

# ガリレオ、木星に到着

— プローブが明らかにした大気 —

佐々木 晶<sup>1</sup>

## 1. ガリレオの旅

長い長い旅だった。1989年10月に打ち上げられてから6年余り、ガリレオはついに木星に到着した。木星へ行くエネルギーを得るために、金星に1回、地球（月）に2回、Fly-byを行なう複雑な軌道を取り、その間、小惑星GaspraとIdaにも接近遭遇した。また、1994年7月のシューメーカー＝レビー第9彗星の木星衝突の時には衝突点を直接に観測した。高利得アンテナが開かないというトラブルのため、データ転送速度は非常に小さく、木星からでは10bps(bit per second)である。それにも関わらず、様々な面白いデータを送ってきた。昨年の夏には木星から放出されている大量の高速ダスト粒子（1日数万個を計測！）を捕らえている。

ガリレオには、木星の周囲を長楕円軌道で周回して木星・衛星・周辺環境を調査する本機のほかに、大気に突入して木星内部を探るプローブが搭載されている。プローブは、昨年7月12日に木星から8000万kmの距離で本機から切り離されて、木星の重力に引かれて近づいていき、12月7日(日本時間では8日)に、木星大気に突入した。衝突地点は赤道近くの北緯 $6.57 \pm 0.5$ 度である。

昨年の10月11日には、データを蓄えるテープレコーダーが動かなくなるというトラブルが発生して、科学者をヒヤリとさせた。調査の結果、テープの一部に弱くなった部分があり、今後の運用はその部分を避けて記録・再生を行なうことになっ

た。高利得アンテナのトラブルのため酷使されたことが原因かも知れない。そのため、取得データ量がさらに制限されることになり、本機が木星に再接近する12月7日は、プローブのデータを確保するため、イオやエウロパの撮像はあきらめることになった。

## 2. プローブ

プローブの全体構成図が図1である[1]。プローブは木星大気に47km/sの高速で突入した。シューメーカー＝レビー第9彗星の衝突のとき、「これまで考えられなかった高速の衝突である」というコメントを覚えている人はいるだろう。プローブの総重量339kgのうち3分の2は、この50km/sに近い突入速度に耐えるためのシールドである。シールド

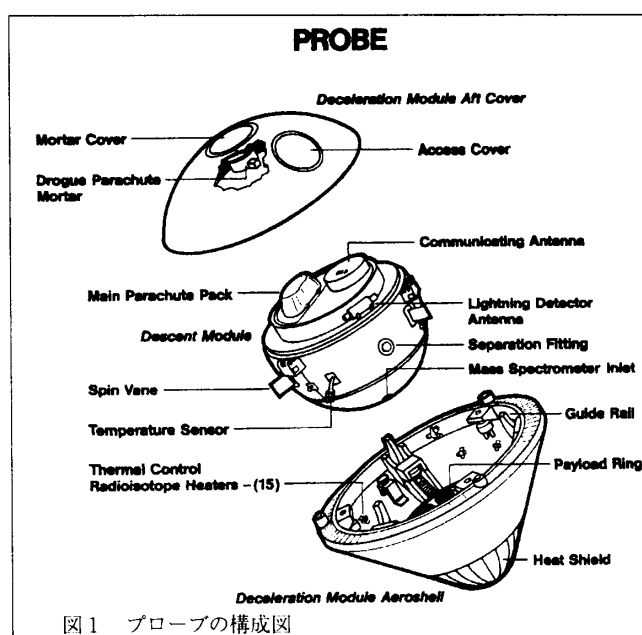


図1 プローブの構成図

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

の前面の温度は15000Kに達することが予想されたため、熱耐性のための実験は特別なfacilityを作って行われた。この高速の突入に耐えて、1km/s以下まで減速した後、プローブはパラシュートを開き、大気中を徐々に降下していった。プローブは無事に58分の間、0.4barから23barまでの木星大気の様々なデータを採取して、上空22万kmを通過する本機へ送ってきた。本機は、プローブ用リレーアンテナで受けたデータをテープレコーダーに一度記録して、その後地球へデータを転送する。低利得アンテナしか使えず転送レートが低いため、全てのデータはまだ到着していない。そのため、現在発表されている結果は予備的である、という注釈がついている。

