

カッシーニ・ホイヘンス探査機を振り返る

サイエンスライター 渡部 好恵
国立天文台副台長 渡部 潤一

アメリカ航空宇宙局（NASA）および欧州宇宙機関（ESA）が共同で開発し、1997年に打ち上げた土星探査機カッシーニ・ホイヘンスは、2017年に土星大気に突入して、その長い使命を終えた。この20年にわたって数々の成果を挙げた、いわばNASAを代表する、最後の大型探査機といっても過言ではない。本稿では、この探査機による代表的な成果を解説しつつ、その活躍を振り返ってみたい。

<打ち上げ前の反対運動>

カッシーニ・ホイヘンス探査機（以後、カッシーニ探査機と略す）は、土星の周回観測と衛星タイタンへの着陸を目指した大型探査機である。名前は土星の環に空隙を発見した天文学者ジョヴァンニ・カッシーニ、および土星に付随した構造（もともとガリレオ・ガリレイによって発見されていた）が、円盤状の環であることをはじめて見いだした天文学者クリスティアーン・ホイヘンスに由来している。

ただ、カッシーニ探査機は打ち上げ前から、奇妙な意味での話題となっていた。一定の年齢に達している読者の方だと、ぴんとくると思うが、20世紀には「1999年の夏に恐怖の大王が降りてきて、地球は滅亡の危機に瀕する」という話がまことしやかに流れていた。いわゆるノストラダムスの大予言である。特に、時期が一致しただけでなく、カッシーニ探査機が3基もの原子力電池を搭載している大型探査機であったこともひとつの理由であった。現在は、木星軌道あたりまでは太陽電池パネルで電力を供給するジュノー探査機など

の例があるのだが、当時の技術では木星よりも遠方で電力を確保する手法は、それ以外には考えられなかったこともあり、カッシーニ探査機はボイジャーやパイオニアと同様に放射性同位体熱電対型の原子力電池を搭載していたわけである。

この種の探査機は、打ち上げ後、そのまま対象天体に向かって航行することはなく、必ずスイングバイ航法と呼ばれる手法をとる。これは対象天体に向かう前に適切な惑星に接近することで、その重力を活用し、燃料を節約すると同時に、スピードアップを図る方法である。現在では、地球から打ち上げ、再び地球に接近させて、地球の重力を利用するスイングバイ航法が一般的になっていて、日本の小惑星探査機はやぶさや、はやぶさ2でも採用されている。

カッシーニ探査機は、1997年の秋に打ち上げ予定で、その後、内惑星である金星に向かい、金星に2度接近してスイングバイを行った後、1999年の夏に地球に接近し、スイングバイを行う予定であった。そのために、地球スイングバイの時に、誤って地球大気に突入し、放射能をばらまくのではないか、という噂が流れ、原子力に関しての感情論とも相まって、反対運動まで起きた。

実際、原子力電池を積んだ人工衛星が落下した事故はあったことも事実である。旧ソ連が海洋偵察衛星として打ち上げたコスモス954号である。1977年9月打ち上げてから運用を終了した後、ウラン235を搭載した発電用の原子炉の分離と高高度へ軌道遷移に失敗し、1978年1月24日にカナダ上空で大気圏に突入し、600kmもの範囲に放射能を帯びた破片が飛び散った。カナダ政府は

除染作業を行う費用を含め、旧ソ連に賠償請求を行ったほどである。その意味で、北米在住の市民が不安を持つのは当然だったかもしれない。ただ、反対運動がそのまま打ち上げを中止に追い込むほどではなく、カッシーニ探査機は、1997年10月15日にフロリダ州ケープカナベラル空軍基地からタイタンIV型ロケットによって打ち上げられ、土星への長い旅路についたのである。

