

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その1」

土星系の小型衛星達：内部構造と表層進化

平田 直之¹，宮本 英昭¹

2011年9月20日受領，2011年10月26日受理。

(要旨) 土星系の魅力的な衛星は、タイタンやエンセラダスだけではない。カッシーニ探査機の活躍によって得られたさまざまな知見は、その他大勢の小型衛星も、太陽系科学において極めて興味深い対象であることを示している。小型衛星は、その小さな重力場や弱い熱的変成履歴という意味で小惑星と対比できるだけでなく、その特徴的な形態や表層の状態が、ほかの衛星や周囲の環と複雑な相互作用の結果であることから、土星系における衛星や環の形成や進化の鍵を握っていると考えられる。本稿では、こうした多様性に富む土星系小型衛星の姿と推定される内部構造、さらには進化史について概説するとともに、今後の探査で期待される観測について議論する。

1. はじめに

小惑星や彗星は、古典的には太陽系形成時の情報を保持していると考えられてきた。その一方で、近年のスターダスト探査機やはやぶさ探査機らの観測結果は、小惑星や彗星も（地球を初めとする太陽系の他のメンバーと同様に）独自の進化を遂げてきたことを示している。そのため太陽系の進化を考える上で、小惑星や彗星の起源や進化に関する、より包括的な理解が求められていると言える。太陽系には100万個以上の小天体が存在していると考えられているにもかかわらず、これまでに探査された数は極わずかである（表面の様子がわかるくらいの写真が撮られた小惑星は、ガスプラ、イダ、マティルド、エロス、アンネフランク、イトカワ、シュテインス、ルテティア、ベスタの9個であり、彗星はハレー、ボレリー、ヴィルト第二、テンペル第一、ハートレー第二の5個に限られる）。

一方で巨大ガス惑星を回る小型衛星は（本稿では半径が100km以下のものを小型衛星と呼ぶ）、太陽系小天体によく似た環境（微小な重力場を持ち、熱的変成をあまり受けていない）にあるだけでなく、多くの場

合太陽系のミニチュアとも言うべき様態を示している。また軌道上の都合から、いったん巨大惑星の周回軌道に乗った探査機は、多くの小型衛星を観測することができるため、直接探査された小型衛星の数は結果的に小惑星や彗星の数を上回っている（木星土星あわせて近接探査された小型衛星の数は15個）。そのため巨大惑星の小型衛星は、その惑星系の起源と進化を理解するだけでなく、小惑星の少ない探査数を補い、今は観測することのできない原始太陽系の理解を深めるうえでも、重要な科学的対象になると期待できる。

さて近年のカッシーニ探査機の活躍によって土星系の小型衛星の詳細な画像が得られるようになった。土星系の小型衛星はそれぞれ特徴的な姿を示しており、既知の小惑星に似たものもあれば、どの天体と比べても異様な姿を持つものがある。小型衛星は土星系に多数存在するが、表面の様子がわかるほど高い解像度で撮像されているのは、内側からパン(Pan)、ダフニス(Daphnis)、アトラス(Atlas)、プロメテウス(Prometheus)、パンドラ(Pandora)、ヤヌス(Janus)、エピメテウス(Epimetheus)、パレネ(Pallene)、テレスト(Telesto)、カリプソ(Calypso)、ポリデウス(Polydeuces)、ヘレネ(Helene)の12個である(図1, 図2, 表1参照)。本稿では、この12個を中心にこれ

1. 東京大学総合研究博物館
hirata@um.u-tokyo.ac.jp

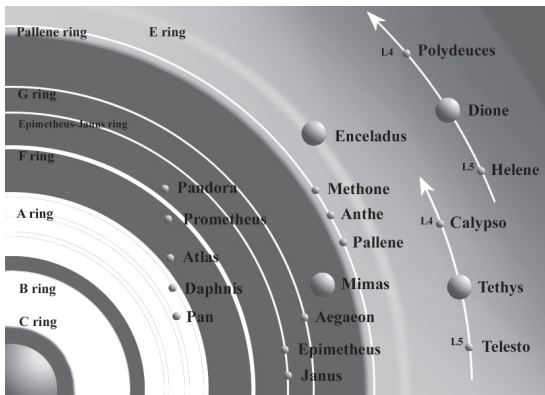


図1：土星系の小型衛星の位置関係.

