

資源探査機「Blue Bird」

帝京大学工学部航空宇宙工学科

猪野雄伍 渡邊拓也 高橋亮

齊藤僚也 大津輝敏 松岡航

1. はじめに

「海王星」(図 1)は、太陽系の惑星の中で最も外側に位置している。また「トリトン」(図 2)は、海王星に最も近く、その公転面に対して逆行するという性質を持った謎多き衛星であるが、他の衛星と比べて探査する資源が豊富であると言われている。現時点で海王星及びトリトンを訪れたことのある探査機はボイジャー 2号の 1機のみであり、過去に本格的な調査を行った例はない。

もし海王星やトリトンの地質・鉱物・構造・大気などを詳細に調査し、将来的に資源調査につなげることが出来れば、今後の深宇宙探査におけるこの 2 天体の利用価値が上がるだけでなく、最も外側に位置する惑星として太陽系の成り立ちの解明につながる可能性も秘めている。そこで本ミッションでは、海王星とトリトンへ軌道の異なる 2 機の探査機を送り込み、科学・起源調査を行うというミッションを提案する。本ミッションが成功した暁には、先述のように太陽系の成り立ちの解明につながるだけでなく、天体の資源を用いた燃料補給型の深宇宙探査が可能かどうかの指標にもつながっていくことから、今後の深宇宙探査の可能性を大きく広げることに寄与することができるものと考え。

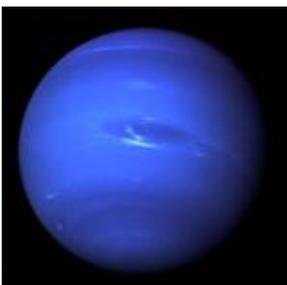


図 1 海王星



図 2 トリトン

2. ミッションについて

2.1 ミッション目的

本ミッションの目的は以下の 2 点である。

- (1) トリトンの科学調査を行い、今後の深宇宙探査に生かす
- (2) 海王星の詳細な調査を行い、太陽系の成り立ちの解明につなげる

2.2 ミッション概要

本ミッションの目的は、上述の通りであるが、中でも最も重要視しているのは、トリトンにおける資源の埋蔵量の調査である。トリトン自体は、重力をほとんど持ち合わせていないため、海王星を介さなければ調査することが難しい。そのため、トリトンの調査を行う探査機『ドルフィン』と海王星の調査を行う探査機『ミューガル』の 2 機を選定した。軌道の詳細については「4. 軌道計画」で詳細を示すが、今回選定した 2 軌道を通ることにより海王星及びトリトンを全体的に調査できると考えている。以下に各天体についてのミッション概要を示す。

2.2.1 トリトン編

トリトンの構成物質は水が 1/4 で残りが窒素化合物、メタンである。これらの物質の中でメタンは燃料用のガスとしての可能性を秘めている。メタンは高温の水蒸気との反応で一酸化炭素と水素の混合気(合成ガス)を生じ、この混合気そのもの、あるいは単離した一酸化炭素や水素を各種化学プロセスの原料として使用する。これらを宇宙機で使用すると採掘・運用などいくつかの技術が必要となるが、使用・運用できると判断されれば、将来的にトリトンを深宇宙探査における燃料及び資源の補給場所として利用するこ

とが可能となる。今回はこの資源利用の第一歩としてトリトンの表層及び磁場・大気環境を調査する。

2.2.2 海王星編

現在、海王星を訪れたことのある探査機はボイジャー2号の1機のみである。その際にボイジャー2号は海王星を望遠写真偏光計で撮像したのみであった。その後はハッブル宇宙望遠鏡を利用して観測を続けてきた。その結果、海王星には季節があるのではないかと提唱されるようになった。海王星は太陽から30.11[AU]も離れているため、太陽から受ける熱はとても小さい。しかし、その小さな熱に反応して海王星の大気に季節変化が起きているのではないかと考えられている。これらをふまえ、海王星の季節変化に起因する大気の状態及び海王星周囲の磁場環境を調査する。

