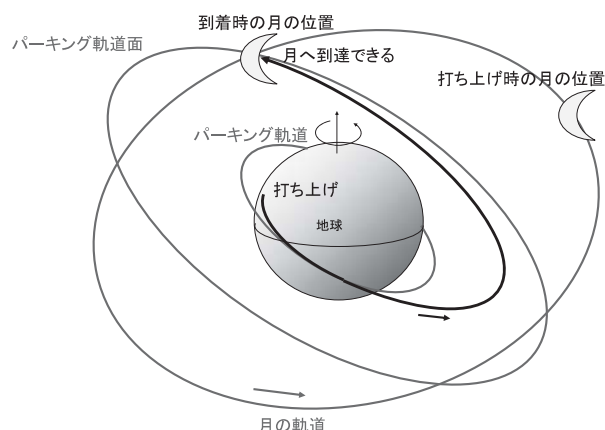


図2 ロンチウィンドウの概念 (2)

と到着時の月の位置が一致して月に到達できることが分かります（図2）。

実際には、月の軌道は楕円ですから、打ち上げ時刻が変われば到着までの時間も変わることも考慮しなければなりません。このようにロンチウィンドウの設計は、3次元の空間で時間軸も含めた4次元的な計算を行いながら設計していくことになります。

## (2) スイングバイ

スイングバイ（SWB）は、天体の重力と公転運動を利用して探査機の燃料を使わずに、探査機の軌道を変えることのできる技術です。SWBを複数回行い、増速や減速を繰り返し実施することで、目標軌道を長期間維持することもできます。

図3 では、遠地点が月付近にある軌道（周期14日程度）を1回目のSWB（増速）で周期40日程度の軌道に変換し、30数日後に月の軌道に戻ってくるときに2回目のSWB（減速）を行うことで、最初と同じような遠地点距離の軌道に戻しています。

この2回のSWBによって、地球から見た遠地点方向を数十度変えることができ、これに地球の公転による太陽方向の動きを同期させることで、探査機の遠地点を常に地球の夜側において、その領域の観測を長期間行うことが可能になります。また、SWB条件（最接近距離、角度）を変えることで、遠地点距離も変えることができます。一方、SWBを繰り返し行う場合には、2回目のSWBもできるように1回目

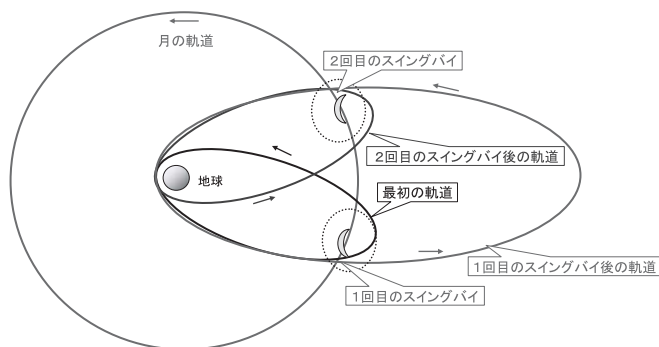


図3 二重月SWBの概念

のSWB条件を設計する必要があります。

このSWBを代表に、深宇宙では地球だけでなく、月や太陽、他の惑星も含めた重力を考慮しなければならず、単純なケプラー法則では正しく計算できないことが、月惑星探査機の軌道設計の特徴です。

## (3) 電気推進による軌道計画

電気推進系は化学推進系に比べて低推力でありながらも、10倍程度燃料効率が良いことが特徴です。

例えば、従来の化学推進系では100kg必要だった燃料が、10kgで済むといった具合です。重量制限が厳しい月惑星探査機にとっては、これは大変有利なことです。

一方、化学推進系の探査機では、必要なタイミングにインパルスの噴射で軌道変更が行えましたが、電気推進系の場合は同じ量の軌道変更を行うにも噴射が長時間に及ぶので、これが計算を難しくしています。他にも、地球との通信や電力のために姿勢や推力に制限が加わって、多数の制約条件の下での最適解を求めなければなりません。

