

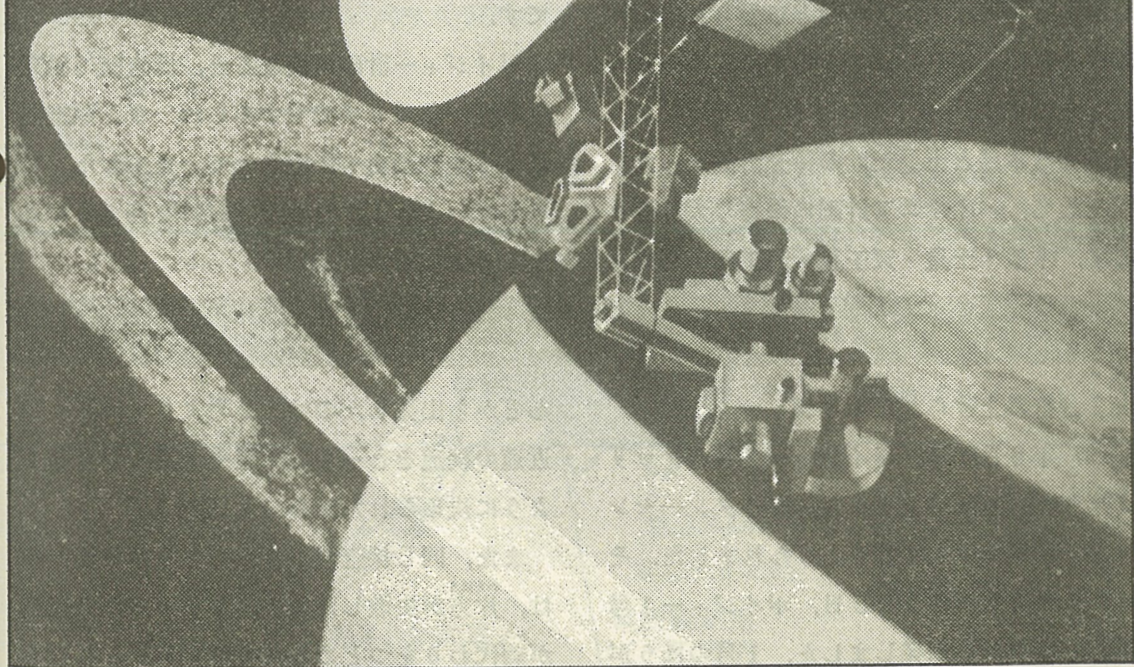
特集

# ボイジャーの 太陽系大旅行

小森 長生

今年8月25日、アメリカの惑星探査機ボイジャー2号が、ついに最後の目標である海王星への接近をはたし、大きな成果をおさめました。思えば、ボイジャー2号が地球を飛び立ったのは、1977年8月20日のことでした。それから12年あまり、途中で故障によるいく多のトラブルもありましたが、それを見事に克服し、木星・土星・天王星・海王星という、四つの遠い惑星を無事訪ね終えたのは、惑星探査はじまって以来の快挙といえます。

ここに、ボイジャーの12年間の足あとをふりかきながら、どんな成果が上がったかをまとめてみましょう。



# I ボイジャー計画の誕生

★★

## ★未知の惑星に向けて

12年前にボイジャー探査機が打ち上げられたのには、それなりの理由がありました。

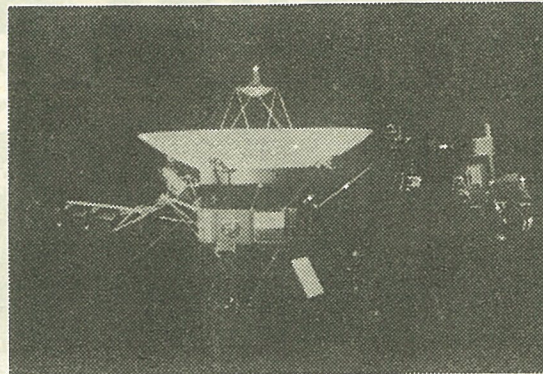
1960年代の終わりまでに、地球に近い金星・火星それに月などには、多くの探査機が送られていましたが、木星から先の遠い惑星にはまだ人類の手はとどいていませんでした。

その一方で、1982年ごろには太陽系の九つの惑星が、95°以内の角度の方向に集まることになっており(いわゆる惑星直列の時期)、木星以遠の惑星を渡り歩くように探査機を飛ばすには、絶好の機会がやってきつつありました。

これらの理由で、アポロ11号が月に到着した1969年から、木星や土星などの外惑星を探査する計画が、アメリカ航空宇宙局(NASA)の手ですすめられました。1972年と73年に打ち上げられ、73年と74年にそれぞれ木星を通過したパイオニア10号と11号(11号は79年に土星にも接近)は、その手はじめての試みだったのです。

## ★最初は木星と土星だけの探査計画だった

そして、パイオニア計画につづく大計画として、木星・土星・天王星・海王星・冥王星



ボイジャー探査機

を次々に訪れる「グランドツアー計画」を立てられました。しかしそのころから、NASAの予算が減らされはじめたため、せっかくのグランドツアー計画も縮小せざるをえなくなり、木星と土星だけに探査の焦点をしばった「マリナー・ジュピター・サターン計画」として、アメリカ議会で承認されました。これが最終的に、1972年に「ボイジャー計画」(ボイジャーとは航海者の意味)となったのです。