2.3 搭載機器について

本ミッションは2機の探査機『ドルフィン』『ミューガル』を使用して行う。それに当たり、以下に条件を示す。

- 本探査機の運用を15年と設定する。
- ミッション機器、バス機器及び燃料搭載量は探査軌道に応じた機器を使用する。

以上、2点をふまえて両機の搭載機器を決定した。

2.3.1 ミッション機器

本ミッションでは、天体からの探査軌道距離が異なる探査機を用いるため、その軌道・距離に対応したミッション機器を両機に選定した。以下に両機に搭載するミッション機器の諸元を示す。本ミッションでは、これまでの人工衛星や探査機に用いられてきた既存で実績のある技術を基に選定した。

2.3.1.1 探査機『ドルフィン』のミッション機器

探査機『ドルフィン』はトリトンを近距離から調査する探査機のため、トリトンの地形、元素の分布・存在量、大気の組成等を調査できるミッション機器を選定した。以下にミッション機器の諸元を簡単に示す。(表1)

表1 『ドルフィン』ミッション機器の諸元

| 機器 | サイズ(L×W×H) [mm] | 重量 [kg] | 消費電力 [W] |
|------|-----------------|---------|----------|
| GRS | 468×534×604 | 30.5 | 32 |
| LA | 25×25×20 | 33.8 | 34.2 |
| VIMS | 780×760×550 | 37.14 | 23.9 |
| MGF | 400×400×800 | 2.54 | 2 |
| HRSC | 742×317×485 | 20.4 | 48.7 |

(1) トリトンの表層調査

本ミッションにおいて、トリトンの表層調査を行うミッション機器は、ガンマ線分光計 GRS (Gamma Ray Spectrometer)、レーザ高度計 LA (Laser Altimeter)、高解像度ステレオカメラ HRSC (High Resolution Stereo Camera) である。

GRS では、ガンマ線を用いてトリトン表面に存在する数種類以上の元素を測定する。また GRS に搭載された中性子測定装置を用いてトリトンの水素量及び水の量を推定する。LA では、近赤外線を表面に向けて発射し、反射した近赤外線の波長を測定することで表面の凸凹を特定し、まだ詳細に分かっていない地形データを取得する。HRSC では、可視光線を表面に発射し、反射した可視光線の反射率を測定することで表面の地形・地質構造、地質年代を推定する。その測定原理を図3に示す。

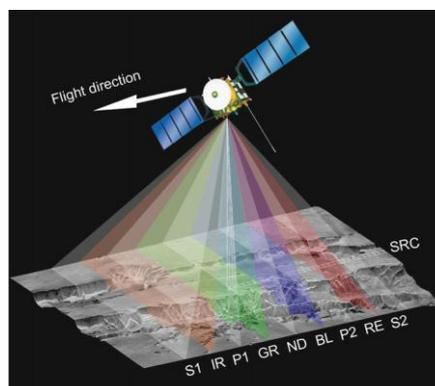


図3 HRSCの測定原理(Planetary and Space Science 55より抜粋)

(2) トリトンの磁場・大気環境調査

本ミッションにおいてトリトンの磁場・大気環境を調査するのは磁場観測器 MGF (Magnetic Field measurement)、赤外マッピング分光計 VIMS (The Visual and Infrared Mapping Spectrometer) である。

MGF では、トリトン周囲に発生する磁場分布を調査する。また、主惑星である海王星は地球の約27倍の磁場があると言われ、少なからずトリトンにも影響を及ぼしていると推測し、その影響も調査する。

VIMS(図 4)では、可視～中赤外領域の光を用いてトリトン大気中の化学種及び鉱物種を調査し、空間分布図の作成に利用する。また、トリトンの大気は非常に薄いと言われ、その大気成分の主は窒素であるが、その他の詳細な成分が分かっていないため、その調査も行う。