プローブには、次の8種類の観測機器が搭載されている。科学機器の総重量は30kgである。

- ・中性質量分析機（大気組成）
- ・ヘリウム分析機
- ・大気構造分析機（加速度計、温度計、圧力計）
- ・レーザー雲粒計
- ・熱流量・光量計
- ・雷計測・電波放射計測機
- ・高エネルギー粒子計測機
- ・電波計測（風速・大気吸収）

観測機器のうち、高エネルギー粒子計測機は、大気突入前に木星近傍のプラズマ環境を測定するものである。木星周辺の強い高エネルギー粒子の放射線帯には探査機は、長時間滞在することはできない。ガリレオ本機は、はじめにイオの軌道程度まで接近したあとは、エウロパの軌道付近までしか木星に接近しないため、木星近傍の放射線環境を測定することはできない。そのため、高エネルギー粒子計測機もプローブに搭載された。観測の結果、木星のそばにも、非常に強い放射線帯（地球のVan Allen帯の10倍の強度）があることが判明した。

### 3. 大気の組成

#### (i) 水

木星の総質量の90%を占める外層は、水素・ヘリウムのガスである[2]。これ以外にも重い元素・化合物も含まれているが、代表的な水やメタンといった成分の濃度はこれまで不確定であった。ボイジャーの観測結果からは、当初は木星の $H_2O$ は太陽組成の1/50程度とされていたようだが、最近の(COの量からの?)見積もりでは太陽組成の2倍程度存在してもよいと考えられている。C/H $\sim$ CH<sub>4</sub>/Hは太陽組成の2倍という値が得られている。C/Hは土星では太陽組成の5倍、天王星、海王星では20-50倍と見積もられており、木星型惑星の外層に溶け込める水成分の量はかなり多い。

シューメーカーレビー第9彗星の衝突のとき、COや $H_2O$ が赤外領域で観測された。これが、木星大気起源かそれとも彗星起源か、という議論はこれまで決着していなかった。木星大気起源ならば、相応量の水が木星大気に含まれているはずである。 $H_2O$ を観測したBjorakerは、これは彗星起源であると主張していた。一方で、彗星衝突痕の波の伝搬

表1 木星の大気組成

ヘリウム	7%
メタン	0.1%
アンモニア	0.2%
水	0.2%
ネオン	20ppm
有機物	10ppm
リン化物	0.5ppm
硫化水素	20ppm
アルゴン	5ppm
クリプトン	10ppb
キセノン	10ppb

(Galileo Probeのプレスリリースのデータより。ただし、ヘリウムのデータはヘリウム分析機の研究代表者von Zahnのコメント[6]より。)

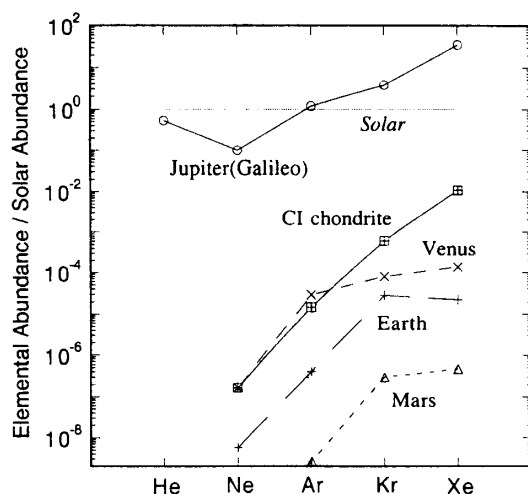
速度は、木星大気中の水の相対濃度( $\text{H}_2\text{O} / \text{H} \sim \text{O} / \text{H}$ )が太陽組成の10倍程度あって大気中に波を伝える安定層が存在することで説明できる、という考えがCaltechのIngersoll and Kanamoriにより提出されていた[3]. 昨年の学会ではIngersollは自信たっぷりに、「木星内部の水の量について10ドルの賭をしよう」と聴衆に提案していた。もし、ガリレオのデータの水の量が太陽組成の5倍以上であれば、彼の勝ち、それ以外であれば負け、という賭である。彼の曰く、「自分と同じ方に賭けても構わないが、名誉を共有するだけで、上がりは全部自分がいただく」と。