ボイジャー計画が決まると、探査機の研究と開発が急ピッチですすめられ、また探査機による観測項目も決定されていきました。こうしていよいよ、打ち上げの日を迎えることになりました。

# II ボイジャー1号と2号の出発

★★

## ★2台打ち上げられたボイジャー

1977年8月20日、ボイジャー2号がフロリダ州ケープカナベラルから、タイタンセンターロケットで打ち上げられました。それから半月あとの9月5日、ボイジャー1号が同じ場所から出発しました。1号のほうが

あとから出発したのは、2号よりも外回りの近道の軌道をとって、木星や土星に早く着くように決められたからです(図1)。

また、同じ探査機が2台打ち上げられたのは、片方が失敗したとき、もう一方の探査機が肩代わりをつとめるためですが、どちらも

うまくいけばより充実した観測ができるわけで、それはたいへん喜ばしいことです。ボイジャーにかぎらず、金星や火星の探査機も、たいへん2台が一組になって打ち上げられています。

## ★ボイジャーの構造

さてここで、ボイジャーとはどんな探査機なのかを見ておきましょう。全体の構造は図2のとおりで、重量は824kgあります。まず、ボイジャーの動力源は原子力発電器です。ボイジャーが飛行する宇宙空間は、太陽からしだいに遠くなるので、太陽の光はとても弱くなり、いままでの探査機のように、太陽電池を使ってエネルギーを得ることができません。それで原子力発電器が使われたわけです。

観測装置は、図2にみられるように、たくさんのものがありますが、みなさんが一番関心があると

思われる、カメラについて説明しておきましょう。ボイジャーは広角と望遠の二つのテレビカメラをつけており、広角カメラは焦点距離200mm、F3.5、望遠カメラは焦点距離1500mm、F8.5の光学系をもっています。

画像を送るテレビシステムの走査線は800本、1本あたりの画素の数は800個なので、1画面あたり64万個の信号をデジタル信号に変えて、地球に送ってくるのです。また、カ