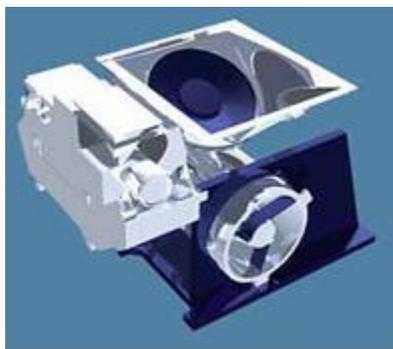


図 4 VIMS イメージ図(Cassini's VIMS instrument website より抜粋)

2.3.1.2 探査機『ミューガル』のミッション機器

探査機『ミューガル』は海王星を調査する探査機のため、海王星の大気の状態、周辺の磁場・プラズマ環境を調査できるミッション機器を選定した。以下にミッション機器の諸元を簡単に示す。(表 2)

表 2 探査機『ミューガル』搭載ミッション機器の諸元

| 機器 | サイズ(L×W×H) [mm] | 重量 [kg] | 消費電力 [W] |
|------|-----------------|---------|----------|
| MGF | 526 × 408 × 284 | 8.24 | 8.62 |
| CPI | 350 × 300 × 300 | 17.4 | 10.5 |
| EPIC | 650 × 350 × 400 | 21 | 25 |
| NIS | 103 × 62 × 52 | 18 | 13 |
| PPR | 448 × 391 × 327 | 5.2 | 19.3 |
| ISP | 420 × 380 × 360 | 12.2 | 20 |

(1) 海王星の大気調査

本ミッションにおいて、海王星の大気環境を調査するミッション機器は、近赤外分光計 NIS (Near Infrared Spectrometer)、赤外分光光度計 ISP (Infrared SpectroPhotometer)、望遠写真偏光計放射計 PPR (Photopolarimeter) である。

PPR(図 5)では、可視～近赤外領域の光を用いて海王星の大気中の粒子の形、大きさ等決定し、その分布構造を調査する。また PPR、NIS、ISP を併用して大気中のエネルギー収支を調査する。海王星は太陽から非常に遠いため、外部からの熱の出入りはほとんどない。しかし、熱の出入りがほとんどないにもかかわらず季節変化が起きているのは、太陽光以外に海王星内部に熱源が存在しているからであると考え

られている。その発生熱量を調査するためには可視光及び赤外光で精密測光する必要があるため、可視光域を測定できる PPR、赤外線域を測定できる NIS 及び ISP の搭載を決定した。

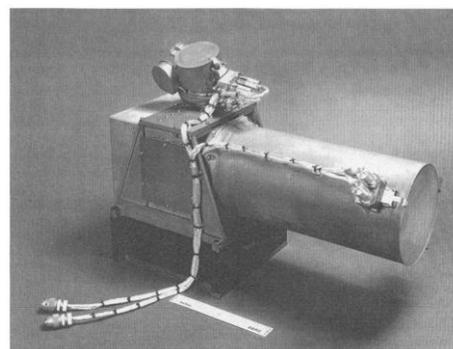


図 5 PPR 構成図(GALILEO PHOPOLARIMETER より抜粋)

(2) 海王星の磁場・プラズマ環境の観測

本ミッションにおいて、海王星の磁場プラズマ環境を観測するミッション機器は磁場観測器 MGF、プラズマ環境分析器 EPIC(Energetic Particles and Ion Composition)、及び CPI (Comprehensive Plasma Instrument) である。

MGF では、海王星の磁場環境を観測する。海王星の磁場は地球の磁場の約 27 倍の強さであると言われて、磁気軸は海王星の自転軸を基準にして約 47 度傾いている。この不一致が原因で各自転の間に激しい変動が起きている。この変動が大暗斑や嵐に少なからず関わっていると考え、磁場を観測することにより海王星の変動を探る。EPIC(図 6)及び CPI では、海王星のプラズマ環境を調査する。磁場分布の測定と同様に、プラズマの環境が大暗斑などの存在に影響を及ぼしているのではないかと考え、これらを調査、解析し海王星環境の謎に迫る。これは、イオンセンサーや電子センサーを用いて大気中の荷電粒子の特性、質量、エネルギーを測定することで可能になる。