表1：土星系の小型衛星の諸元

	軌道長半径(km)	平均半径(km)
パン	133584	14.2±1.3
ダフニス	136504	3.9±0.8
アトラス	137670	15.1±1.4
プロメテウス	139380	43.1±2.7
パンドラ	141720	40.3±2.2
ヤヌス	151460	89.6±2.0
エピメテウス	151410	56.7±1.9
パレネ	212280	2.2±0.3
カリブソ	294710	10.6±0.7
テレスト	294710	12.4±0.4
ポリデウス	377200	1.3±0.4
ヘレネ	377420	16.5±0.6

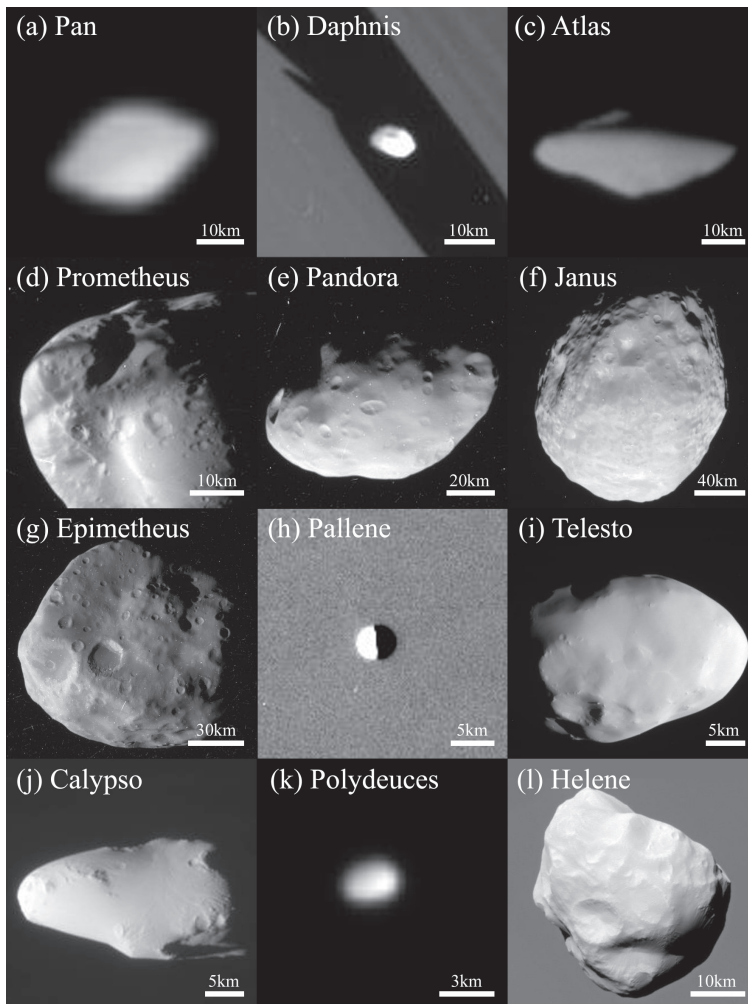


図2：土星の小型衛星。写真の解像度はすべて異なる。パレネとヘレネの画像で夜半球の淵が明瞭なのは、画像の背景が土星本体であるため。(a)パン(PIA08405)。(b)ダフニス(N00156643)。(c)アトラス(PIA08405)。(d)プロメテウス(N00150211)。(e)パンドラ(N00039262)。(f)ヤヌス(N00152953)。(g)エピメテウス(N00098337)。(h)パレネ(N00164310)。(i)テレスト(N00041296)。(j)カリブソ(N00151485)。(k)ポリデウス(PIA08209)。(l)ヘレネ(PIA12723)。(NASA提供)

表2：値はすべて[1]から。

	質量 ($\times 10^{19}$ g)	密度 (g/cm^3)	空隙率(%)*	ロシロープ体積/ 実体積(%)
パン	0.495 ± 0.075	0.41 ± 0.15	54	109
ダフニス	0.0084 ± 0.0012	0.34 ± 0.21	62	125
アトラス	0.66 ± 0.06	0.46 ± 0.10	49	89
プロメテウス	15.67 ± 0.20	0.47 ± 0.065	48	85
パンドラ	13.56 ± 0.23	0.50 ± 0.085	44	76
ヤヌス	188.91 ± 0.50	0.63 ± 0.063	30	49
エピメテウス	53.07 ± 0.14	0.69 ± 0.13	23	44