<打ち上げから土星到着まで>

カッシーニ探査機は打ち上げ後、1998年と1999年の2度にわたって金星に接近し、スイングバイを行い、加速した後に1999年8月18日に地球へのスイングバイによって、まずは木星へ向かった。木星には2000年12月に到着し、そこで木星の強力な重力を利用したスイングバイを行った。最終目的地への旅路の最後のスイングバイである。同時に、観測装置のテストも兼ねて、木星の観測も行っている。それまでの探査機とは格段に性能が向上したカメラを駆使して、木星の南極および北極の画像を撮影するのに成功した。ジュノー探査機が到着する2016年までは、極地方の画像としては最も詳細なものとなった。

木星で加速したカッシーニ探査機は、その4年後の2004年の6月に軌道修正を行い、土星の周回軌道に移る準備を開始した。木星のスイングバイによって、スピードアップしたため、到着までの時間は短縮できたものの、そのままのスピードだと土星を通り過ぎてしまうためである。そして2004年6月30日、日本時間だと7月1日に逆噴射して、予定通り土星周回軌道に投入された。打ち上げから7年後、人類は、ここではじめて土星の周りを回る人工衛星を実現させたことになる。

周回軌道上で、観測を開始すると、次々に驚くべき画像が送られはじめ、発見が続いた。わずか数ヶ月の間に、地上観測では見えなかった衛星を続々と発見していったのである。カッシーニ探査機が発見した新衛星は、8個にのぼる。

<子探査機ホイヘンス：衛星タイタンへの着陸>

カッシーニ探査機の前半のハイライトのひとつは、なんといっても子探査機ホイヘンスの衛星タイタンへの着陸であった。もともとカッシーニ・ホイヘンス探査機の主要な任務の一つがタイタンの調査研究であり、その主力を担っていたのが子探査機ホイヘンスである。この子探査機は欧州宇宙機関が主に開発した着陸機であった。実は欧州勢は、この直前、火星探査機マーズ・エクスプレスから分離・放出し、着陸させる予定であった火星着陸機ビーグル2号が行方不明となって、失敗していたため、このホイヘンスは名誉挽回のチャンスでもあった。(ちなみに、マーズ・エクスプレスそのものは周回機となって火星探査に大活躍している。)

2004年12月24日のクリスマス・イブにカッシーニ探査機から分離・放出されたホイヘンス探査機は、そのままタイタンへ向かい、翌年1月14日にタイタンの大気圏に突入し、無事に着陸を果たした。欧州勢の面目躍如となったホイヘンスは、極低温の中、その機能が停止するまで3時間40分にわたってデータを取得し、カッシーニ探査機経由で地球へ送信を続けたのである。このタイタン着陸成功は、きわめてインパクトが大きかったと言える。

衛星タイタンは、土星を約16日で一周する衛星であり、その大きさも直径が5,000kmもある、惑星である水星よりも大きな天体である。タイタンには二つの大きな特徴がある。ひとつは地球以外で唯一濃い窒素の大気を持つことである。大気圧は表面で1.5気圧もある。その意味では、温度がきわめて低いことを除けば、原始地球の状態を知る格好の観測対象である。もうひとつは表面温度がマイナス180度と低いため、通常ではガスになってしまうようなメタンやエタンなどの炭化水素が液体になれる環境であることだ。それ以外の有機物が存在することも確認されている。気圧が高いため、メタンやエタンは表面で融けて、液体になれると考えられる。表面で液体が存在するのは、現在の太陽系ではわが地球だけである。タイ

タンの表面にはメタンの湖や海があり、メタンの循環（雨－川－海－蒸発）があるのでは、と考えられていた。地球の水が大気中を循環するように、タイタンでは炭化水素が気体、液体、固体の三態をとり、地球の水の役割を担っているはず、と予想されていた。しかし、上空は濃いもやで覆われていて、その表面を見ることができない。今回の探査で、ベールに包まれたタイタンの素顔が明らかになると期待されたわけである。