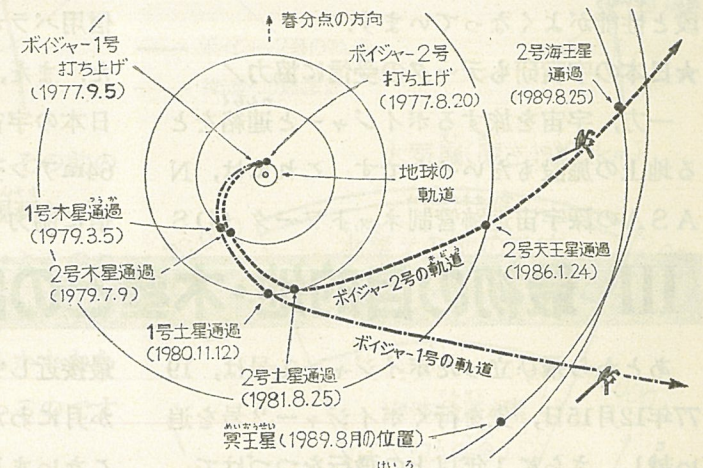


図1 ボイジャー1号と2号の飛行経路

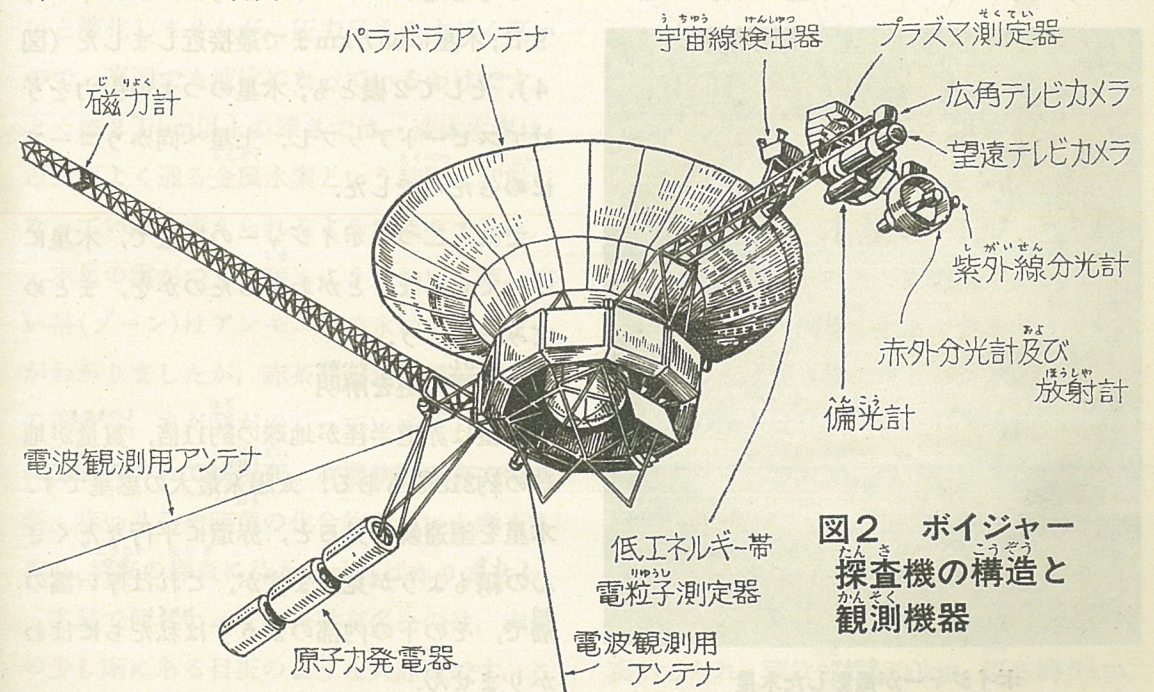


図2 ボイジャー探査機の構造と観測機器

メラには透明・紫外・紫・青・緑・オレンジなど、いろいろなフィルターが回転円板についています。このうちとくに、青・緑・オレンジの3色のフィルターでとった同じ画像は、地上で合成されて、すばらしいカラー画像が組み立てられたのです。

ボイジャーの撮影システムは、火星や金星の探査をした、マリナー型探査機のテレビカメラを改良したのですが、それらよりも一段と性能がよくなっています。

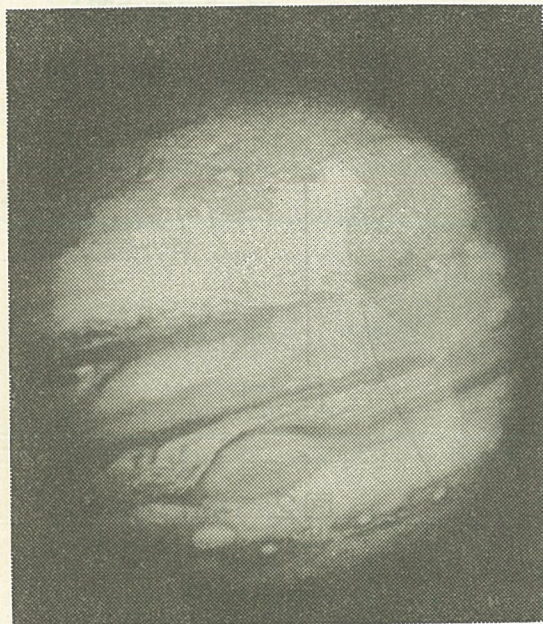
★日本の宇宙研もデータの受信に協力ノ

一方、宇宙を旅するボイジャーと連絡をとる地上の施設もたいせつです。これには、NASAの深宇宙追跡管制ネットワーク(DS

### III 最初の目的地・木星との出会い



あとから飛び立ったボイジャー1号は、1977年12月15日、先を行くボイジャー2号を追い越し、さらに1年以上の飛行をつづけて、1979年3月5日、ついに木星へ28万kmまで



ボイジャーが撮影した木星

N)が使われました。このシステムは、カリフォルニア州ゴールドストン、スペインのマドリッド、オーストラリアのキャンベラの3か所にあり、お互いに経度で120°ずつはなれた、地球を3等分する位置にあります。

これらの場所には、直径64m(海王星に接近のとき70mに拡大された)のデータ受信用パラボラアンテナと、直径26m(これも、天王星に接近のとき34mに拡大)の指令電波送信用パラボラアンテナがあり、大活躍しました。また、今回の海王星接近にさいしては、日本の宇宙科学研究所白田宇宙空間観測所の64mアンテナやその他の施設も、データの受信に協力しました。

最接近しました(図3)。そして、その前後数か月にわたって、たくさんの観測や撮影をおこないました。

1号を追うボイジャー2号は、1979年7月9日、木星に65万kmまで最接近しました(図4)。そして2機とも、木星のつよい引力をうけてスピードアップし、土星へ向かうコースにのったのでした。

では、二つのボイジャーの接近で、木星についてどんなことがわかったのかを、まとめてみましょう。

★大赤斑の謎を解明

木星は赤道半径が地球の約11倍、質量が地球の約318倍もある、太陽系最大の惑星です。木星を望遠鏡で見ると、赤道に平行なたくさんの縞もようが見えますが、これは厚い雲の層で、その下の内部のようすは私たちにわかりません。

図3 ボイジャー1号の木星接近のようす

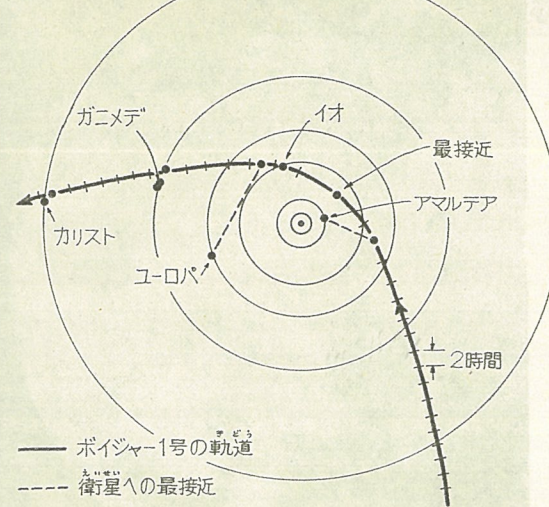
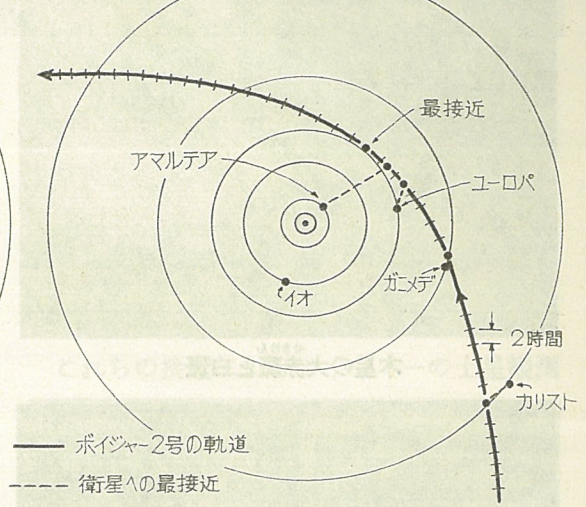