* 空隙率の計算には、真密度を氷($0.9\text{g}/\text{cm}^3$)であると仮定している。

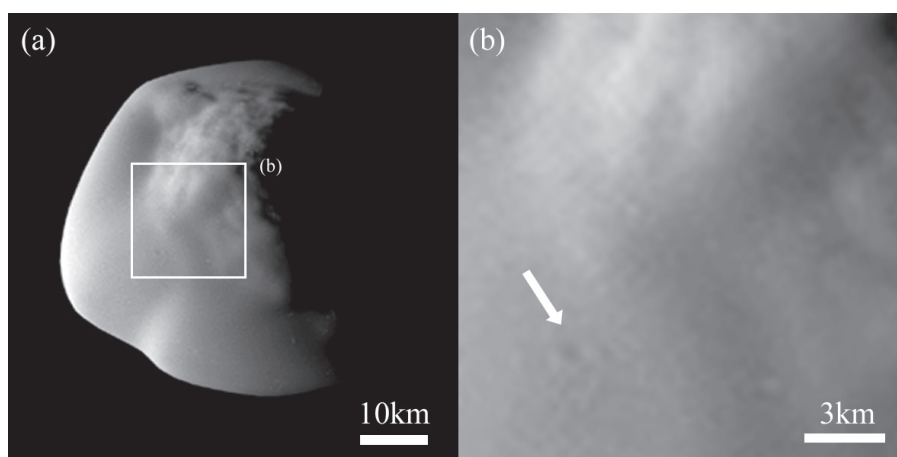


図3：(左)アトラスのもっとも解像度のよい画像。南半球の先行半球が見えている。表面は驚くほど滑らかなのがわかる。(右)一部を拡大したもの。矢印の先にクレーターがあるのがわかる[14]。(NASA提供)

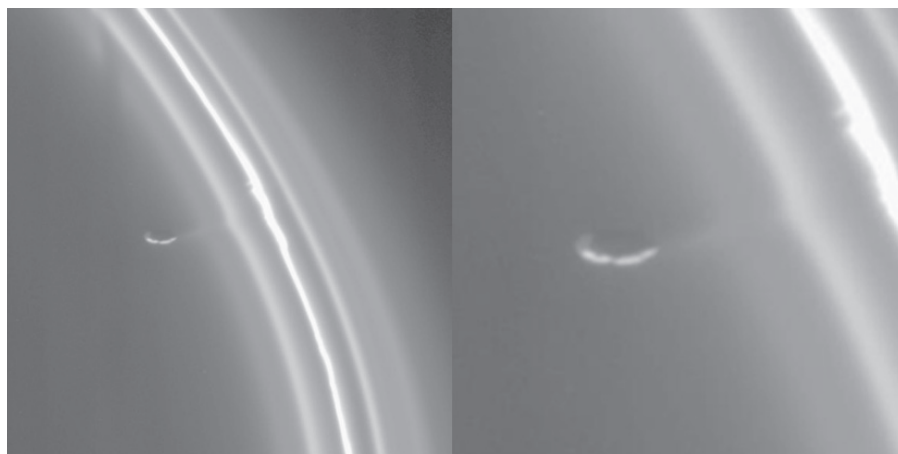


図4：(左)F環とプロメテウス。プロメテウスがF環の粒子を吸い寄せているために、衛星とF環の間に橋がかかっている。(右)左の画像を一部拡大したもの。プロメテウスにF環粒子が衝突しているのがわかる(PIA06143)。(NASA提供)

までの観測事実をまとめるとともに、これらの進化についての著者らの考え方を述べ、今後の探査に関する展望を示すことにする。

2. 土星系小型衛星の観測

上で述べた12個の衛星は、それぞれ環と軌道を共有していることが多く、相互干渉が起きていることが推測される。このため土星に近いところから、軌道を共有あるいは隣接している環ごとに4つに分類し、これまでに得られた観測事実についてまとめる。

2.1 A環領域の衛星(パン, ダフニス, アトラス)

パン, ダフニス, アトラスはA環領域に存在する衛星であり、それぞれエンケの間隙, キーラーの間隙, A環の外縁に位置している。これらの衛星はA環の羊飼い衛星である。最も土星に近い衛星群であり潮汐力の強い影響下にある。どの衛星も密度が驚くほど低いことが知られている(表2) [1]。環は主に氷粒子で構成されていることが知られているが[2]、こうした衛星の密度は氷よりもずっと低い。また衛星全体の形状が、つぶれた円盤型をしていることが知られている(図2a, 2c)。この円盤のふくらみは、アトラスでは総体積の27%ほど、パンでは10%ほどを占めている[1]。アトラスの高解像度画像(図3)を見る限り、この円盤部分の表層は驚くほどなめらかで一般的な小天体に普遍的

に見られるクレーター等の構造が全く見えない(パン, ダフニス)は表面の起伏がわかるほどの画像が得られていない)。

2.2 F環領域の衛星(プロメテウス, パンドラ)

プロメテウスとパンドラはF環領域に存在する衛星であり、それぞれF環の内縁と外縁に位置している。F環はA環のすぐ外側に位置し、細く不安定な環であることが知られている[3]。この2つの衛星はF環の羊飼い衛星であり、環の粒子との衝突がかなりの頻度で起きていると考えられ、激しい相互作用が生じていることが知られている(図4) [2]。A環領域の衛星と同様に密度は小さいことが知られている(表2)が、A環衛星とは対照的にいびつな形を持ち、表層はクレーターに富む。もっとも、プロメテウスに比べると、パンドラには小さいクレーターが少ないように見える。またパンドラには淵の不明瞭な緩和されたクレーターが多く存在しているが、プロメテウスの場合はそのようなクレーターは少ない(図2d, 2e)。