図 6 EPIC 概観図(GEOTAIL/EPIC Science Data Center より抜粋)

3. バス機器について

3.1 構体系

以下に各探査機の諸元(表 3)及び簡単な構体図(図7)を示す。詳細な搭載機器については、各系で説明する。

表 3 各探査機の諸元

| | ドルフィン | ミューガル |
|-----------------|----------------|---------|
| サイズ(L×W×H) [mm] | 2500×2500×5000 | |
| 搭載質量 [kg] | 444.36 | 396.17 |
| タンク合計 [kg] | 51.65 | 44.01 |
| 燃料合計 [kg] | 1440.71 | 1078.11 |
| 打ち上げ時全質量 [kg] | 1956.72 | 1538.29 |
| 材質 | 7075-T7351 | |

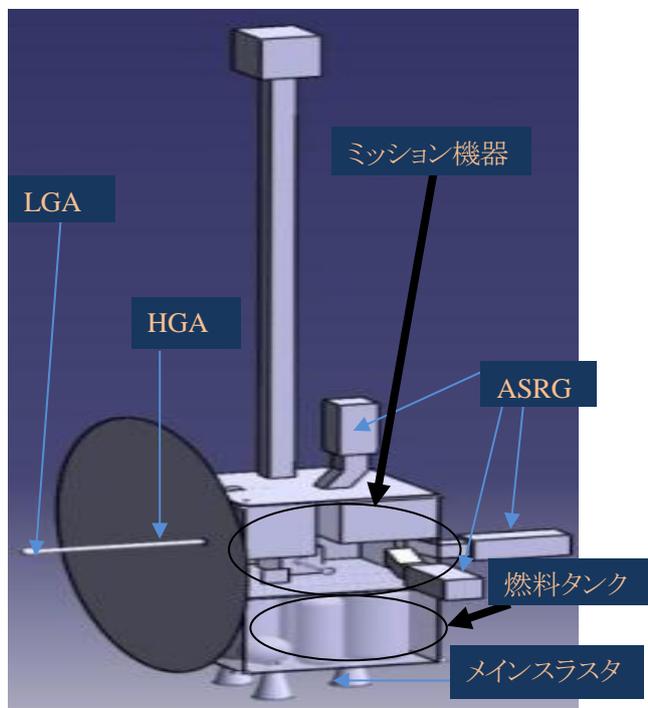


図 7 構体図

3.2 通信・情報処理系

本ミッションの目的地である海王星及びトリトンとは地球から非常に遠く、利得の大きいアンテナが要求される。特に本機は多くのミッションを予定しており、データ量が大きくなる。したがって、今回は『ボイジャー』などの深宇宙探査機のアンテナを参考にし、SバンドとXバンドの2つのバンドを用い、さらにデータ量の大きな通信のための高利得アンテナ HGA (High Gain Antenna) 1基と、通常時及び非常時通信用の低利得アンテナ LGA (Low Gain Antenna) 3基を搭載

する。LGA を隣接する面に搭載することで視野を広げ、非常時にもできる限り通信ができるようにした。地上での通信に関しては、地球側では臼田宇宙観測所の大型パラボラアンテナ及び Deep Space Network 通信を使用する。

情報処理系に関しては、Space Micro 社製の CPU Proton400k (7200MIPS の高速処理が可能)を1台搭載し、ミッション系・バス系すべてを扱う。データ保存用の SSD (Solid State Drive) に関しては、400GB のものを2台搭載することにした。ミッション期間を6年とするとミッション期間中発生する観測データ量は、トータルで『ドルフィン』が約 790GB、『ミューガル』が約 190GB である。データの伝送速度を1日 115kbps に設定すると両機の発生データ量を6年のミッション期間内にすべて伝送することができる。また、冗長系のために『ドルフィン』のデータを『ミューガル』に転送することも可能である。

