

プラネタリウム投影プログラム

「ボイジャー太陽系脱出」制作報告

江越航*

概要

当館では2015年3月から5月にかけて、「ボイジャー太陽系脱出」というタイトルでプラネタリウム番組を投影した。この番組は、1977年に打ち上げられた惑星探査機「ボイジャー」を紹介するもので、ボイジャーが撮影した太陽系の外惑星の驚くような映像のほか、最近到達した太陽系の果ての姿を扱った内容である。本稿では番組制作に当たったコンセプト、製作した番組の内容について報告する。

1. はじめに

1977年に打ち上げられたボイジャー探査機は、木星・土星・天王星・海王星という太陽系の外惑星を身近で観測し、私たちに驚くような映像を送り届けてくれた。

ボイジャーの探査により、惑星に関する理解が飛躍的に高まり、現在、比較惑星学と呼ばれる分野が発展するきっかけとなった。探査の結果は現在の惑星科学の基礎を作り、私たちの宇宙観にも大きな影響を与えている。

ボイジャー探査機は現在でも飛行を続けており、最近の解析結果から、2012年には末端衝撃波面(ターミネーションショック)と呼ばれる領域に到達したことが分かった。ここは太陽系の端に当たる部分であり、ついにボイジャーは太陽系の果てに到達したことになる。

以下においては、この番組制作に当たったコンセプト、および制作した番組の内容について報告する。

2. 番組コンセプト

ボイジャー探査機は、1970年代終わりから80年代にかけて、太陽系の外惑星の写真を送り届けることで、私たちに大きな影響を与えた探査機である。特に、天王星、海王星に関しては、いまだにボイジャー以外の探査機は到達しておらず、間近から撮影された写真も存在していない。

番組では、まずボイジャーが観測した豊富な写真をもとに、太陽系の惑星の姿を伝えることを目的にする。探査機で間近に観測することにより、初めてその素顔が明らかになったという、驚きを伝える。

また、惑星に到達するには、太陽系の中でも長い年月を必要することから、宇宙の広大さを実感することになる。さらに、ボイジャーが到達した太陽系の端、星間空間という概念を紹介することで、太陽系とその周りにある星々にも思いを馳せることができる。こうした内容を通じて、宇宙の広大な広がりとその中に住む私たちの関係について認識する。

このように今回の番組では、ボイジャーの探査の様子を紹介することを通して、現在につながる惑星科学の一端と、私たちの宇宙観を伝えることとする。

3. 番組の構成

番組の構成は、次のように主に7つのパートに分けて作成した。以下に、各パートの内容を示す。

○イントロ

今から40年近く前の1977年、2機の惑星探査機「ボイジャー1号・2号」が打ち上げられた。「ボイジャー」とは航海者という意味である。このボイジャー探査機について、まず打ち上げの場面と共に紹介する。

次に木星に向かうボイジャーの全天周映像や惑星の写真とともに、この探査機が太陽系の惑星を間近にとらえ、鮮明な写真を送り、多くの発見を成し遂げたことに簡単に触れる。さらに現在ボイジャーは、太陽系の端に到達、今まさに太陽系を離れようとしている、という

*大阪市立科学館学芸グループ
e-mail:egoshi@sci-museum.jp

ことでタイトルを表示し、イントロとする。

○グランドツアー

ボイジャー探査機を打ち上げたのは、地上からの観測ではぼんやりとしか見えない太陽系の惑星の姿を詳細に知るためである。しかし、海王星までは 45 億 km、探査機が到達するには 30 年以上の時間が必要だった。

しかし、画期的な方法が見出された。1970 年代後半から、地球の外側の惑星が、ほぼ同じ方向に並ぶのである。これを、バーチャリウムの太陽系の描画機能を用いて紹介する。

この時期にフライバイと呼ばれる方法を利用することで、惑星到達までの時間を大幅に短縮することができる。そのため、この時期にボイジャーが打ち上げられたことを説明する。