さて、ガリレオのプロープの中性質量分析機は、大気中の水は太陽組成程度しか存在しないことを明らかにした(表1)。またメタンの濃度もこれまで考えられていたよりは低かった。この値をそのまま使うと、シューメーカー=レビー第9彗星の衝突直後に観測された、 $\text{CO}$ や $\text{H}_2\text{O}$ は彗星起源でないと説明は難しそうである。何人か(例えばBjoraker)は賭に勝ったと喜んでいるようだ。また、賭けておけば、と思っている人(たとえば高田淑子氏)もいるようである。一方で最外層の雲を構成するアンモニアは、太陽組成以上の濃度で

存在していることが確認された。

木星は、氷微惑星の衝突で成長した地球質量の10倍程度の固体核の周囲に重力的に引きつけられたガスが不安定になり、急速( $\sim 105$ 年)に軌道上の大量のガスが集積して形成されたと考えられている[4, 5]. 木星に集積した水素・ヘリウムガスは、もともとは太陽組成の原始太陽系円盤ガスから固体成分が凝縮して抜けたもので、固体成分の濃度は太陽組成より低いはずである。しかしガスが集積した後の木星に、引き続いて氷微惑星の集積があれば、外層のOやCの濃度は太陽組成やそれ以上になっていても不思議ではない。また、形成の過程で中心核から氷の成分が出てガスの外層と混合することも考えられる。実際、天王星や海王星では、このようにして水素・ヘリウムの外層に大量の水成分が溶け込んでいると考えられている。今回のガリレオのプロープの結果は、木星では、形成後の氷微惑星の集積や中心核からの氷成分の溶け出しが少なかったことを示している。しかし、あとで述べるように、衝突地点がたまたまOやCの濃度の低い地点であり、木星全体としてはOやCの濃度はもっと高い、という考えもある。

図2 木星大気の希ガス存在度パターン  
(その他のデータはPepin 1991 [11]より)



## (ii) 希ガス

大気組成は質量分析機で測定されたが、ヘリウムについてはJamin-Mascart干渉計による測定も行われた。このヘリウム分析機は標準試料と木星大気ガスとの屈折率の違いを干渉計で比較することで、ヘリウムの濃度の違いを正確に測定する。測定されたヘリウムの濃度は太陽組成の半分程度で、ボイジャーの観測から予想された値よりも低かった[6]. 木星大気では土星と同じくヘリウムが減少している。巨大ガス惑星内部の金属水素領域では水素とヘリウムは不混和現象を起こすため、重いヘリウムが分離・沈降することが予想されている[5, 7]. そのため、金属水素領域の最上部から徐々に

にヘリウムが沈降して、外側のヘリウム濃度を減少させる。土星では、 $\text{He} / \text{H}$ は太陽組成の1/4程度であることが確認されていて[8]、ヘリウム分離による重力エネルギー解放が土星の放射温度の高いことのよい説明になっていた。ヘリウムが少ないことで、木星内部での水素・ヘリウムの不混和現象進行の条件から、深部の温度構造に制約が加わる。金属水素への転移圧力である3百万気圧で1万度以下と予想される。またヘリウムの重力分離によるエネルギー解放の一部は、木星の内部対流の熱源になっているはずである。

図2に、太陽組成に対する、希ガスの相対存在度の比を、グラフにした。参考に、CIコンドライトの値、金星・地球・火星大気の値を描いている。今回のプローブの結果の一つの謎は、ネオンの濃度も太陽組成( $\sim 0.2\%$ )より非常に低かったことである。ヘリウムと同様に木星内部で分別をしているのだろうか。また、アルゴンはほぼ太陽組成の値である。