3.3 電源系

海王星及びトリトンでは太陽から得られる光及び熱エネルギーが非常に小さいので、太陽光電池パネルではなく ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator、図 8) とリチウムイオン電池を電力源として用いた。ASRG の燃料は、運用が15年であることと使用する電力の関係より、『ガリレオ』や『ボイジャー』などの深宇宙探査機にも用いられたプルトニウム 238 (Pu^{238} 、半減期 87.8 年) を選択した。本解析書では省略するが、各フェーズにおける使用電力は ASRG3 基の運用が必要なため3基搭載する。また、ASRG を用いた理由として、スターリングエンジンを併用するため RTG よりも熱効率がよく、使用する Pu^{238} の量も比較的少量で済むため、仮に打ち上げを失敗した場合でも、地上への環境汚染の影響を少なくすることができる。

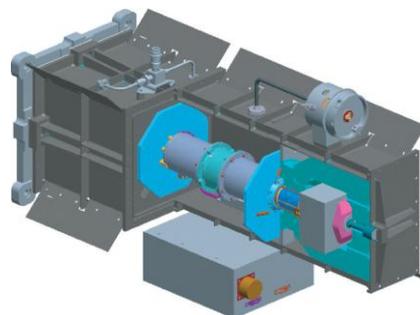


図 8 ASRG の構造 (Advanced Stirling Radioisotope Generator より抜粋)

3.4 推進及び姿勢制御系

本ミッションは、海王星及びトリトンでの調査を考えているため液体推進剤を選定し、モノメチルヒドラジン／四酸化二窒素（一酸化窒素 3%含む）の二元推進薬ロケットエンジン R-4D（Aerojet 社製、推力 490[N]、 I_{sp} :311[s]）を用いる。ただし、四酸化二窒素は沸点が 21.1[°C]と非常に低いため、探査機の上段（ミッション・バス系）と下段（燃料タンク）を中段（ヒートパイプ及び放熱面のある空間）によって熱的に分離した。姿勢制御用スラスタにはヒドラジンを燃料とする MR-111C（Aerojet 社製、推力 4[N]、 I_{sp} :229[s]）を 12 基搭載するが、燃料節約のため、リアクションホイール（ITAHCO 社製、最大 5100[rpm]）を 2 基搭載し、リアクションホイールでの制御をメインとする。

姿勢制御用センサーに関しては、3 軸ジャイロ스코ープ、太陽センサー、恒星センサーを搭載することで航法誘導及び探査機の姿勢制御の補助を行う。

3.5 熱制御系

本ミッションで向かう海王星及びトリトンは太陽からの距離が遠いため、温度が低く、非常に熱環境が厳しい。その環境下で機器や燃料を許容温度範囲内にする必要があるので、まず、上段（ミッション機器、バス機器）と下段（燃料）を熱的に分離するため、放熱を促進するためのヒートパイプを内蔵した中段を設ける。次に表面素材として上段に MLI（Multi-Layer Insulation）を使用し、熱入力を極力抑える。下段の燃料タンクには、白色ペイントを使用することで内部の温度上昇を抑制する。また、ヒータ、サーマルルーバを適宜使用し、各種機器類の温度を調節できるようにした。探査機の熱設計に関しては熱平衡方程式を解くことで機器や燃料が許容温度範囲に収まるようにした。以下に熱平衡方程式で使用した熱モデルを示す。（表 4、図 9）

表 4 各箱の寸法 [mm]

| | |
|-----|----------------|
| ①上段 | 2500×2500×2900 |
| ②中段 | 2500×2500×100 |
| ③下段 | 2500×2500×2000 |

