

明るみに出たタイタンの秘密

惑星研究家 小森 長生

1. はじめに

アメリカ航空宇宙局 (NASA) とヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の共同ミッションである土星探査機「カッシーニ」は、7年間におよぶ長期飛行の末に、2004年7月1日ついに土星に到着し、土星周回軌道にのった。そしてその半年後の2004年12月24日、カッシーニに搭載された小型プローブ「ホイヘンス」が分離、放出された。ホイヘンスは2005年1月15日、土星最大の衛星タイタンの大気圏に突入、無事着陸に成功した。

これまでに土星を訪れた探査機は、パイオニア11号、ボイジャー1号、ボイジャー2号の3機であったが、これらはいずれも土星をかすめて通過（フライバイ）しただけで、観測時間は限られたものだった。それにくらべて今回のカッシーニは、土星を周回しながら長期間観測をつづけるという、一歩進んだ探査機である（当面4年間の観測計画が立てられている）。しかも、小型プローブをタイタンに着陸させるという、さらに意欲的な計画も含んでいた。これらが首尾よく達成されたことは、これまでにない快挙といえることができる。

では、カッシーニとホイヘンスはどんな成果を上げているのか。ここでは、ホイヘンスのタイタン着陸に焦点をあてて、その探査の様子と、わかってきたことのあらましをのべてみよう。

2. 秘密のベールにとざされてきたタイタン

まず、タイタンとはどんな天体か、これまでの知識を復習することからはじめよう。

タイタンは、オランダの物理学者・天文学者のクリスチアン・ホイヘンス（1629～1695）によって、1655年に発見された。

土星には現在数十個の衛星が知られているが、そのなかで最大のものがタイタンである。半径は2575kmもあり、太陽系内では木星の衛星ガニメデ（半径2631km）に次ぐ第2の大きさである。しかも、太陽に一番近い惑星の水星（半径2440km）よりも大きいのだ。ところがその一方で、平均密度は低く、 1.88g/cm^3 しかない。この値から、タイタンは、氷と岩石が半々に混じり合ったような天体だろうと考えられている。

タイタンの最大の特徴は、濃い大気をもっていることだ。1944年オランダ生まれのアメリカの天文学者G. P. カイパーは、タイタンにメタンを含む大気があることを、スペクトル観測からつきとめた。その後1980年からのボイジャーの観測によって、大気の組成や量についてのくわしいことが、ようやくわかってきた。

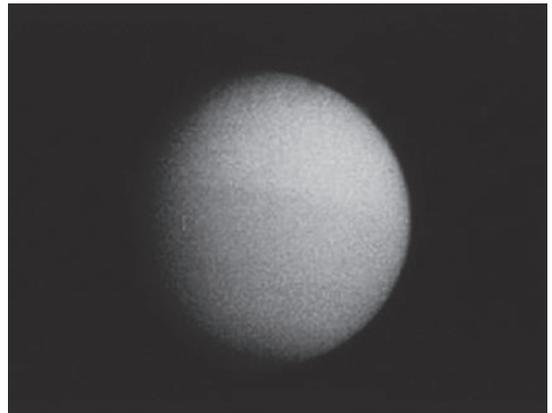


図1 可視光で見たタイタンの姿 (NASA, ESA)

それによると、大気の主成分は窒素 (N_2) で 90%以上、アルゴン (Ar) とメタン (CH_4) が数%程度存在する。その他いろいろな炭化水素なども微量成分として含まれている。

もう1つ注目すべき点は、タイタン表面の大気圧が約 1500hPa (地球大気の 1.5 倍) あることだ。タイタンの表面重力は、地球の $1/7$ 程度しかないから、表面気圧と重力の値から単位面積あたりの大気の量を求めると、タイタン大気は地球大気の 10 倍以上も濃いことになる。こんなに濃い大気をもっている衛星は他にない。

ボイジャー1号と2号はタイタンの近接写真を初めて撮影したが、それは全体が赤褐色のもやに包まれたぼやけたもので、地表の様子などはまったくわからなかった。太陽光によるメタンの光化学反応で生じた有機物のエアロゾル粒子が大気圏に浮かび、視界をさえぎっていたからである。

こんなわけで、タイタンの直接探査に大きな期待がかけられたのである。

3. ホイヘンスが見たタイタンの地表

カッシーニ本体から放出された小型プローブ「ホイヘンス」(重量 319kg) は、2005年1月14日、タイタン上空約 1000km の高度から大気圏に突入し、パラシュートを開いてゆっくり降下。約2時間半かけて地表に到着した。その間、大気の組成などの観測や地表の撮影をおこなった。

タイタンの太陽からの距離は、地球と太陽の距離の 10 倍近くもあり、タイタンにとどく太陽光は、地球がうけとる太陽光の数%程度にすぎない。しかも分厚いもやの層でつまれているので、タイタンの表面は昼間でもかなりうす暗いはずである。このため、ホイヘンスは地上 700m の高度まで降りてきたとき、下向きのライトを点灯し、撮影をつづけたのだった。