## 3. プロジェクトの概要

NECでは1990年打ち上げの「ひてん」以降、日本で開発した月惑星探査機のほぼすべての軌道計画立案を担当しました（表）。「GEOTAIL」は、厳密に言えば月や惑星の探査を目的とした探査機ではありませんが、軌道計画の観点では他の探査機と同等な技術が使われているため、掲載しました。

### (1) 「ひてん」(MUSES-A)

「ひてん」は、これからの月惑星探査機の不可欠な技術で

表 NECで軌道計画を担当した月惑星探査機

探査機名	打ち上げ日 (ロケット)	目標軌道の特徴
「ひてん」 (MUSES-A)	1990年1月24日 (M-3SII)	二重月スイングバイ エアロブレーキ ラグランジュ点周回 月周回軌道投入 月への制御落下
GEOTAIL	1992年7月24日 (デルタ2)	二重月スイングバイ
「のぞみ」 (PLANET-B)	1998年7月4日 (M-V)	月/地球スイングバイ 火星周回軌道投入
「はやぶさ」 (MUSES-C)	2003年5月9日 (M-V)	電気推進 地球スイングバイ 小惑星イトカワ接近 ピンポイント着陸 地球帰還
「かぐや」 (SELENE)	2007年9月14日 (H-2A)	月周回軌道投入/維持 月への制御落下
「あかつき」 (PLANET-C)	2010年5月21日 (H-2A)	金星周回軌道投入

あるSWBを始めとする各種軌道制御技術の習得をミッションの1つとした探査機です。

打ち上げから地球を5周半して月SWBを行い（図4）、このときに子衛星の「はごろも」を月周回軌道に投入しました。「はごろも」自体には姿勢制御系が無いため、「ひてん」からの分離姿勢が軌道投入の加速方向に一致するような設計を行いました。

遠地点を太陽と反対側に移動させた後、二重月SWBを連続して行い、探査機を太陽と反対側に長期間滞在させるためのSWB技術の習得を行いました。この軌道は、慣性座標系で見ると花びらのような軌道図になっているのが特徴です（図5）。

この後、地球大気によるエアロブレーキ実験、ラグランジュ点周回軌道を経て、「ひてん」自身も月周回軌道に入り、1993年4月11日に日本から見えている時間帯の月の表側に制御落下させました。

## (2) GEOTAIL

「GEOTAIL」は「ひてん」で習得したSWB技術を利用し

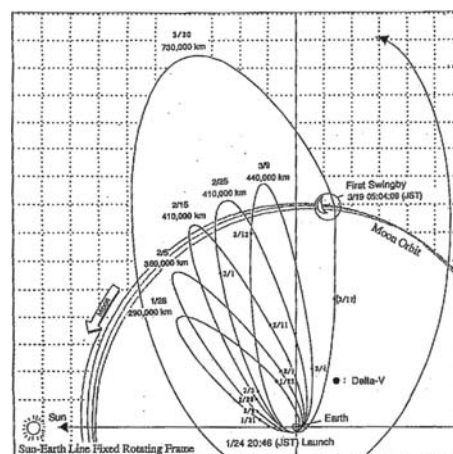


図4 「ひてん」の軌道（打ち上げ～SWB1）（太陽－地球固定回転座標系）

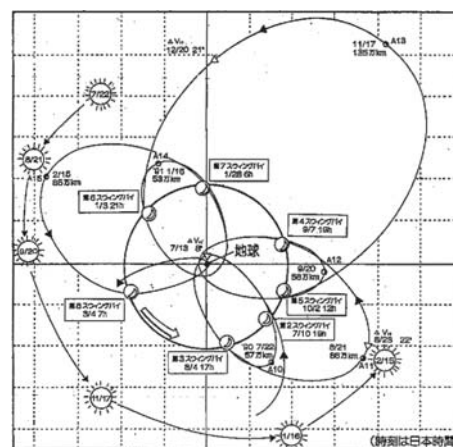


図5 「ひてん」の軌道（SWB2～SWB8）（慣性座標系）

て、探査機を地球磁気圏尾部（太陽と反対方向）に長期間滞在させて観測するミッションです。図6には、計画、実施された全14回のSWBを示していますが、SWBによりさまざまな軌道を取っていることが分かります。図7は、この軌道を太陽の動きに合わせた、太陽－地球固定回転座標系で表したもので、常に遠地点が太陽と反対方向にあり、地球から140万kmの距離までの広い範囲をカバーしていることが分かります。