図4 ボイジャー2号の木星接近のようす



けれども、ボイジャー1・2号とその前のパイオニア10・11号による重力場観測などによって、木星の内部について、おおよそそのことがわかってきました。それによると、木星の内部は、かなりの高温であるにもかかわらず、液体水素の海が、ひろがっているのです(図5)。

水素は1気圧のもとでは、-252.8°Cでないと液化しませんが、圧力がものすごく高いので、高温でも液体になっているわけです。とくに2万km以上の深さでは、液体水素は、電気がよく通る金属水素という特別な状態になっていると考えられるようになりました。

木星の雲がつくる縞もようについては、白い帯(ゾーン)はアンモニアの氷粒であることがわかりましたが、赤茶けた色の縞(ベルト)の部分には、まだ謎がのこっています。赤茶色の原因については現在、有機物説が有力ですが、赤いリンや硫黄の化合物だという考えもあり、将来の探査に待たなければなりません。

木星で何といっても一番有名なのは、赤道の少し南にある目玉のような大赤斑です。こ

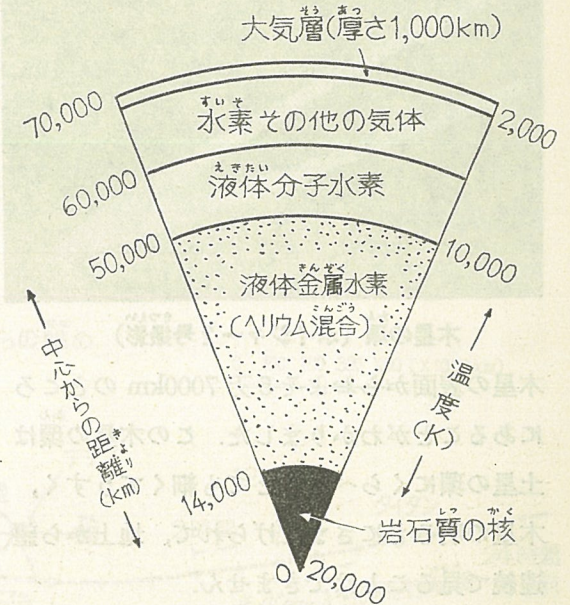


図5 木星の内部

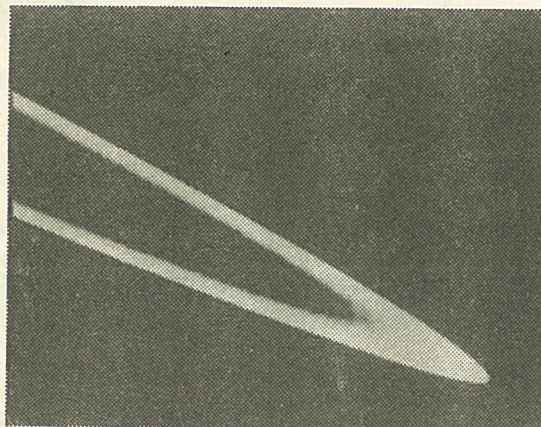
れは、ボイジャーのとった連続写真から、時計の針と反対方向にまわる、台風のような巨大な風のうず巻き構造だとわかりました。

★木星の環をはじめ、多くの大発見

ボイジャーの大発見の一つは、木星の環です。1号が最接近した前日の3月4日にとられた写真のなかに、環の一部が写っていたのです。このため、2号ではさらにくわしい写真がとられ、環は幅約5800km、厚さ約5km、



木星の大赤斑と白斑

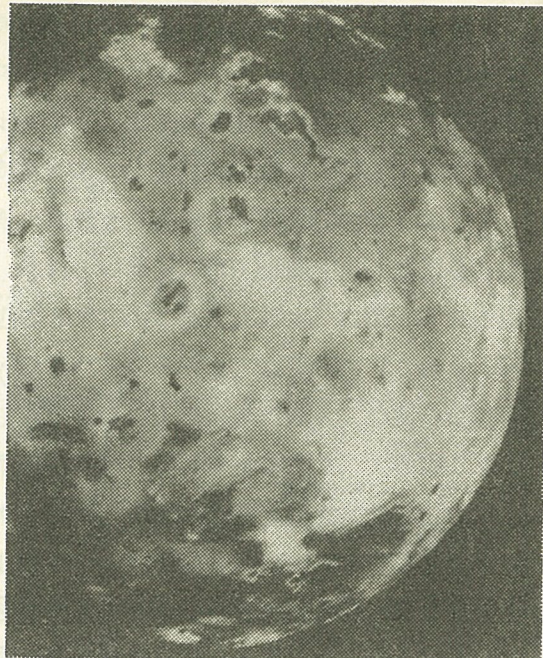


木星の環 (ボイジャー2号撮影)