2.3 ヤヌス, エピメテウス

この2つの衛星は、土星系の小型衛星の中でもっとも大型である。ヤヌスとエピメテウスは共鳴軌道を有しており、この2つの衛星間で定期的に軌道が入れ替わる。しかも2つの軌道は50kmしか離れていないのだが、衝突することはないと考えられている。この2つの衛星も密度は氷よりも小さく(表2)、外見上

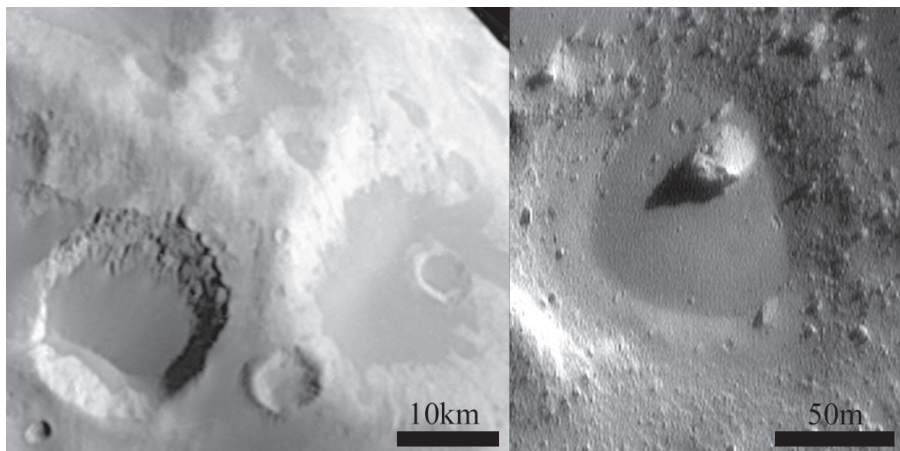


図5：(左)エピメテウスの一部拡大図(N00098337)。クレーターの底に暗い堆積物があり、池のように平たく堆積しているものが多数存在しているのがわかる。(右)小惑星エロスのポンドの一つ(MET155888598)。クレーターの底に細粒の暗い堆積物が堆積している。(NASA提供)

の特徴は類似している。表面はクレーターで飽和しており、チェーンクレーターと考えられる地形も存在する[4, 5]。火星の衛星のフォボスや小惑星等でよく見られるようなグルーブ(groove)と呼ばれる溝地形も存在している[6]。カッシーニ探査機の画像を見る限り、両衛星の表面には明るい領域と暗い領域が存在しているのが認められる(図5)。暗い物質は天体のいたるところに分布しているが、標高の低い部分に池のように平たく堆積しているように見える。

2.4 E環領域の衛星(パレネ、テレスト、カリプソ、ヘレネ、ポリデウス)

E環はミマスより外側、タイタン軌道周辺まで広がる幅の広い環である。このE環はエンセラダスの間欠泉を起源としていると考えられ、かなり若く希薄であると推測されている[7]。

パレネはE環の内側、比較的粒子数が高い軌道に位置している。近い軌道にアンテ(Anthe)、メトネ(Methone)といった同じくらいの大きさの小型衛星が存在し、これらはまとめてアルキオニデス群(Alkyonides)と呼ばれている。この中で形がわかるほど高い解像度の画像が得られたのはパレネだけである。得られた複数の画像を見る限り、パレネは衛星の輪郭や昼夜の境界線がかなりなめらかで綺麗な曲線となっているため、解像度の限界である500mを超えるスケールの起伏はないとみられ(図2h)、他の小型衛星のような凹凸に富むびつな形ではなく、起伏に乏しい球状であると推測できる。

テレストとカリプソはティティスのトロヤ軌道に位置している小型衛星である。表面の特徴はどちらも良く似ており、全体としてなめらかで凹凸は少ない(図2i, 2j)。クレーターは大きなものが目立つ一方で小さなものは少ない。またクレーターも形が不明瞭になっている。カリプソには筋状の地形が存在している。この筋は高地から低地に向かってるように見え、なんらかの土砂崩れの跡のように見える。