(3) 「のぞみ」 (PLANET-B)

火星探査機「のぞみ」では二重月SWBを、「ひてん」や「GEOTAIL」とは違う方法で利用しました（図8）。これまで二重SWBは、増速SWBと減速SWBをセットで使用していましたが、両方とも増速SWBを使用し、地球から火星に向かうための加速量を減らす計画でした。

残念ながら、エンジントラブルで火星に向かう軌道には入られませんでした。2回の地球SWBを計画し、2004年に火星に到着する計画を再立案しました（図9）。

#### (4) 「はやぶさ」 (MUSES-C)

小惑星探査機「はやぶさ」の軌道計画の特徴は、電気推進系を使用したことです。小惑星「イトカワ」への往路は、これに地球SWBも利用し、大きく軌道を変化させています（図10）。

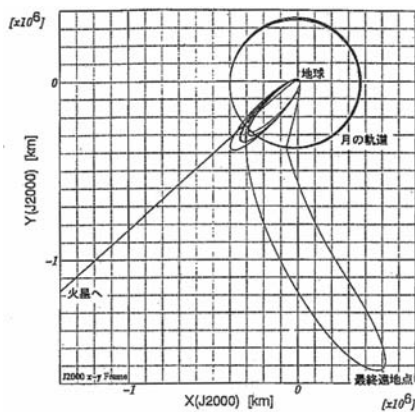


図8 「のぞみ」の軌道（地球圏脱出まで）

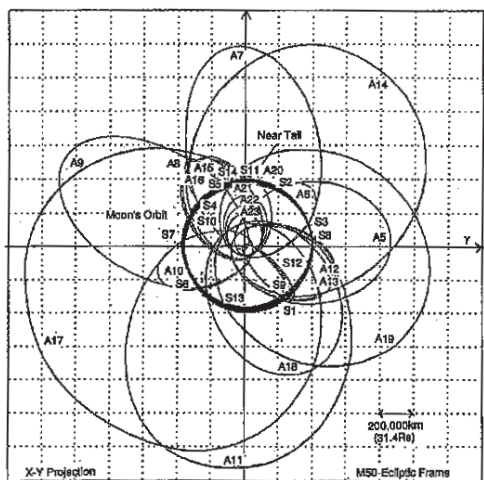


図6 「GEOTAIL」の軌道（慣性座標系）