クリプトンとキセノンは、逆に太陽組成より高濃度である。隕石や惑星に取り込まれている希ガスの存在度パターンは、太陽組成に比べると右上がりの、重い希ガスに富んだパターンになっている。観測された $\text{Xe} / \text{Kr}$ 比(表の値はおそらくかなり不確定さがある)は、始原的な隕石に捕獲された希ガス(図2でCIコンドライト)の $\text{Xe} / \text{Kr}$ 比に近い。原始太陽系星雲内で氷が形成される(特に低温でのアモルファス氷)ときに、大量の希ガスを捕獲する可能性が指摘されている。このときにも重い希ガスが選択的に捕獲されると考えられている。おそらく氷微惑星には大量の希ガスが含まれているであろう。例えば、土星の衛星のタイタンの大気に内部から脱ガスした希ガス、特にアルゴンが数%含まれているという主張がある。木星の中心核からの脱ガスか、あとで集積した氷微惑星から脱ガスしたクリプトン、キセノンが木星大

気の組成に影響を与えているのであろう。これは、水が大気中に少ないという観測から得られる結論とは食い違う。

## 4. 大気の運動

プローブは0.4barより大気構造の測定を行なった。この結果は木星の上層が内部からの熱流で対流状態にあることを強く示している。大気上層の温度・密度は予想より高かった。0.4barでの温度は130Kで、ボイジャーで電波の掩蔽観測から求めた温度より10度ほど高い。大気の下部の6-15bar領域の温度分布は、水が少なく乾燥していて対流状態にあることを示している。大気の密度も深さによっては予想より100倍も高かった。最終的に600kmもぐった23barの圧力では温度は400Kを越えている。さらに、鉛直方向に上下の大気運動が観測されたことから、大気は乱流状態にあるらしい。

大気の風速は電波のドップラー効果から直接測定された。求めた風速は、雲の下でも150m/sと大きく、さらに深いところまで小さくなることはなかった。大気運動が外からの加熱(太陽光入射と木星熱放射の差を補うため赤道から極域への熱輸送が生じる)が原因で引き起こされる場合、大気の深部へ行くほど風速は弱くなるはずである。そのため風速が深部まで変化しないという観測事実から、冷却やヘリウム分離を原因として深部から外へ流出する熱が、大気運動の主要な駆動力であると、考えられる。

## 5. 雲の観測

熱力学的計算やこれまでの観測から、木星大気には外側からアンモニア( $\text{NH}_3$ )、硫化水素アンモニウム( $\text{NH}_4\text{SH}$ )、水( $\text{H}_2\text{O}$ )の雲が存在すると考えられていた。ガリレオのプローブのレーザー雲粒計では、濃い雲や霧は観測されなかった。アンモニアの雲は全く検知されず、わずかに硫化水素アンモ

ニウムの雲に対応する雲の構造だけが見つかった。水の雲は観測されていない。地上観測・HST観測によると、ガリレオのプロープの突入地点は木星のなかでも特別な雲のみられない領域であった。運の悪いことに今年の夏ごろからポツカリと突入予定地点に雲の穴があいてしまったそうである。雲粒計で検知できなかったのは実際にアンモニアの雲の存在しないところに突入したためであろう。光量計でモニターしている空の明るさは、アンモニアの雲に対応する領域で方向によって大きく変化した。これは、突入地点から離れたところには雲が存在して、方向によって空の明るさが変わっているためと解釈されている。どちらの測定にしても、当初考えられたような数barの深さでの水(H<sub>2</sub>O)の雲は発見されなかった。この結果も、木星大気中に水が少ないという他の観測とは矛盾しない。

また、プロープの雷計測機は、計測中に光のフラッシュを観測することは無かった。一方で電波計測機は、雷起源の弱いシグナルを多数観測したが、これは1万キロ以上離れたところで発生したと考えられる。頻度も地球よりも3-10倍少ない。これも雲の無い領域に突入したことと関係あるのだろうか。それとも、雷発生の機構が地球とは異なるのかは、まだ理解されていない。

## 6. 水の存否

はたして、プロープの測定した水の濃度は、木星大気の標準的な値なのだろうか、それとも、木星大気中の水が少ない領域にたまたま、突入したのだろうか。現在でも議論は続いている。SCIENCE誌の記事では“Galileo Hits a Strange Spot on Jupiter”というタイトルで、プロープは運悪く、雲のない「木星の砂漠」に突入してしまったという主張を載せている[9]。他の場所で雲を形成して乾燥した大気が、沈んで加熱を受ける領域にプロ