木星の表面からおおよそ5万7000kmのところにあることがわかりました。この木星の環は土星の環にくらべるととても細くてうすく、木星の明るさにさまたげられて、地上から望遠鏡で見ることにはできません。

ボイジャーは木星の衛星についても、いく多の新しい発見をしました。そのなかでも最大の発見は、イオの活火山でしょう。1979年3月4日、NASAジェット推進研究所の女性技師リンダ・モラビトさんは、ボイジャー1号から送られてきたイオの画像をしらべているとき、イオの地平線から、巨大な雨傘状の噴煙が上がっているのを発見したのです。

ボイジャー1・2号の観測で明らかになった活火山は、あわせて10個になりますが、そ



木星の衛星イオ

のほかにも火山でできた地形が、イオの表面にたくさん見つかりました。活火山はどれも硫黄のマグマを噴きあげ、噴煙の高さは最大300kmにも達していました。こんなすごい活火山は、地球上にはどこにもありません。

イオは地球の月とほぼ同じくらいの大きさの衛星です。月はとうの昔に冷たくなっているのに、イオはなぜいまでも熱く、活発に活動しているのでしょうか。そのわけは、イオの軌道がいびつな楕円のため、イオと木星の間にはたらくつよい引力が変化し、それによってイオの形が周期的にゆがんで、内部に熱が生じるのだろう、と考えられています。ちょうど、ゴムまりをもんでいると熱くなってくるのと同じことです。

それにしても、地球以外の太陽系の天体に活火山が見つかったのは、はじめてのことで、惑星探査の歴史にのこる大発見といえるものでした。

## IV 土星の環をかすめて

★★

### ★美しい環の正体解明へ

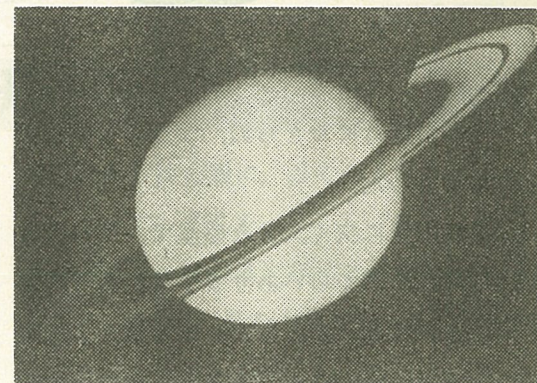
木星をあとにしたボイジャー1号と2号は一路、土星をめざして飛行をつづけました。1980年8月22日、土星からまだ1億6000万km以上もはなれたところから、早くも観測がはじまりました。8月24日、1500mmの望遠カメラではじめてとらえた土星の画像は、地球上のどの望遠鏡で見るとよりも鮮明で、土星の縞や環の細かい部分までもが、よく見分けられるものでした。

11月12日、ボイジャー1号はついに、土星の雲の頂上から12万4200kmのところを通過しました(図6)。そのあと1号は軌道修正をうけて、こと座のベガ(織女星)の方向へむかって太陽系を脱出する旅にうつりました。

一方のボイジャー2号は、1981年8月25日、

土星の雲の頂上から10万1000kmのところを、環の北側から南側にむかって、南半球に回りこむように接近・通過しました(図7)。そしてこのあと、土星の引力で加速され、方向も曲げられて、天王星へ向かう軌道に入ったのです。