タイタンの大気へ突入したホイヘンスは、3分間で時速18,000 kmから時速1,400 kmまで急減速し、さらに大気中で三段式のパラシュートを開いて、時速300 kmまで減速した。高度160 kmに達した頃から観測をはじめ、着陸は午後9時34分であった。降下しながらホイヘンスが撮影したタイタン表面の画像には、海のような極めて平坦な地形や、黒い川のような地形が捉えられた（写真1）。その画像があまりにも地球に似ていたため、多くの研究者は驚きを隠せなかった。確かに炭化水素物質、おそらくメタンの循環があることが確かめられたわけだ。ホイヘンスは大気を切り裂いて降下していくときに発せられる音も記録している。これは人類にとって初めて聞く、地球

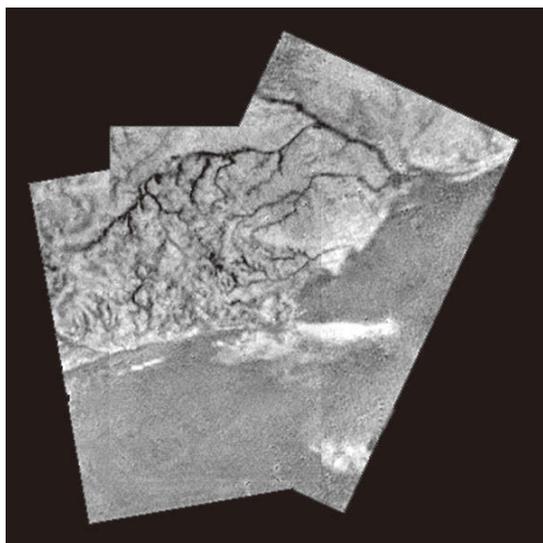


写真1：上空から撮影したタイタン表面地形。黒い川のようなものが合流しながら、太くなり、平坦な海のような部分に注ぎ込んでいることがわかる。
(NASA/JPL/ESA/University of Arizona)。

以外の天体の風の音といってもよいだろう。

ホイヘンスは、炭化水素の海に着水する可能性も考えて設計されていた。しかし、実際に着陸した場所は、海ではなく乾いた大地のようであった。ところが、送信されてきた画像には、荒涼とした表面に川底の石のように、角の取れて丸みを帯びた岩石のようなものが見えたのである（写真2）。これは、どうみても地球で言えば川の、しかも結構、下流域の石の形状である。もちろん、岩石ではなく、水の氷であるのだが、明らかに流体によって形状変化したものと考えられる。つまり、ここは乾いて干上がった川底だった可能性がある。炭化水素、つまりメタンやエタンが流れていたところで、たまたま乾期に着陸したのかもしれない。

もともとタイタンのような太陽から遠方の天体では、水はすべて氷となっているばかりか、岩石よりも氷の方が軽いため、天体の表面を氷が相当に厚く覆っていることが多い。タイタンでも、火山からは水（液体）のマグマが吹き出し、流れ出



写真2：ホイヘンス探査機の着陸地点の風景。角の取れた氷塊が液体の流れがあったことを示唆している。平らな岩の大きさは15cm程度で着陸機から85cmほど離れている。
(NASA/JPL/ESA/University of Arizona)。

る溶岩に相当するのはすべて液体の水である。したがって、大陸と呼べるような大地をなしているのは基本的にはすべて水である。液体のメタンやエタンは、雨となって降り注ぎ、川となって氷の大地を穿ち、水のかげらを転がしていくのである。したがって、この画像にある岩石のような塊は、すべて氷塊なのである。やがてメタンやエタンは蒸発し、大気中を漂い、雨期になると雲となり、その中で液滴となって再び降り注ぐのだろう。

ホイヘンスは、着陸後も数時間に渡って地球にデータを送信し続けた。はるか12億 kmの彼方に設置された最遠方の人工物である。そこから届いた未知の世界の映像にわくわくした人も多に違いない。そして、ホイヘンスは、温度環境が地球とはずいぶん違って、水の代わりに液体になれる適当な物質さえあれば、それが地球での水の役割を担うことで、地球のような地形環境が実現されることを示したのである。