以下、ボイジャーが探査した惑星を順に紹介する。

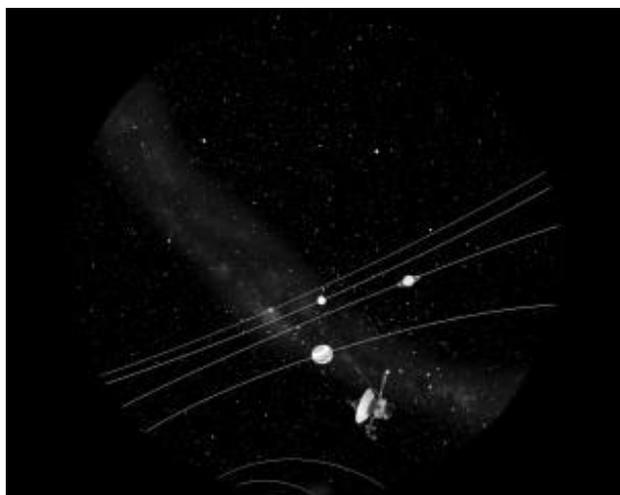


図1 グランドツアーの場面

○木星

打ち上げから2年後、ボイジャー1号、2号は相次いで木星に接近。これを、バーチャリウムの太陽系の描画機能に加え、ボイジャーの軌跡を表示して示した。

木星に接近して写真を撮ったボイジャーは、木星の表面は帯状のガスに彩られていたこと、大赤斑は巨大な雲の渦巻きである様子をとらえたことを、実際に撮影された写真と共に紹介する。

さらに木星の衛星イオで、常識を覆す発見があった。イオの表面から火山の噴煙が上がっていたのである。これは、地球以外の天体で初めて火山活動が確認されたもので、衛星イオは生きていた星だったのである。この内容を、写真と全天周の動画により紹介する。

なお、この木星のパートは、2012 年の冬番組として投影した「木星」を利用して作成した。

○土星

打ち上げから3～4年後、ボイジャー1号、2号は土星に接近。この部分も木星と同様に、ボイジャーの軌

跡を表示して示した。

土星のパートは、主に静止画の写真を中心に構成した。地上からの観測では、土星の環は3本の環からできていると考えられていたが、実際には 1000 本以上の細い環が集まってできていることが明らかになった。この内容を、写真と一部動画で説明する。

また、土星の衛星も観測した。特に衛星タイタンは、周囲がぼやけており、大気のある星であることが分かったことを解説する。

○天王星・海王星

打ち上げから8年後の 1985 年 7 月、ボイジャー2号が天王星に接近。この演出は、距離感を出すために、ボイジャーの目線でバーチャリウムの描画機能により、太陽付近から直線的に天王星まで飛行した。

天王星については、地球からは青い点にしか見え、謎の惑星だったが、淡い青色の模様の少ない星であること、横倒しになって自転していることが分かったことを解説する。その後、全天周の映像により、天王星リング、そして衛星ミランダの紹介を行う。

そして打ち上げから 12 年後、1989 年 8 月、最果ての惑星海王星に接近。引き続き、ボイジャーの目線でバーチャリウムの描画機能により、直線的に海王星まで飛行して、距離感を出した。

海王星は、美しい青色をしており、大きな斑点もあった。そして大気中には白い雲のような筋も見えた。これを、海王星の雲の全天周映像を交えて説明する。

最後に、衛星トリトンの解説を行って、太陽系の星の説明を終わる。

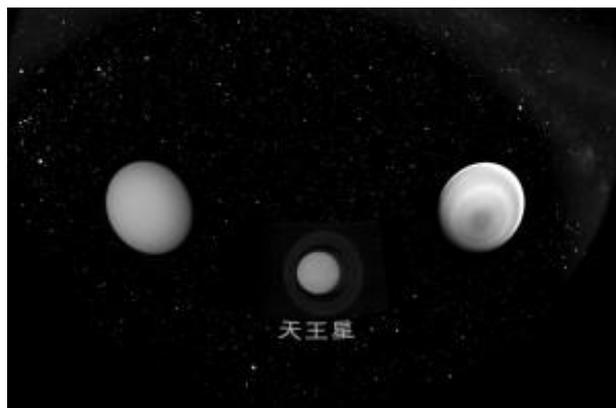


図2 天王星の紹介

○星間空間

現在ボイジャー1号は、地球から 195 億 km、2号は 161 億 km 離れた宇宙を飛んでいる。地球から太陽までの 100 倍以上の距離である。

太陽系の端は、太陽風と星間物質がぶつかる壁のような状態になっており、末端衝撃波面(ターミネーションショック)というが、このターミネーションショックの存在を、解説画像により説明する。

そして、ボイジャー1号がターミネーションショックを越えたことを、観測機器のデータがプラズマの変化を捉えたことから解説する。このことから、ボイジャーはついに太陽系の端に到達したことを紹介する。