これらの接近によるボイジャーの土星観測



ボイジャー1号が撮影した土星

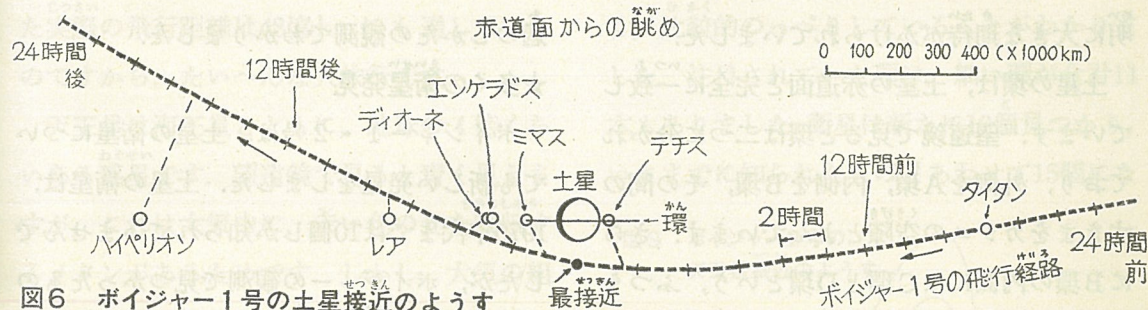


図6 ボイジャー1号の土星接近のようす

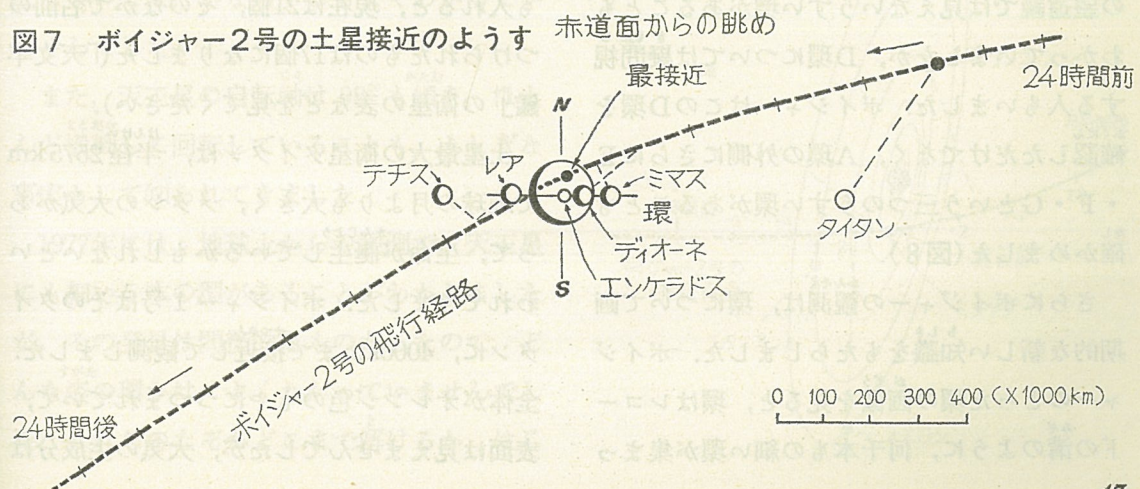
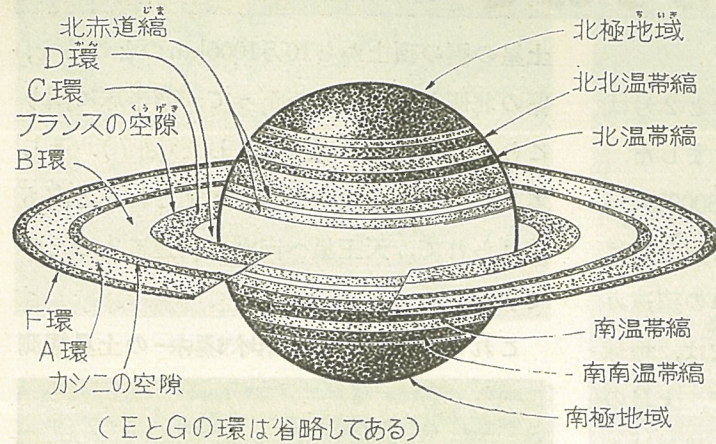


図7 ボイジャー2号の土星接近のようす

図8 土星の表面と環の構造



は、木星の場合におとらぬ、すばらしい成果をおさめました。

土星は木星に次ぐ大きな惑星で、その大きさは地球の9倍くらいあります。性質（内部が液体水素であることなど）は木星とよく似ていますが、何といても有名なものは、あの美しい環で、こんどの探査でも、環の正体解明に大きな期待がかけられていました。

土星の環は、土星の赤道面と完全に一致しています。望遠鏡で見ると環は二つに分かれており、外側をA環、内側をB環、その間のすきまをカシニの空隙とよんでいます。さらにB環の内側にはC環とD環という、ふつうの望遠鏡では見えないうすい環があることもわかっていましたが、D環については疑問視する人もいました。ボイジャーはこのD環を確認しただけでなく、A環の外側にさらにE・F・Gという三つのうすい環があることも確かめました(図8)。

さらにボイジャーの観測は、環について画期的な新しい知識をもたらしました。ボイジャーのとった環の画像を見ると、環はレコードの溝のように、何千本もの細い環が集まっ

環の名前と環の半径

名前	環の半径 (土星の半径=1)
D環	1.11~1.21
C環	1.21~1.50
フランスの空隙 (ボイジャー1号の発見)	1.50~1.53
B環	1.53~1.95
カシニの空隙 (望遠鏡で見える)	1.95~2.01
A環	2.10~2.26
エンケの空隙/A環中 (望遠鏡で見える)	2.21
パイオニアの空隙 (パイオニア11号の発見)	2.26~2.33
F環	2.33
G環	2.8
E環	3.5~5.0

ています。しかも環の表面はけっしてなめらかではなく、ざらざらしているように見えます。これは、環が細かい粒子の集まりであることを物語っています。

環をつくる物質はおもに氷の粒で、B環では粒の大きさは数ミクロン程度、C環では1m以上の大きなものもあることが、電波の通過のしかたの観測でわかりました。

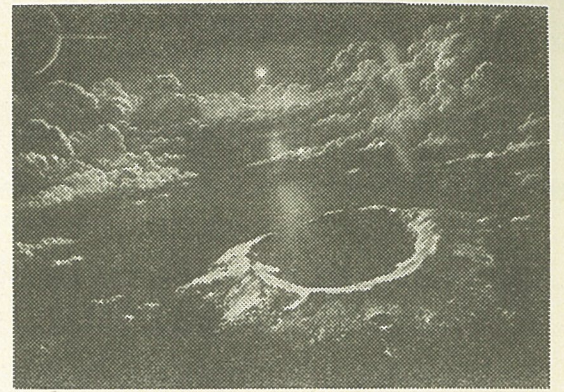
★多くの衛星発見

ボイジャー1・2号は、土星の衛星についても新しい発見をしました。土星の衛星は、1970年代までは10個しか知られていませんでしたが、ボイジャーの観測で見つかったものも入れると、現在は21個、そのなかで名前つけられたものは17個になりました(「天文年鑑」の衛星の表などを見てください)。