<カッシーニ探査機の衛星タイタンの観測>

ホイヘンスが機能を停止した後も、カッシーニ探査機本体は、しばしばタイタンに接近し、その観測を地道に続けていた。すでにタイタンではホイヘンス以上の発見や成果は得られないかもしれない、という世間の予想に反し、カッシーニもタイタンで大発見を成し遂げた。レーダー観測を行ったところ、非常に平坦な領域が極域に発見されたのである。レーダー観測は地形の起伏を計測する最適な手段である。照射した電波が返ってくるまでの時間を計測すれば、その場所までの距離がわかる。カッシーニ探査機がタイタンに接近したときに、連続的にレーダー観測を行うことで、その地形の起伏、いわば地形図ができあがるのだ。その観測の結果、大小様々、大きなものでは50 kmほどの湖が点在する様子が見えてきたのである。やはり、液体は確実に存在したのだ。この湖あるいは海の発見は、炭化水素系の物質の大気中での循環の証拠でもある。

さらに大気成分から、希ガスであるアルゴン40も発見された。これはタイタンの内部がまだ

地質学的に活発であることを示している。つまり、まだ水火山も噴くことがあるという事を示している。実際、そうした火山活動は直接捉えられてはいないものの、土星からの潮汐力が効いて内部が暖まっていることを考えれば、木星の衛星イオのように活発でないにしても、地質活動は続いていると考えて良さそうである。

湖や海が存在し、炭化水素の循環系があり、また大気中ではそうした炭化水素が結びついて、さらに複雑な有機分子が作られていることは確からしい。実際、大気上空でメタンやエタンといった物質が複雑に合成されたものが、濃いもやの一因となっていると考えられる。これらは有機物であり、メタンの雨とともに地表に落下し、川や海の中でさらに複雑な有機物へ、つまり生命へと熟成されるのではないとも考えられる。とすれば、地球型生命とは全く異なる視点で生命の可能性が語られることになる。もちろん、極低温であるために、化学合成はきわめてスローなスピードしか起こらないだろう。生命といえる現象が発生したとしても、地球型とは全く異なるスローな、そして単純な形態であろう。ホイヘンス探査機のカメ

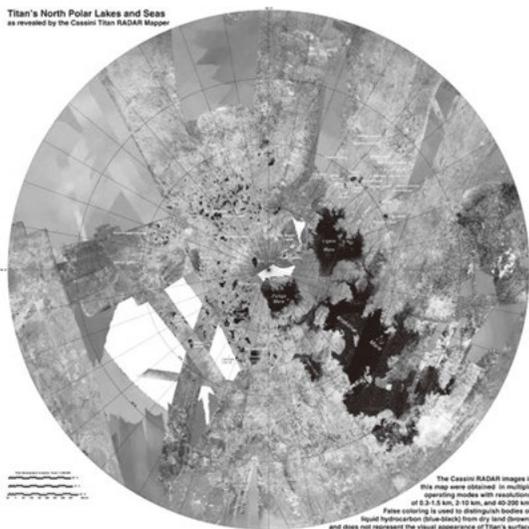


写真3：カッシーニ探査機が行ったレーダー観測から作成したタイタンの北極の地形図。平坦な領域（黒色）はエタンやメタンの炭化水素の液体に満たされた湖と考えられる。白い領域はデータが無い場所である。(NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS)。

ラレンズには、着陸時のショックで一時的に融け出した炭化水素系の物質が付着したことがわかっているが、その中にはもしかしたら未知の生命現象が隠されていた可能性もある。水が液体になる環境でないと生命ができない、というのは我々人類のおごった考え方なのかもしれない。少なくとも、カッシーニ・ホイヘンス探査機は、そう思わせるに足る様々な発見をなしとげたと言えるだろう。