さて、厚いもやの層を通りぬけて地表に降りたホイヘンスは、そこにどんな世界を見たのだろうか。

白っぽく明るい丘陵地に刻まれた樹枝状の谷の暗いすじ。この谷をつくった流体は、暗く平坦な地域に流れていったかのようにみえる。そこにの

びる砂州のような地形もある。

「あまりに地球的だ」と多くの科学者が叫んだように、史上初めて見るタイタンの地表は、地球上で見なれた景観とおどろくほどよく似ていた。

地球上ではこのような地形は、たいてい水の流れによってつくられる。しかし、タイタンでは事情がまったく異なるのだ。タイタンの表面は 94K ($-179^{\circ}C$) という極低温の世界である。こんな環境では、水 (H_2O) はすべてガチガチの氷になっていて、液体の水など存在しえない。では何が谷をうがったのか。それは液体メタンなのだ。

じつはタイタンの表面温度は、メタンの三重点の温度 (気体、液体、固体の状態が同時に存在できる温度) 90.7K にひじょうに近い。このことから、タイタン大気中のメタンは、地球大気中の水蒸気と似たふるまいを示す。すなわち大気中で凝結してメタンの雲をつくり、そこからメタンの雨が降ると考えられるのである。したがって、ホイヘンスが見た樹枝状の谷地形は、メタンの雨が地表を流れて川となり、地面を浸食してできたものにちがいない。地球上とよく似た現象が、流水ではなく液体メタンによっておこっているのは興味深いことだ。

それにしても、メタンの雨が谷をうがったのが事実ならば、相当大量の雨がある時期に集中的に降ったことになるのではないかと考えられる。というのは、丘陵地帯などの白く輝く地表部分は、スペクトルのデータから H_2O を主成分とした氷 (純粋の水氷ではなく、いろいろな物質が混じっているというのが実態だろうが) と考えられ、しかもそれは極低温のために、花こう岩に近い硬さをもっていると推察される。このような硬い岩盤 (氷盤) に谷をうがつには、相当つよい浸食力が必要であろう。そもそも、炭化水素にたいして極度に不溶性の水氷地帯に、どうして谷が刻まれたのか。タイタンでおこった地表形成作用の解明は、これからの興味深い課題である。

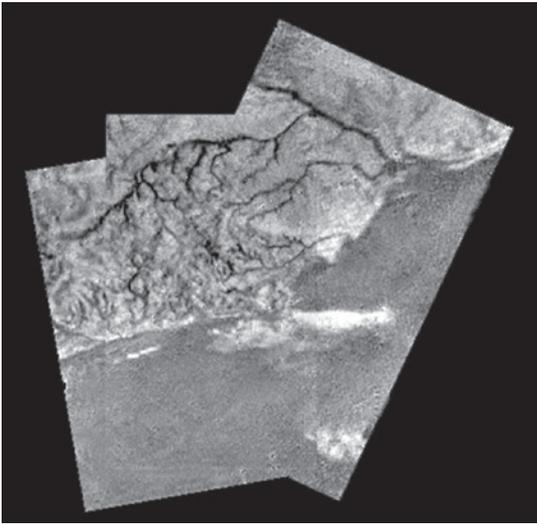


図2 樹枝状の谷が刻まれたタイタンの表面 (NASA, ESA)

4. メタンの海は存在するのか

タイタンの大地を流れて谷を刻んだメタンの雨は、当然ながら低地にたまり、水たまりならぬ“メタンだまり”をつくったにちがいない。実際、タイタンに液体メタンの海か湖がある、という考えは、近年かなり有力なものとなっていた。

タイタン大気の上層部では、太陽光との光化学反応によって、メタンから、エタン (C_2H_6) をはじめ、ソリン (tholins) と総称されるさまざまな炭化水素類 (有機物) が生成する。これらはメタンの雨に運ばれて地表に降り積もっているとも考えられる。とくにエタンは、タイタン表面の物理条件下では不揮発性の液体であり、メタンとよく混じり合う。こうしたことから、メタンの海とされてきたものの実体は、いろいろな有機物とかしこんだ、メタンとエタンの混合液体である可能性が高いとみられてきた。

1994年にハッブル宇宙望遠鏡が近赤外波長 (1~5 μm) でとらえたタイタンの画像には、ひじょうに暗い地域と、明るく輝く地域が見られる。この暗い部分が海、明るい部分が陸地を表しているのではないかと、いわれてきたが、本当のことはまだよくわかっていなかった。こんな過程をふまえて、カッシーニとホイヘンスの探査に至ったのである。

では、ホイヘンスが降りた場所はどんなところだったのか。結論から先にいうと、それは海や湖ではなかったし、ホイヘンスはメタンの海や湖を見つけることはできなかった。

ホイヘンスは、着地したとき地面がどれくらいの硬さをもっているのか探知するセンサー (棒状の硬度計) を底面につけていた。その約 15cm の棒がつきささったときの状況から、地面は湿った砂か粘土のようなものでできていると判断された。また、棒がこのゆるい層を通りぬける前に、うすい皮殻のようなものをつき破ったこともわかった。湿った砂か粘土のやわらかい層の表面は少し干からびていたようなのだ。この実験の主任研究者ジョン・ザルネッキ (イギリス・ケント大学) は、「まるでクレームブリュレだ」と叫んだ (クレームブリュレとはカスタードクリームに砂糖をこがしてつくったカラメルをかけたデザート菓子)。