土星最大の衛星タイタンは、半径2575kmで地球の月よりも大きく、メタンの大気があって、生命が誕生しているかもしれないといわれてきました。ボイジャー1号はそのタイタンに、4000kmまで接近して観測しました。全体がオレンジ色のもやにつつまれていて、表面は見えませんでした。大気の主成分は

窒素でメタンは少ないこと、表面は $-180^{\circ}\text{C}$ という低温であることを確かめました。こんな寒い世界では、生命は生まれていそうにありません。

最初の計画では、もしボイジャー1号でタイタンなどの観測がうまくできなければ、2号が代わっておこなうことになっていましたが、1号の観測が成功したので、2号は天王星と海王星へも向かうことが、正式に決まりました。こうしていよいよ、太陽系グランド



衛星タイタン想像図

ツアーが実現することになったのです。

V なぞいっぱいのお天王星 ★★

★ボイジャー2号だけで天王星へ

1号と別れて孤独な旅をつづけてきたボイジャー2号は、1986年1月24日、天王星に最接近し、雲の頂上から8万1600kmのところを通過しました(図9)。地球から天王星までは直線距離で29億km、木星と土星を経由した実際の飛行距離は48億kmにも達していたのですから、たいへんな大旅行です。

天王星は海王星とともに、地球の4倍くらいある惑星です。望遠鏡で見ると青く見えますが、これは大気中に、赤い色の光を吸収するメタンがあるためです。しかし、大気の組成については、かならずしもよくわかっていませんでした。

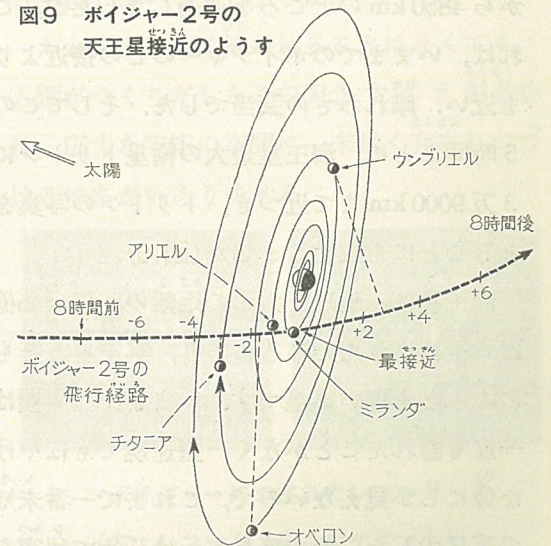
また、天王星の自転軸は $98^{\circ}$ も傾き、ほとんど横倒しに回転していることも、ふしぎな事実として知られてきました。

1977年には、地球上からの観測で、天王星にも細い5本の環があることがわかりましたが、その発見は間接的なものだったので、どんな姿の環かは、よくわかっていませんでした。これらのなぞがどこまで解けるか、はじ

めて訪れる探査機に、多くの人たちが胸をふくらませていました。

ボイジャー2号は、期待にたがわぬ成果をあげました。天王星の大気の主成分は水素で、ヘリウムとメタンが少しあること、表面は、木星に見られるような縞もようはほとんどなく、比較的のっぺりしていることがわかりました。注目されていた環は、細い環が合計11本もありました。衛星は新たに10個見つかり、いままでに知られたものとあわせて15個にな

図9 ボイジャー2号の天王星接近のようす

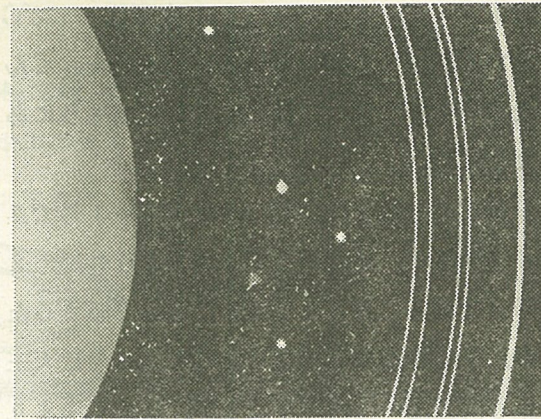


りました。

さらに大きな発見は、天王星にも地球と似た磁場があること、ただし磁気の軸は自転軸と55°も傾いている、という事実です。なぜこうなっているのか、その原因は、自転軸の横倒しの原因とともにまだわかっていませんが、これからの重要な研究課題となるでしょう。新しい発見は、つぎの新しいなぞを生みだすのです。