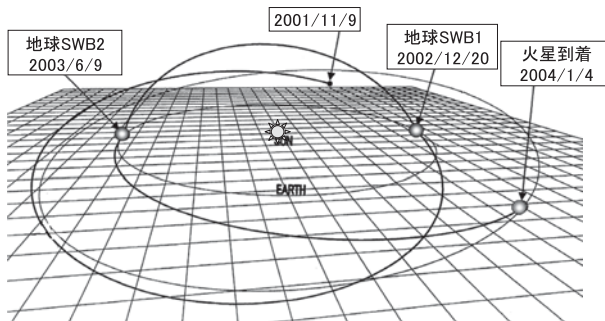


図9 「のぞみ」の軌道（地球～火星）

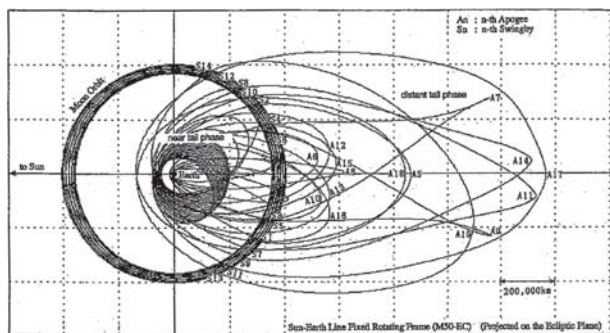


図7 「GEOTAIL」の軌道（太陽-地球固定回転座標系）

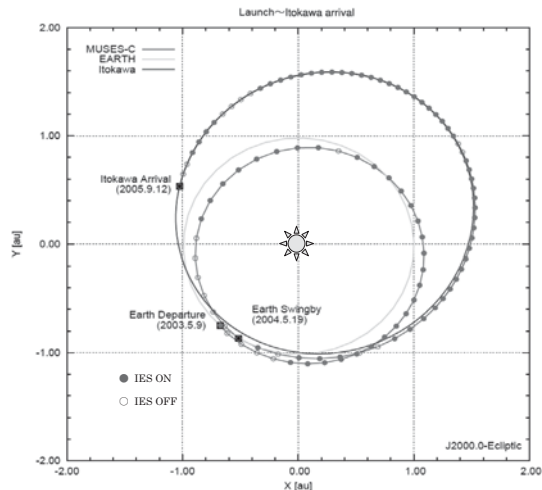


図10 「はやぶさ」の軌道（往路）



また、帰還軌道では、特に地球（オーストラリア）へのピンポイントリエントリという新しい軌道計画技術を開拓することができました。

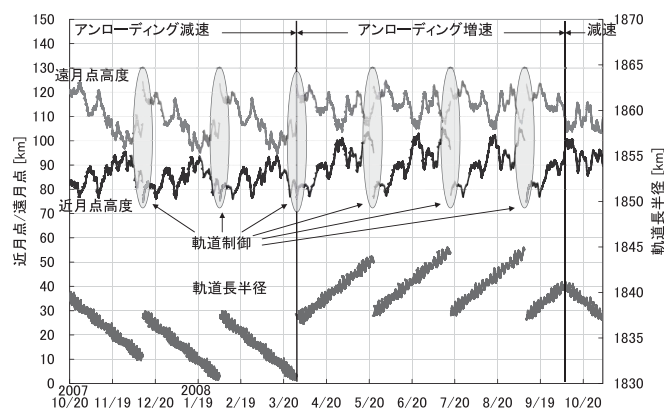


図11 「かぐや」の高度変化と軌道制御

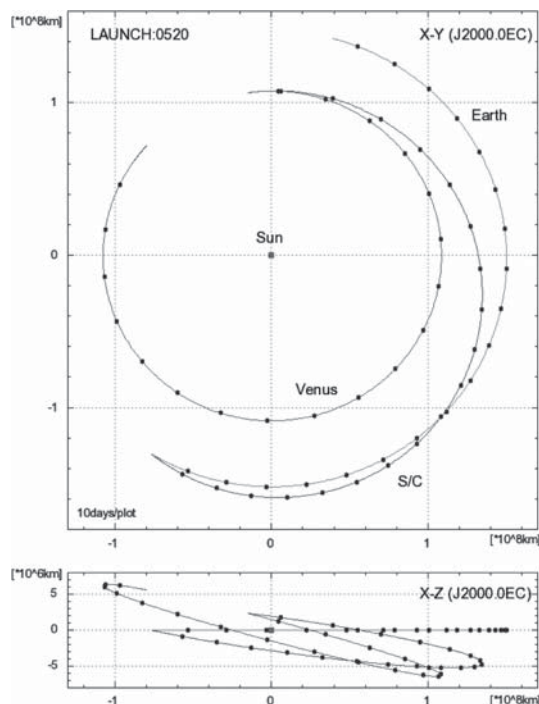


図12 「あかつき」金星遷移軌道

## (5) 「かぐや」 (SELENE)

月周回衛星「かぐや」では、月周回低高度軌道投入とその軌道高度維持が特徴です。月周回高度100kmへの軌道投入は、制御効率や子衛星「おきな」「おうな」の分離の観点から6回に分けて実施しました。