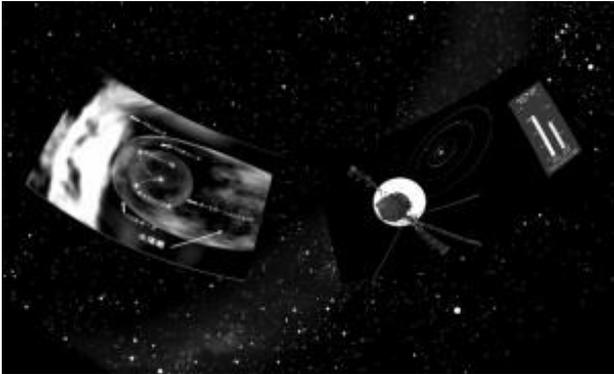


図3 星間空間の解説

○エンディング

エンディングとして、ボイジャーが写した太陽系全体の写真を紹介する。この写真は事前の試写で人気の高かったものである。写真では地球はかろうじて見える、小さな青い点に過ぎない。宇宙から見れば、地球も太陽系もほんの小さな存在であることを教えてくれる。

ついに太陽系を飛び出して、大海原へと旅立ったボイジャー、これを遠くに飛び去っていくボイジャーの映像を出しながら演出して、番組を終わる。

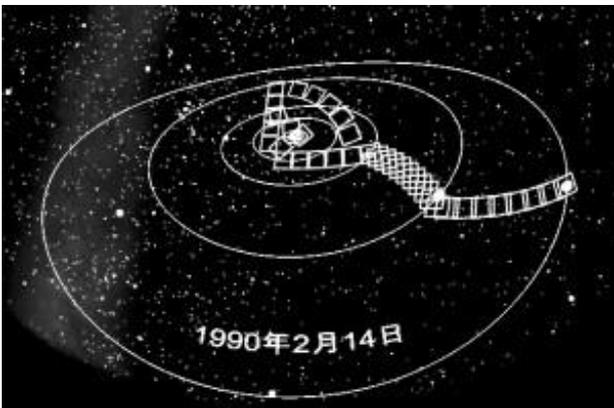


図4 エンディングの場面

4. 惑星間の飛行

番組中、「グランドツアー」「天王星・海王星」のパートは、ボイジャーとともに、太陽系内を飛行しているような演出を行っている。これは、バーチャリウムの太陽系の描画機能に視点移動を組み合わせて行っている。

視点移動は、eye オブジェクトを移動させることで行っている。例えば木星に移動する場合は

```
eye goto jupiter dur 5
```

という命令を実行する。これにより、5 秒間かけて木星に移動する。さらに適宜、eye の姿勢、scene の位置と姿勢を調整することで、必要な演出を行っている。

5. 軌跡の描画

ボイジャーが地球を飛び出し、外惑星へ向かう場面において、バーチャリウムの機能により、ボイジャーの軌跡の描画を行った。

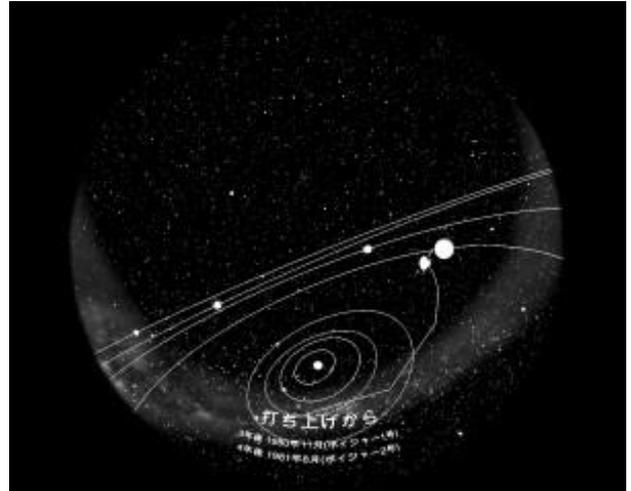


図5 ボイジャーの軌跡を描画

バーチャリウムのプログラムにおいて、以下のように最初に object を定義し、用意した軌跡データの csv ファイルを読み込むことで、軌跡の描画が可能になる。

```
obj_voyager is voyager.x
obj_voyager path is voyager_path.csv
obj_voyager trail on
```

csv ファイルの軌道データは、Time X Y Z H P R の 7 つの要素を時系列に並べたものを用意する。ここで XYZ はバーチャリウムのワールド座標系であり、ドーム中心を原点、正面方向が Y 軸、右方向が X 軸、天頂方向が Z 軸に相当する。Time は日単位で記載する。HPR (heading、pitch、roll) については、今回はいずれの値も 0 とした。

csv ファイルを作成するための軌道データは、NASA の Web サイト「National Space Science Data Center」からダウンロードした。

このサイトから得られる軌道は、太陽中心の黄道座標系で出力される。これは、春分点の方向を X 軸とし、黄道面が XY 面、これに垂直に北極方向が Z 軸となる右手系の座標である。黄経 λ (ecliptic longitude、SE_LONG) は X 方向が 0 で、Y 方向に向かって増加する。黄緯 β (latitude、SE_LAT) は北極が 90 度、南極が -90 度となる。これに、太陽からの距離 (RAD_AU) と合わせ、年、日、距離、黄緯、黄経が時系列に並んでいる。

```
YEAR DAY RAD_AU SE_LAT SE_LON
1977 249 1.01 0 343.8
.....
```