ポリデウスとヘレネはディオオーネのトロヤ軌道に位置している小型衛星である。ヘレネはどの土星系の小型衛星よりも起伏に富んでいる(図2l)。グローバルな形状はかなり歪で凹凸が激しい。これらの凹凸はほぼ円形のため、衝突によるものとみられる。おそらく表面ではかなり高低差があるだろう。激しい凹凸の割に

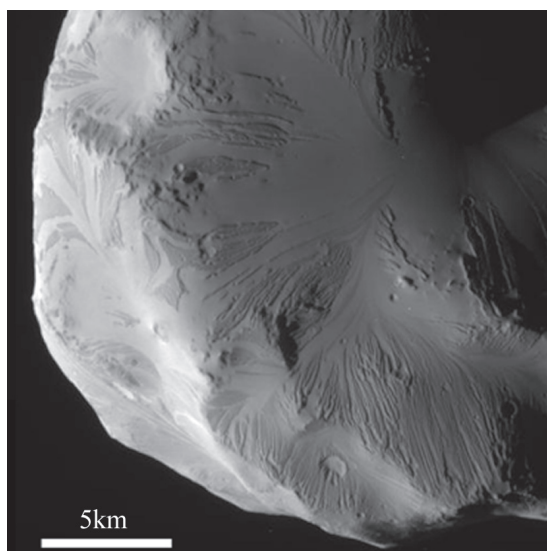


図6：ヘレネの高解像度画像(N00172858)。クレーター斜面にガリのような筋状の構造が数多く刻まれている。(NASA提供)

は表層には小さなクレーターが少ない他に、筋状の構造が特徴として挙げられる。すり鉢状になったクレーターの斜面に垂水線方向¹⁾に、この筋状構造が発達しているのが認められる(図6)。

3. 小型衛星の起源と進化

上でみたように、土星系の小型衛星の形態は極めて大きな変化に富んでいるが、これには衛星ごとに大きく異なるクレーターの多寡による影響が大きい。大まかに言うと、ヤヌス、エピメテウス、パンドラ、プロメテウス、ヘレネはクレーターに富むが、テレストやカリプソはクレーターが少ない。パレネは大規模なクレーターは少ないと考えられる。そしてアトラスはほぼ存在しない。クレーターの数密度は、地殻の形成年代に相関があると考えられ、それゆえクレーター年代学が広く利用されているのであるが、土星系の小型衛星においてはこの相関は必ずしも成立しないと考えられる。なぜなら小型衛星への衝突頻度は、その近傍の環の粒子にも依存するため、土星系全体において様ではないと考えられるからである。そのためクレーターの多寡のみでこれらの衛星の年代や進化を比較する

¹⁾ 斜面上に水を垂らしたとき流れていく方向・等高線に垂直な方向ともいえる。

ことは、一般的には困難である。小型衛星の年代や進化、形態的特徴を一般的に説明するには、クレーターの多寡だけでは説明ができず、環との相互作用が重要になると筆者らは考えている。本章では上で示された観察事実を、筆者らの見解と共に整理することとする。

3.1 A環～F環領域の小型衛星の内部構造

A環およびF環領域の小型衛星は概して密度が小さいが(表2)、これは空隙の多いラブルパイル構造を持つことで説明できる[1]。この際衛星の組成を純粋な氷と仮定すると、空隙率は50%程度と求められる。これはA環領域の小型衛星のスペクトルがA環と良く似ている[8, 9]ことから、A環の粒子を集積してきた天体であると考えられることと調和的である。

A環F環粒子は自己の重力だけで集積することができない。これは粒子の表面はロシュローブ^{*2}の外側にてでしまっているためである(粒子の密度が低いために、衛星のロシュローブの体積が環の粒子の実際の体積よりも小さくなっている)。しかし密度の高い天体があれば、ロシュローブの体積が粒子の実際の体積よりも十分に大きいため、ロシュローブに空きがあり物質が集積できる。この点を重視すると、実は最初に密度の高い天体が存在し、この外側にA環の粒子が集積して形成された[1]と予想される^{*3}。筆者らは、そのような高密度天体が、内部にコアとして存在していると考えている。

このように考える一つの理由は、A環に存在するパンとアトラスの持つ特徴的な円盤型の形状にある。これと似た形態の天体という点、唯一小惑星1999KW4が知られているが、これはこの小惑星の極めて早い自転速度で説明されている[10]。しかしパンやアトラスには、この効果を期待できるほどの自転速度がない[11]。さらに、土星の潮汐力による効果も円盤型にする力とは考えにくい[11]。そのためパンとアトラスの円盤型は、A環の粒子を集積した過程を反映していると考えられる。パンもアトラスもその円盤は赤道面に対して対称であるが、この赤道面はA環面と一致している。また、A環の粒子の衝突確率の全球分布は、現在の衛星の形状と良く一致が見られる[11]。そのため極域におけるふくらみは、種となった高密度のコアが潜んでいると考えることで、うまく説明できるのである。