また、月の重力分布の不均一さにより、当初の軌道からずれていく分を修正する制御を2カ月おきに実施する計画も立案しました（図11）。

「かぐや」は、2009年6月11日に「ひてん」同様、日本から見える時間帯に月の表側に制御落下させました。

## (6) 「あかつき」 (PLANET-C)

金星探査機「あかつき」の軌道計画は、ロケット投入=金星に向かう軌道、という計画のため、ロケット投入軌道を厳密に立案することが重要でした。実際に打ち上げた結果では、ロケット投入誤差がほとんど無かったため、途中の軌道修正はあまり必要ありませんでした。図12は金星への遷移軌道です。

## 4. おわりに

これまでに数多くの月惑星探査機の軌道計画を立案し、更にその軌道制御運用を行うことにより、多くのノウハウを蓄積することができました。今後、開発される月惑星探査機についても、効率良く正確な軌道計画の立案を行ってきたいと思います。

最後に、この業務を行うに当たり、ご指導をいただきました独立行政法人 宇宙航空研究開発機構の関係者の皆様に深く感謝いたします。

## 執筆者プロフィール

寺田 博  
NEC航空宇宙システム  
宇宙・情報システム事業部  
マネージャー  
日本航空宇宙学会会員

松岡 正敏  
NEC航空宇宙システム  
宇宙・情報システム事業部  
主任  
日本航空宇宙学会会員

田中 貴美恵  
NEC航空宇宙システム  
宇宙・情報システム事業部  
主任

鶴飼 千亜妃  
NEC航空宇宙システム  
宇宙・情報システム事業部

# NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧くださいありがとうございます。  
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご覧ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報(日本語)

NEC Technical Journal(英語)

## Vol.64 No.1 宇宙特集

特別寄稿：宇宙ソリューションで社会に貢献する時代へ  
宇宙特集によせて  
宇宙事業ビジョンとロードマップ  
NECのグローバルな宇宙ソリューション事業への取り組み

### ◆ 特集論文

#### ロードマップ実現に向けた取り組み

宇宙技術とIT・ネットワーク技術の融合  
宇宙分野におけるグローバル市場への参入戦略  
「宇宙利用」のためのサービス事業の推進  
先進的宇宙システム「ASNAO」の開発

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（人工衛星／宇宙ステーション）

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう（JEM）」の開発  
金星探査機「あかつき」の開発  
小型ソーラー電力セイル「IKAROS」の開発  
月周回衛星「かぐや」の開発  
地球観測衛星（陸域観測技術衛星）「だいち」の開発  
超高速インターネット衛星「きずな」の開発  
総合宇宙利用システムの普及を促進する小型SAR衛星技術

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（衛星地上システム）

衛星運用を支える地上システム  
衛星データの利用を促進する画像処理システム

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（衛星バス）

リモートセンシング事業を迅速に立ち上げる標準プラットフォーム「NEXTAR」  
衛星機器を構成する標準コンポーネント

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（通信）

衛星通信を支える通信技術  
世界で活躍する衛星搭載用中継機器

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（観測センサと応用技術）

観測衛星「いぶき」を支えた光学センサ技術と展望  
全地球上の雨と雲を観測する電波センサ技術  
リモートセンシングデータの向上を実現するSAR画像処理技術  
衛星画像を活用した産業廃棄物監視システム

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（基盤技術）

宇宙技術を支える基盤技術や開発プロセス  
月惑星探査を支える軌道計画と要素技術  
宇宙用耐放射線性POL DC/DCコンバータの開発  
宇宙開発向けプリント配線板の認定状況と今後の展開

#### ロードマップの実現を支える技術と製品（誘導制御計算機）

ロケット用誘導制御計算機の変遷と展望

#### 小惑星探査機「はやぶさ」

小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果

### ◆ NEC Information

#### NEWS

NEC C&C財団25周年記念賞表彰式開催



Vol.64 No.1  
(2011年3月)

特集TOP