これを、バーチャリウムで使用する軌道データにするために、まず赤経 α ・赤緯 δ への座標変換が必要に

なる。

黄道座標(黄経 λ , 黄緯 β) → 赤道座標(赤経 α , 赤緯 δ)への座標変換は、次の式で求められる。

$$\cos \delta \cos \alpha = \cos \beta \cos \lambda$$

$$\cos \delta \sin \alpha = -\sin \varepsilon \sin \beta + \cos \varepsilon \cos \beta \sin \lambda$$

$$\sin \delta = \cos \varepsilon \sin \beta + \sin \varepsilon \cos \beta \sin \lambda$$

ただし、 $\varepsilon = 23^\circ 26'$ (軌道傾斜角)

このうち、第1式、第2式より

$$\tan \alpha = (-\sin \varepsilon \sin \beta + \cos \varepsilon \cos \beta \sin \lambda) / \cos \beta \cos \lambda$$

となるので α を、また第3式より δ を求めることができる。

なお、 α 、 δ の値について正負の不定性が残るが、これは実際に表示してみて、手動で符号を入れ替えた。

α 、 δ から XYZ を求めるには、以下の図を参照すると

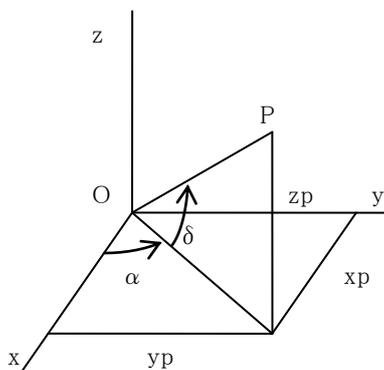


図6 赤道座標系から直角座標系への変換

$$x = r \cos \delta \cos \alpha$$

$$y = r \cos \delta \sin \alpha$$

$$z = r \sin \delta$$

より求めることができる。ここで r は太陽からの距離で、元データの RAD_AU に相当する。

6. 撮影枠の描画

エンディングの場面で、ボイジャーが写した太陽系全体の写真を紹介した。この写真を演出上効果的に紹介するため、バーチャリウムの太陽系の描画機能を用いて撮影日時の太陽系の惑星配置を再現し、そこに実際に撮影した写真を重ね合わせた。

この際、描画の視点位置は、撮影日のボイジャーの

赤経・赤緯を前項の方法により計算し、視点方向が太陽の方向を向くよう、赤経・赤緯とも180度反対方向に設定した。

さらに、写真を表示する前に、下記のような枠だけで背景が透明な png 画像を38枚用意した。これらの画像は、順番に端から枠を1つずつ増やしていったものになっている。これを0.1秒ずつ交代で表示していくと、いかにも連続的に写真を撮影している雰囲気を出すことができる。

最終的にこの枠を重ねて、実際の写真を表示することで、より効果的にボイジャーが撮影した写真を紹介することができる。

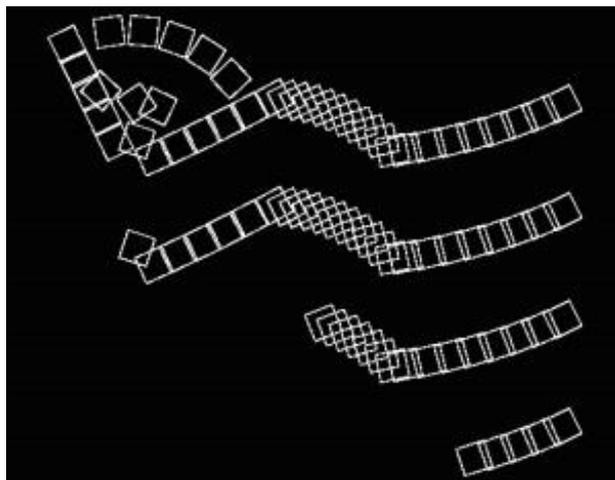


図7 撮影枠の一例

7. おわりに

1970年代終わりから80年代にかけて、私たちに驚くような写真を届けてくれたボイジャーは、現在でも旅を続けており、宇宙の空間的・時間的広がりを感じさせてくれる探査機である。

番組の製作に当たっては、豊富な写真とプラネタリウムの演出機能を用いることで、まさにボイジャーと一緒に旅をしているような感覚を出すことを目指した。

私たちの宇宙観を変え、現在につながる惑星科学の成果を、ボイジャーの探査を紹介することで、来館者に伝えることができると考えている。