<運用延長の末に成し遂げた大発見　－エンケラドゥスの地下の海－>

その後、カッシーニ探査機は土星を周回しつつ、土星本体の観測や環の観測を続けた。大きなトラブルも無く運用も順調だったこともあるが、2008年には2年の延長が決定、さらに2010年には、2017年5月までの7年余にわたる運用延長が決定された。これだけ長期の運用延長決定はNASAでも異例のことであった。それだけNASAにおいても、カッシーニ探査機から生み出される発見や数々の成果に対する評価が高かったのである。

その発見の中でも際立っているのが、土星の衛星エンケラドゥスについてである。2006年には、カッシーニ探査機の高解像度カメラが、エンケラドゥス表面からなんらかの物質が高さ数百kmまで噴出しているらしいことを察知した。当初は衛星の表面で何が起きているのか、よくわからなかった。単純に表面の氷が水蒸気に昇華しているのでは、という説もあったが、それだけでこの様な規模になることは考えにくい。衛星の地下から摂氏0度以上の液体の水が存在して、間欠泉のように吹き出しているのではないかという説も取りざたされた。もし、これが水であるとすれば、別の謎も解決する。

実はカッシーニ探査機は、土星の周囲に酸素原子を発見していたのだが、その起源が皆目わからなかった。酸素は宇宙空間でも極めて少なく、あったとしてもすぐにチリの粒子などと結びついてなくなってしまうはずで、原子状態で存在すると

いうことは、どこかに供給源があるはずなのである。もしエンケラドゥスから水が噴き出しているとすれば、一挙に謎が解決する。というのも、水は宇宙空間では紫外線などによって酸素原子と水素原子に分解されるからである。

いずれにしろ地下に水があるとすれば、木星の衛星エウロパと同様に、そこには生命の可能性が浮上してくる。ということで、運用を延長したカッシーニ探査機は、さらなる発見を続けることになったのである。2010年にはエンケラドゥスから噴出する物質が太陽光を受けて輝く様子が撮影され、噴出口が南半球のタイガーストライプと呼ばれる縞模様のあたりであることがわかってきた。2014年には、重力場の測定から地下にはかなり広大な海が存在することが示唆され、それが全球規模である可能性が浮上した。さらに、2015年には噴出物の分析から、地下の海に熱水環境が存在することも示された。噴出物中にはナノシリカと呼ばれる物質が含まれていることを、日本の研究者を含む研究グループが明らかにしたからだ。ナノシリカはケイ素を含む岩石と海水とが、ある程度の温度、たとえば摂氏80度以上で反応してできる。つまりエンケラドゥスの海底はかなり暖かい場所があり、おそらく海水と岩石とが接しているのである。この状況は地球の深海底と変わらない。地球の場合、熱水噴出口のまわりでは、噴出してくるミネラルを栄養源とする微生物、それを食べる動物などがしっかりと生態系を作っている。この生態系には酸素も、太陽光も必要ない。状況はエンケラドゥスと同じなのである。その意味で、エンケラドゥスは地球外の微生物が発生・生息している太陽系で最も可能性の高い場所の一つとなったわけである。

この発見は地球外生命の検出に大いに期待を抱かせるものとなった。というのも、表面の厚い氷を掘り進んで、地下の海に到達する様な探査は不可能だが、表面に吹き出す物質をサンプル採取するのは可能だからだ。噴出物の中に有機物や生命の死骸のようなものが含まれているかもしれないと期待できる。将来、エンケラドゥスへの探査機