さてA環～F環領域の衛星は、衛星の体積とロシュローブの体積がほぼ一致しているという性質が挙げられる(表2)[1]。これらの衛星の軌道にはすぐそばに環があり、そこから物質が供給され、かつ現在はロシュローブ内を埋め尽くしていると思えることができる^{*4}。このためこれらの衛星はこれ以上大きく成長することはできないと考えられている[1]。逆に言えば、こうした天体力学的な都合により、衛星の大きさが決まっているのである。

3.2 ダストの電氣的浮遊効果

上では、小型衛星がラブルパイル構造を持つ可能性を議論した。同じようにラブルパイル構造を持つと考えられている小惑星イトカワでは、明瞭なクレーターが存在しないという特徴を持つ。これはラブルパイル構造によって衝突が起きても衝撃を緩和してしまい、クレーターが形成されにくいからだと推察されている[12]。また衝突が起きると天体全体が振動しレゴリスが動いて均されてしまうため表層にクレーターが残りにくいのかもしれない[13]。さて、こうした理由でアトラスの表面にクレーターが見られないのかもしれない。しかし、筆者らは新たにクレーターが存在していることを発見した(図3)[14]。このクレーターの発見は、アトラスの表層進化を考える上で重要な示唆を持っている[14]。このクレーターは、アトラスの円盤部分にあり、しかもよく見ると明瞭なリムを持っている。つ

*2. ロシュローブは重力の等位面の一つであり、惑星とのL1点を共有する面である。惑星と衛星を取り囲み、L1点で交差する8ノ字型をしている。衛星の表層物質が流体であり表層物質がロシュローブからはみだしたと仮定するとL1点近傍を經由し惑星側流れ落ちていってしまう。ロシュローブはロシュ限界やロシュ球(ロシュ球はヒル球とも言われる)とは異なる概念である。

*3. E環領域での粒子の集積は高密度のコアを必要とせず、自己重力だけでも集積は可能である。粒子の体積に対するロシュローブの体積比は、衛星の密度に比例し惑星からの距離の三乗に反比例する。このためE環領域の粒子もA環同様に密度が低いが、惑星から遠く離れているために自己重力だけで衛星へと集積できる。衛星が存在できる軌道の内限としてロシュ限界が知られているが、実際にはロシュ限界の内側であっても密度が十分に高ければ周囲の粒子を集め成長し衛星として存在できる。また、密度が小さすぎるとロシュ限界の外側であっても成長できず衛星としても存在できない。

*4. 最初に高密度の天体があったとしても、集積する環の粒子は密度が小さいので、全体の密度は低下していく。密度が下がるためにロシュローブとの体積比はどんどん低下していく。一方で衛星の体積は大きくなる。このため最終的にロシュローブの体積と衛星の体積が等しくなって成長が止まる。結果的にA環F環領域に存在する衛星の体積はみなロシュローブと等しくなっている。

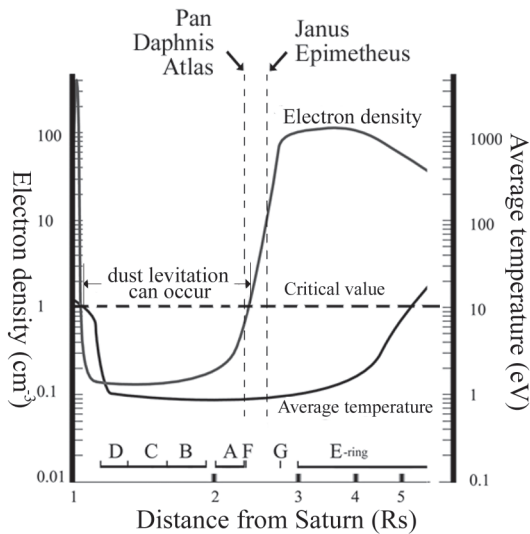


図7：土星からの距離に対する土星プラズマの電子密度 (Electron density) と温度 (Average temperature)。ダストレベテーションが起きるには、電子数密度が 1cm^{-3} 以下、温度が 10eV 以下である必要がある。A環領域はこれを満たしているため、この領域に存在する小型衛星の表面の滑らかさをうまく説明でき、一方でヤヌス、エピメテウスはこれを満たしていない ([18] を参考に作成)。

まりアトラスはクレーターが形成されにくい環境とは言えず、形成されたのちに消去されていると考えられる。

ところで小惑星エロスには、ポンド (pond) と呼ばれる滑らかな部分が存在している [15]。クレーターなどの窪地に池のように溜まった堆積物であり、この成因としてダストレベテーションの可能性が指摘されている [16]。ダストレベテーションは月でよく知られた現象である。太陽光の光電効果によって電子が失われ表層が正よりに帯電し、静電的な力によって一時的にダストが浮かび上がる現象である [17]。