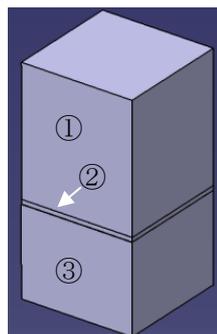


図 9 熱モデル

以下の単純化を行い、解析を行った。（表 5）

- (a) 探査機の上段、中段、下段は直方体の箱である
- (b) 各箱間では熱の干渉はないものとする
- (c) 内部機器発熱はないと仮定
- (d) 地球近傍、火星近傍、木星近傍及び海王星のみ解析（準ホーマン軌道による惑星間移動時の熱の出入りは考慮しない）
- (e) 各惑星の hot case と cold case のみを考え、探査機の自転は考慮しない

表 5 熱平衡方程式による各惑星近傍の温度

| 惑星 | 番号 | hot case [°C] | cold case [°C] |
|-----|----|---------------|----------------|
| 地球 | ① | 55.36 | -52.94 |
| | ② | 112.36 | 69.75 |
| | ③ | 72.43 | -35.23 |
| 火星 | ① | -19.18 | -66.07 |
| | ② | 55.19 | 48.76 |
| | ③ | -4.56 | -49.50 |
| 木星 | ① | -56.48 | -78.1 |
| | ② | 9.42 | -15.87 |
| | ③ | -43.75 | -66.07 |
| 海王星 | ① | -118.45 | -122.05 |
| | ② | -65.52 | -73.42 |
| | ③ | -109.03 | -112.67 |

4. 軌道計画について

本機は『探査機』のため、燃料を最小限に抑え海王星及びトリトンの探査軌道に投入できる軌道を計画した。火星、木星でのフライバイを含む、準ホーマン軌道で遷移し、海王星に到達する。以下、計算を単純化するため、惑星の公転軌道面が一致しているものと仮定する。また、海王星に近日点付近で到達したいため、これに該当する惑星の位置関係を調べたところ 2039 年 11 月 8 日の位置関係において実現可能となったため、打ち上げ日をこの日に設定した。2 機の探査機は、ミッションの都合上、同日同時刻の打ち上げとする。

本ミッションにおいては、トリトンを調査するための光学航法が一番の懸念材料と考えられる。これは、地球からの情報が探査機に届くまで時間がかかって

しまうことが主な原因であるが、探査機に人工知能を搭載し、探査機自体の自律化を図ることで対応する。これにより、その場でトリトンとの位置関係を判断したり、必要なミッションを遂行したりすることができる。

4.1 地球から火星までの軌道

H-II B ロケットにより地球重力圏を脱出し火星に向かう。外惑星に向かうため、地球の公転方向に加速し、探査機を分離する。その後、火星で加速フライバイ(半径 4396[km]、 $\Delta V=+7.96$ [km/s])を行い、木星に向かう。地球-火星間の飛行時間は0.31年である。(図 10)

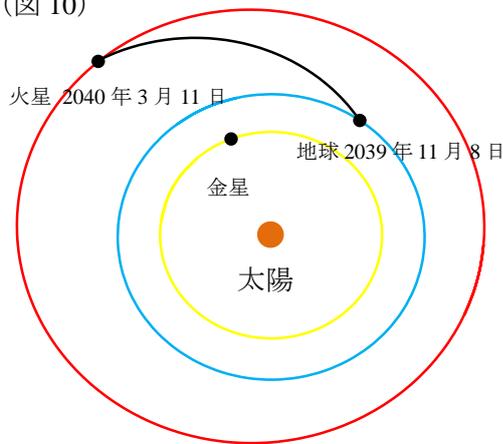


図 10 地球から火星までの軌道

4.2 火星から海王星までの軌道

火星から準ホーマン軌道で航行した探査機は、木星に 2042 年 1 月 11 日、速度 $V=6.21$ [km/s] で到着する。加速フライバイ(半径 471492[km]、 $\Delta V=+3$ [km/s])を行い、海王星に向かう。海王星の到着日時は 2048 年 5 月 2 日である。火星-海王星間の飛行時間は 8.45 年である。(図 11)