さらにもう1つ、興味深いことがおこった。研究チームが、ガスクロマトグラフ質量分析計のサンプル吸入口を地面に近づけ熱すると、大量のメタンが地面から蒸発し、近接した大気中のメタン濃度が急速に増大したのだ。これは、湿った土の“湿りけ”が液体メタンであることの何よりの証拠ではないだろうか。このようなことから推測すると、ホイヘンスが降りた場所は、つい最近まで液体メタンがたまっていた湖か沼地の遠浅のようなところで、いままさに干上がりつつあるところだといえるのかもしれない。

結局、ホイヘンスが降りる少し前までは、メタンの雨が降り、液体メタンだまりがあちこちでできていたが、現在は乾期に入り、干上がりははじめたのではないかと、ということになりそうだ。

土星の自転軸は公転軌道面の垂線に対して約 26° 傾いている。タイタンの軌道面は土星の赤道面とほぼ一致しており、自転軸は軌道面に垂直なので、結局タイタンの自転軸は太陽に対して約 26° 傾いていることになる。一方、タイタンが土星を回る周期は約 16 日、自転周期もこれに同期しており、土星系全体は約 29 年半で太陽を1周する。以上のことをまとめてみると、タイタンは

16日間の1昼夜をくり返しながらか、29年半かかって太陽を1周し、その間に地球や火星に似た季節変化がおこっている、ということになる。この季節変化で雨期と乾期が生まれているのだろうと考えられる。

しかしながら、タイタンでおこる季節変化や気象現象については、まだまったくの未知の事であり、これからの大きな研究課題である。ホイヘンスが降りた場所が本当に乾期の湖底に相当するところなのかどうか、また、どこかほかの場所に、本当に液体メタンをたたえた湖か海があるのか、まだまだ検討と探査が必要である。

5. メタンを供給する氷火山活動

先にものべたように、タイタン大気中のメタンは光化学反応によって分解され、さまざまな炭化水素類（有機物）に変えられていく。この現象がつづけば、大気中のメタンはやがてなくなってしまふだろう。その寿命は、数100万年とも1000万年ともいわれる。だから、大気中のメタン濃度が昔からそれほど変化していないのだとしたら、当然、メタンの供給源がどこかに存在すると考えねばならない。

その供給源として最も可能性が高いのが、火山活動による地下からの放出である。そしてまさにそれを示すと思われるものが最近発見されたのだ。

現在、土星をまわりながら、土星とその衛星群の観測をつづけているカッシーニ本体は、これまでにタイタンに数回接近し、可視赤外マッピングスペクトロメーター(VIMS)（波長0.35～5.2 μm ）による近接撮影を試みている。これによって、厚いもやの層を通して、タイタン表面の地形が少しずつ明るみに出てきた。

そのなかで大きく注目されるのが、直径30kmほどの円形ドーム状火山地形と思われるものである。これが火山地形だと断定するには、残念ながら解像度が十分でなく、別の地形である可能性も残されているが、木星の衛星ガニメデの氷火山の例などからみて、タイタンにも氷火山が存在する可能性は大きいのである。

タイタンのような極低温の世界では、地下に何らかの熱源（それが問題だが）があれば、水の氷だけでなく、メタンやアンモニアの氷（あるいはそれらの混合物）が液化または気化して噴出活動をおこすだろう。

カッシーニに搭載されたもう1つの機器、レーダーマッパーは、さらに、氷溶岩と思われる流動物など、火山噴出物と解釈される地形を写し出している。タイタンの近接フライバイは40回以上計画されているから、今後さらに確かな新しい画像がたくさん得られるだろう。これらの探査によって、タイタン大気中のメタンの供給源の謎が解明されてくることが期待される。

6. おわりに

ホイヘンスの観測が明らかにした新しい事実は、また新たな謎をよびおこしている。たとえば、大気中に予想された、始原的な希ガス（アルゴン36と38、クリプトン、キセノンなど）がまったく検出されなかったこと、などである。これが何を意味するのか、その検討はこれからの課題であるが、タイタンは誕生当時もっていた原始大気、ある時期にいったん全部失ったのではないかと、の考えも出されている。現在の濃い大気は、その後の内部活動によって放出されたものなのだろうか。大気の起源は大きな謎の1つである。

また、メタンの光化学反応によって生まれる有機物のなかには、生命誕生の基本物質として重要なものも多い。これらがどの程度地表に堆積し、どんな様相を見せているのか。いずれは、火星で活躍中のローバーと同様なロボット探査車が、タイタン表面を駆けめぐる日がくることを期待しよう。

ホイヘンスは、タイタンという地球に似た、しかしまた地球とは本質的に異なった辺境の世界の姿を初めてわれわれに見せてくれた。まさに、惑星科学（とくに惑星地質学）の新しい地平がまた1つ開けた思いである。未知の世界を知る楽しみと喜びは限りなくつづくのだ。