大気を持たない固体天体の表層は太陽光によって正よりに帯電し、太陽風プラズマによって中和され続けている。この2つが拮抗する電位まで帯電することになるため、固体天体表面や星間塵は数 V/m 程度のやや正よりの電位を持っている。さて内側土星系は土星磁気圏によって太陽風プラズマが遮られている。その代わりに、土星プラズマが中和する役を負っている。しかしアトラス軌道周辺は土星系でも最もプラズマが薄い部分であるため (図7) [18]、強いダストレベテーションを起こす環境にあるといえる。またダスト量と

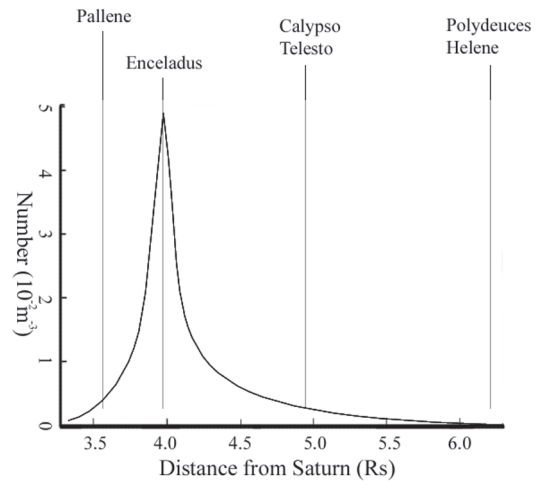


図8：E環粒子の数密度 ($1.3\mu\text{m}$ よりも大きなもの) の推定値。エンセラダス軌道周辺で飛びぬけて多いのがわかる。粒子数を見ると、パレネ > カリプソ・テレスト > ポリデウス・ヘレネという関係が成り立っているのがわかる ([7] を参考に作成)。

いう点でもアトラスは有利であり、すぐそばに存在するA環には多くのダストが存在するのでそこからダストが供給されていることが期待できる。これらのことから筆者らは、エロスのポンドのように、アトラス表面全体がダストレベテーションによって更新され続けている可能性があると考えている [14]。

3.3 F環領域の小型衛星の進化

F環領域の衛星もA環領域の衛星と同様に内部に核をもち環の粒子を集積してできたと考えられている。F環の小型衛星であるプロメテウスやパンドラのクレーター形成頻度は、F環粒子の粒径と衝突確率に強く依存していると考えられる。F環の衛星はF環との間で強い相互作用を見せていることが知られており (図4)、プロメテウスとパンドラに衝突する天体で最も多いものはF環粒子であると考えられる。

さて、パンドラはプロメテウスに比べて小さなクレーターが少ないという傾向がある。またパンドラのクレーターは大きく形が崩れているものが多い。これはサイスマック・シェイキングと呼ばれる現象によるものであるかもしれない。これらの現象が最も知られて

いるのが小惑星のエロスであり、この小惑星のクレーターでもバンドラと同様に、小さなクレーターが少なく大きなクレーターが緩和されているということが知られている[19]。厚いレゴリス層があると、天体衝突に起因する地震動によってレゴリスが揺さぶられ移動し、小さなクレーターは消し去られ大きなクレーターが緩和する。このような現象がバンドラでも生じている可能性がある。

それではプロメテウスとバンドラの本質的な差異はどこにあるのかというと、レゴリス層の厚さの違いかもしれない（プロメテウスのレゴリス層が薄く、バンドラが厚い）。実際にプロメテウスは衛星全体の凹凸が激しいのに比べると、バンドラは角がとれた滑らかな姿をしており[20]、厚いレゴリス層の存在と調和的である。ただし力学的環境が良く似た二つの衛星で本当にレゴリス層の厚さに差が生じたのか、生じているとしたらその理由何故か、などは謎として残る。

3.4 ヤヌス、エピメテウスの起源と進化

ヤヌスとエピメテウスは小型衛星の中ではもっともクレーター密度が高い。またこれらの衛星にはチェンクレーターとみられる地形やグループが散見され、形成後数十億年が経過していると考えられている（つまり土星系の初期の段階ですでに存在していたと推測されている[4]）。

ヤヌス、エピメテウスの空隙率は30%程度であり[1]、これは小惑星アイダやエロスとほぼ同じである[21]。そのため内部に割れ目をもつ一枚岩かもしれないし、ラブルパイル構造を持つ可能性も否定できないが、内部が溶融するほどの圧力は生じていない。この2つの天体は、土星系の最初期にはかつて1つであり、砕かれて再集積したという説もある[4]。