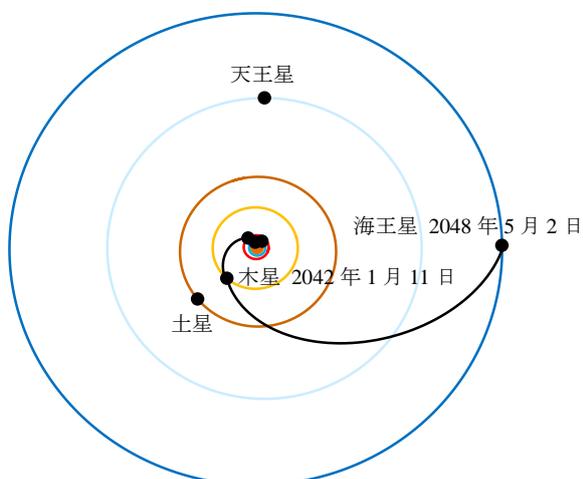


図 11 火星から海王星までの軌道

4.3 海王星での軌道

両機とも海王星には $V=11.09$ [km/s] で到着し、それぞれの探査軌道に入るための軌道修正を行う。その軌道については、以下に示す。

4.3.1 探査機『ドルフィン』

この探査機はトリトンを調査する。海王星到着後の軌道を図 12 に示す。

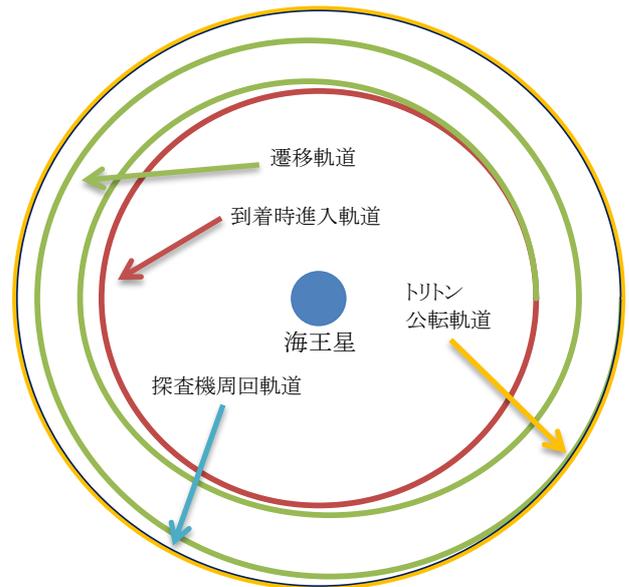


図 12 『ドルフィン』探査軌道

始めに海王星到着速度より 1 回目のメインスラスト噴射($\Delta V_1=-5.86$ [km/s]、時間 $\Delta t_1=185.49$ [s])で減速を行い、半径 250000km の周回軌道へ投入する。その後、2 回目のメインスラスト噴射($\Delta V_2=+0.38$ [km/s]、 $\Delta t_2=4.68$ [s])で加速し、半径 348470km への遷移軌道へ投入する。遷移軌道脱出時に 3 回目のメインスラスト噴射($\Delta V_3=-0.41$ [km/s]、 $\Delta t_3=4.90$ [s])で減速を行い、探査周回軌道への投入を完了する。この際のトリトン公転軌道からの距離は 1940km である。ミッション機器に関しては、機器の動作保証期間と惑星間航行時間の関係から各機器に応じた適切な時間から動作させ、ミッションを行う。