### ★興味深い衛星ミランダ

天王星の衛星も、それぞれ興味深い顔つきをしていました。とくにふしぎなのはミランダという衛星で、多くの溝や谷、断層がはし



天王星の環

り、かつて氷の地殻に大変動があったことを示しています。これらの衛星群も、これからの大いなる研究対象として注目されています。

## VI ついに最後の目的地・海王星へ

★★

### ★もっとも遠い惑星・海王星の秘密に迫る！

天王星の重力をうけてさらにスピードをあげ、海王星に向かっていたボイジャー2号は1989年8月25日、ついに海王星に最接近をいたしました。

ボイジャー2号は、日本時間で8月25日午後0時55分、海王星の北極の上、雲の層の頂から4850kmのところを通過しましたが、これは、いままでのボイジャーのどの接近よりも近い、離れわざの芸当でした。そしてこの5時間あとに、海王星最大の衛星トリトンに3万9000kmまで近づき、トリトンの写真をとることに成功しました(図10)。

海王星は、地球と太陽の距離の30倍(45億km)もはなれたところにあり、冥王星よりもっとも遠い惑星です。いままで探査機は一度も訪れたことがなく、望遠鏡でもぼやけた像にしか見えないので、これまで一番未知の惑星でした。その惑星が、はじめて秘密を

明かしてくれたのです。

海王星も、天王星と同じく青い色をしています。その大気組成は、天王星とよく似ていて、ボイジャー2号の観測で、水素85%、ヘリウム13%、メタン2%であることがわかりました。

ところが、海王星の大気は天王星よりもはるかに活発な運動をしていて、赤道付近では秒速180mという、ものすごい強風が吹いていることがわかりました。また、南半球には大黒斑が見つかり、これは木星の大赤斑と同じような、巨大な嵐ではないかと考えられています。大黒斑のまわりなどにある白い雲も印象的です。

海王星の自転周期はいままではっきりしませんでしたでしたが、ボイジャー2号の観測で16時間であることがわかりました。磁場も見つかりましたが、天王星と似て、磁気の軸が自転軸から50°も傾いており、その原因が問題に

なっています。

さらに、海王星にも細い環が、少なくとも4本あることがわかりました。いままでの観測から、海王星の環は、ちぎれた円弧状のものではないかと考えられていましたが、どれも、きちんとつながった環のようです。

### ★期待されたトリトンの観測

海王星の本体以上に面白いのは、衛星のトリトンでしょう。液体窒素の海があり、生命がいるかもしれないといわれたトリトンは、冷たく凍りついた複雑な表面をもっていました。2号の観測によると、トリトンの表面温度は-236°Cで、大気は100分の1ミリバール程度とわずか、こんな極低温の世界では、生命の誕生は無理だっただろうと考えられます。

トリトンで興味深いのは、液体窒素のマグマを噴きだしてできたと思われる、火口と火山噴火のあとが見つかったことです。これが本当に活火山だとすると、トリトンの内部に

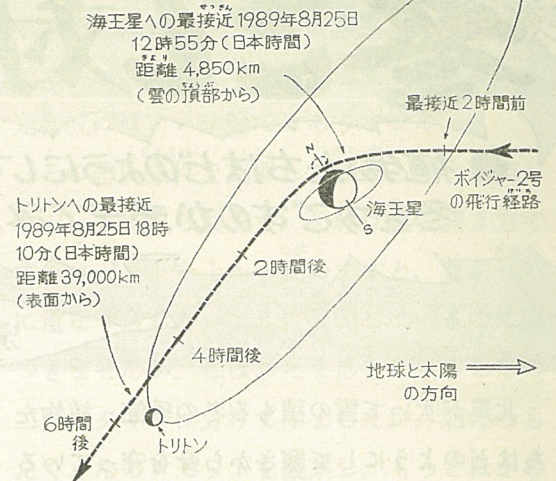
## VII はるかなる暗黒の宇宙へ

★★

太陽系大旅行を終えたボイジャー2号は、いま1号とは正反対の方向に、太陽系を脱出しようとして飛びつづけています。原子力発電機はまだ生きており、当分宇宙空間の観測はつづきますが、やがてそれも切れて、2015年ごろには通信できなくなってしまうでしょう。

しかし、2台のボイジャーには、他の恒星をまわる惑星に住む、知的生命にあてた手紙がとりつけられています。その手紙とは、金メッキされた銅製のレコードで、説明のついたケースに入れ、再生のための針もつけられています。レコードには、地球の55の言語や生物の鳴き声、116枚の映像がおさめられて

図10 ボイジャー2号の海王星への接近のようす



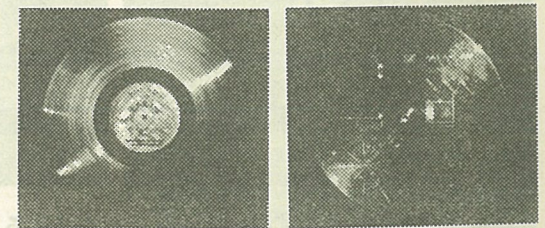
はどんな熱源があるのでしょうか。

衛星は新しいものが六つ見つかり、いままでの2個とあわせて8個になりました。まだまだあるかもしれません。

ボイジャー2号の新しい観測データにもとづいて、海王星とトリトンの研究は、これから大いにすすむでしょう。

います。いつの日か、このレコードを手にする宇宙人はいるのでしょうか。

たとえ宇宙人に拾われることはなくても、人類がつくりだしたこの記念すべき創造物は、広大な宇宙の空間に、末長く存在しつづけるにちがいありません。



ボイジャーにつままれたレコード (左:レコード 右:ジャケット)