ープは入った。これは、木星表面のわずか1%の領域である。そのため、水が無い、というデータは木星全体を表すものではない、という意見である。しかし、木星の温度では凝結しないメタンの量も、これまでの観測結果の半分程度しかないのである。木星大気の水の量をめぐっては、今後も議論が続くであろう。

## 7. 現在そして将来

ところで、プロープのデータの一次解析の結果は、当初は昨年12月19日に公開（プレスリリース）される予定であった。

しかし、アメリカの予算の執行停止による、国家機関の業務中止により、大きく延期され、1月22日に行われた。私は毎日のようにWWWのサイト([http://ccf.arc.nasa.gov/galileo\\_probe/](http://ccf.arc.nasa.gov/galileo_probe/))をチェックしていて、延期と知ったときはとてもがっかりした。同じような方は他にもいるだろう。その間に、先走って（プレスリリースが行われることを前提として）研究代表者よりデータを得て、ニュースを流した雑誌もあった[10]。ここには「水は太陽組成の1/10しか無かった」と書かれている。

プレスリリースの段階でも、定量的なデータが提供されたのは一部で、表の大気の組成値も、だいたい値を表すものと考えておいたほうが良いだろう。現在、ガリレオ本機のテープレコーダーに記録されているより詳しい観測結果が送られてきている途中である。その結果、もっと様々なことが明らかにされるかも知れない。

ガリレオのプロープにより、これまで未知の点が多かった木星大気内部の貴重なデータが得られた。ガリレオ本機も、木星の周囲の観測を開始して様々なデータを採取している。アンテナのトラブルのためデータ転送速度が低いという大きなハンディキャップにもかかわらず、ガリレオは木星

と衛星・周辺環境についての貴重なデータを今後  
も送ってくるであろう。

### 校正への付記

ヘリウム分析機の科学者からの直接情報では、  
ヘリウムのモル濃度は13.6% (質量濃度で24%) で  
太陽組成とほぼ同じ、という結果が出ています。  
von Zahn氏の出したモル濃度が、質量濃度と勘違  
いされたため [6], 太陽組成の約半分 (7%) とい  
う値になってしまったと思われます。この結果は、  
木星内部ではヘリウムの分離が起きていない、と  
いうことを示します。

### 参考文献

- [1] NASA 1995: Galileo Jupiter arrival, press kit,  
Dec.. pp.41
- [2] Hubbard, W. B. 1984: Planetary Interiors,  
pp.334, van Nostrand Reinhold.
- [3] Ingersoll, A. P. and Kanamori, H. 1995: Waves  
from the collisions of Comet Shoemaker-Levy  
9 with Jupiter, *Nature* **374**, 706-708.
- [4] Mizuno, H. 1980: Formation of the giant  
planets, *Prog. Theor. Phys.* **60**, 699-710.
- [5] 小林直樹, 佐々木晶 1995: 木星型惑星の構  
造と起源, プラズマ核融合学会誌 **71**, 277-  
288.
- [6] Carlowicz, M. 1996: Jupiter's atmosphere defies  
predictions, *EOS (AGU)* **77** (Jan. 30) 37.
- [7] Stevenson, D. J. 1980: Saturn's luminosity and  
magnetism, *Science* **208**, 746-748.
- [8] Conrath, B. J. et al. 1984: The helium  
abundance of Saturn from Voyager  
measurements. *Astrophys. J.* **282**, 807-815.
- [9] Kerr, R. A. 1996: Galileo hits a strange spot on  
Jupiter, *Science* **271** (Feb.2) 593-594
- [10] Cowen, R. 1995: Inside Jupiter: *Probe's early  
results, Science News* **148**, (Dec. 23&30) 420.
- [11] Pepin, R. O. 1991: On the origin and early  
evolution of terrestrial planet atmospheres and  
meteoritic volatiles, *Icarus* **92**, 2-79.