4.3.2 探査機『ミューガル』

この探査機は海王星を調査する。海王星到着後の軌道を図 13 に示す。

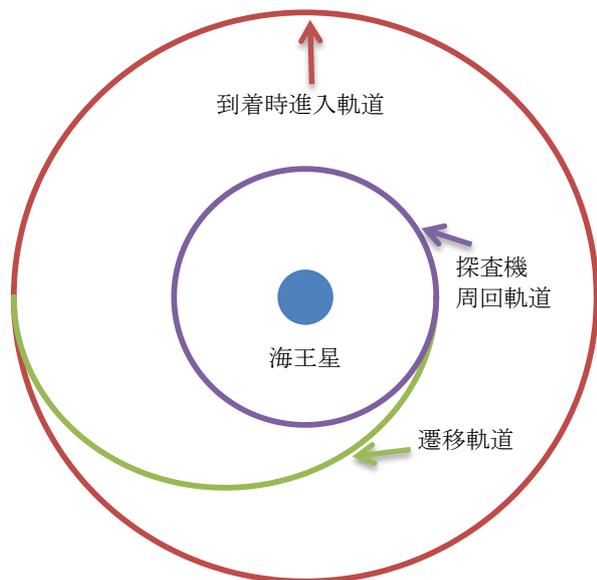


図 13 『ミューガル』探査軌道

始めに海王星到着速度より 1 回目のメインスラスト噴射 ($\Delta V_1 = -2.82[\text{km/s}]$ 、 $\Delta t_1 = 69.67[\text{s}]$) で減速を行い、半径 100000km の周回軌道へ投入する。その後 2 回目のメインスラスト噴射 ($\Delta V_2 = -2.15[\text{km/s}]$ 、 $\Delta t_2 = 36.96[\text{s}]$) で減速し、半径 45000km への遷移軌道へ投入する。遷移軌道脱出時に 3 回目のメインスラスト噴射 ($\Delta V_3 = +1.75[\text{km/s}]$ 、 $\Delta t_3 = 23.22[\text{s}]$) の加速を行い、周回探査軌道へ投入させる。

5.さいごに

最後に本ミッションにおいて期待される成果について述べる。

本ミッションの目的は「2.1 ミッション目的」で述べた通り、『トリトンの科学調査』と『海王星の調査』である。この調査をすることで、トリトンに関しては資源の分布、埋蔵量及び地形図が分かり、海王星に関しては惑星周辺の磁場・プラズマ環境及び大気の状態が分かる。これらのことが分かることで以下のような成果が期待される。

- トリトンでのメタンの埋蔵量が分かれば、燃料として利用できる可能性がある
- 宇宙機でバイオ燃料が使用できるようになれば、

メタンをバイオ燃料とすることでトリトンは深宇宙探査機への燃料補給基地としての利用が可能になる

- 燃料補給基地選定のための地形図及び資源の分布図が手に入る
- 海王星周辺の磁場・プラズマ環境が分かればトリトンをどのようにして捉えたのか、海王星の気象変化などの解析に充てることができる

以上のような事項を解析することができ、太陽系最外惑星の海王星及びその衛星トリトンの利用価値を含めた太陽系環境をより詳しく知ることができる。また、トリトンでの燃料補給が可能になれば、その先の深宇宙へ航行する際、燃料満タンの状態でトリトンから出発でき、より遠くの宇宙へ向かうことができる。海王星及びトリトンを知るということは、今後の深宇宙探査へ大きな前進をもたらし、新たな道を作ってくれるものと期待できる。

6.参考文献

- [1] 茂原正道 著「宇宙システム概論－衛星の設計と開発－」、株式会社培風館、(1995)
- [2] 茂原正道、鳥山芳夫 共編「衛星設計入門」、株式会社培風館、(2002)
- [3] 木田隆、小松敬治、川口淳一郎 著「人工衛星と宇宙探査機」、株式会社コロナ社、(2001)
- [4] 茂原正道、木田隆 著「宇宙工学入門Ⅱ－宇宙ステーションと惑星間飛行のための誘導・制御－」、株式会社培風館、(1998)
- [5] 木下宙 著「天体と軌道の力学」、財団法人東京大学出版会、(1998)
- [6] 富田信之 著「宇宙システム入門 ロケット・人工衛星の運動」、財団法人東京大学出版会、(1993)
- [7] 小林繁夫 著「宇宙工学概論」、丸善株式会社、(2001)
- [8] 高野忠、小川明、坂庭好一、小林英雄、外山昇、有本好徳 著「宇宙通信および衛星放送」、株式会社コロナ社、(2001)