が実現すれば、地球外生命の直接発見が可能かもしれない。

<グランドフィナーレ>

2017年になるとカッシーニ探査機は、いよいよ最終観測期間に入った。グランドフィナーレと命名された4ヶ月のミッションで、それまで安全のために行わなかった土星への超接近軌道に投入され、22回にわたって土星の環をくぐり抜けるという“あぶない”探査を遂行したのである。観測チームは、環の領域の直接探査と共に、土星本体へもこれまでにない接近を行い、その大気や磁場、そして重力分布についても至近距離から観測を行った。環くぐりは実に危険である。なにしろ、環の微粒子が煙の粒子ほどの極めて小さいものであったとしても、カッシーニ探査機のスピードである秒速30 kmで衝突すれば、当たり所によっては破壊される可能性もあった。そのため、カッシーニ探査機は4 mほどの大きさの通信用アンテナを進行方向へ向け、それをいわば「楯」として防護姿勢をとったのである。第一回目は、2017

年4月26日、探査機は土星の雲層の頂から約3,000 kmほど、観測可能な環の最も内端から約300 kmほどを通り抜けたが、結果的には無事であった。その後もすべての環くぐりで無事に通過し、これまでにない土星本体の雲の細部まで写し出された画像には、大小様々な大気の渦や乱流が捉えられた。こうして、9月15日には土星大気へと突入し、カッシーニ探査機本体は巨大な流れ星となって、ミッションを終了した。打ち上げから20年、土星に到着してから13年の長きにわたって運用された超大型探査機の最後は、土星の一部となって消えていったのである。

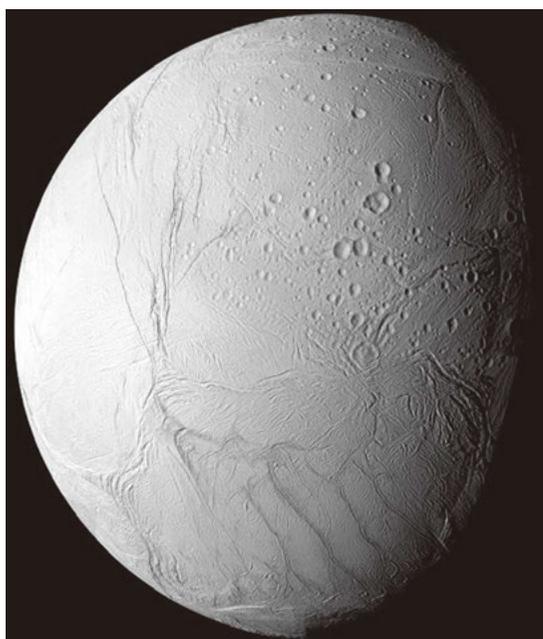


写真4：カッシーニ探査機が撮影された土星の衛星エンケラドゥスの南極付近。表面は氷で覆われ、ところどころにタイガーストライプと呼ばれる青色の縞模様が見える。
(Credit: NASA/JPL/Space Science Institute)

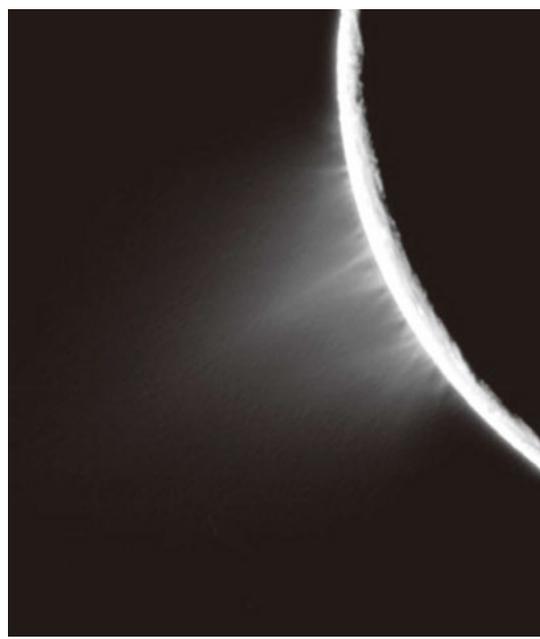


写真5：カッシーニ探査機が撮影したエンケラドゥス表面から吹き出す間欠泉。
(Credit: NASA/JPL/Space Science Institute)