ヤヌス、エピメテウスの表面には明るい領域と暗い領域が存在している。暗い物質が明るい領域の上に堆積しているように見えることと、土星系の衛星は主に氷で構成されており内部は基本的に明るいということから判断すると、明るい部分が基盤岩をなしており、その上に暗い物質が堆積していると考えられる。暗い物質は天体のいたるところに分布しているが、標高の低い部分に池のように平たく堆積しているため、エロスのポンドに色外見ともによく似ている（図5）。また、この池状堆積物の上は小さなクレーターが少ないよう

に見え、これもエロスのポンドと類似している。エロスのポンドは月や他の小惑星では見つかっておらず、その起源はよくわかっていない。提唱されている説の一つにダストレベテーションが挙げられるが[22]、ヤヌスエピメテウス軌道では土星プラズマの濃度がとても高い為、ダストレベテーションは極めて生じにくい環境にある（図7）。むしろ振動によって小さい粒子が低地に移動し形成されたのかもかもしれない。

3.5 E環領域の小型衛星の起源と進化

パレネは直径が4kmしかないため、他の大型の氷衛星のように自らの重力によって球体になっているとは考えにくい。このため球状になっている理由が他にあるはずである。E環の粒子は極めて細かく主に μm サイズであると考えられている[7]。パレネはE環粒子の密度の高い軌道に位置しており、E環粒子を集積しているとみられ、細かな粒子しか存在しない環の中で大きな衝突を経験することなく穏やかな成長をしたために球体になったのかもかもしれない。しかし、パレネに衝突する天体はE環粒子だけではない。長い時間のうちには衛星の形が大きく変わるような衝突を経験するはずである。だがこれさえもパレネは経験していない可能性がある。E環はかなり若いとみられているため[23]、パレネの今の姿もここ数百万年の短い期間に生まれたものだとすると、大規模な衝突を経験してなくても不思議は無い。細かい粒子しかない領域で比較的短期間という特殊な条件のもとで、このような球状の天体になったのかもかもしれない。

パレネの筋状の構造はなんなのだろうか。すり鉢状になったクレーターの斜面に垂水線方向に発達していること、急な斜面のある場所だけに筋状構造があり比較的平坦なクレーター底部やクレーターの淵の部分には見られないことから、土砂崩れの一種である可能性が高い（図6）。斜面の筋状構造はおそらくガリーで、標高の高い場所から低い場所へ向かってレゴリスが流れ下ったように見える。このような重力がとても小さい天体で土砂崩れが起きているのは驚くべきことである。パレネがE環内に位置しておりダストが上空から供給されているため、斜面のレゴリスが増え始動角を越えてしまうことがあり、その際にこのような土砂崩れが起きるのかもかもしれない。しかしそうだとすると、なぜ全面を覆ってしまうほどダストが堆積しなかつた

のか、という疑問に直面する。

カリプソにも同様に筋状構造があることが分かっているが、こちらは解像度が不高いため、詳細は分からない。カリプソの場合はグループなどの構造地形の可能性もある。

パレネはほぼ球体である。テレスト、カリプソは小さなクレーターが少ない。天体の表面は概ね滑らかで大きなクレーターが目立つ。また天体表面は全体的に角が取れている。一方でヘレネは凹凸が激しい。これらの差異は、E環粒子の供給フラックスの差によるものかもしれない。パレネと同様にテレスト、カリプソ、ヘレネ、ポリデウスもE環粒子の供給を受けている。そしてE環粒子は供給源と見られるエンセラダス軌道周辺で最も濃く、内側または外側に行くに従って薄くなっていくことが知られている(図8) [7]。筆者らはこれに注目し、E環粒子の供給もパレネ>テレスト・カリプソ>ポリデウス・ヘレネといった違いが生じていると考えている。つまりパレネは衛星の起伏がすべて消し去られるほど多くのE環粒子が供給されているのに対し、テレストやカリプソではそこまで供給量が多くないので衛星の形を変えるほどではないが大きなクレーター以外は埋没した。ところがヘレネではE環粒子が希薄である為、表面に薄く堆積し、標高の高い位置に堆積したE環粒子は雪崩のように流れ落ちガリーが形成されると考えると、一見複雑な進化の結果に見えるE環領域の衛星の外見上の違いが、うまく説明できると筆者らは考えている。

E環領域の小型衛星は密度が知られていないが、おそらく他の密度が知られている小型衛星と同様に密度が小さいラブルパイル構造を持つ天体なのであろう。トロヤ軌道に位置しているE環領域の小型衛星やアルキオニデス群の小型衛星は、土星系の歴史の中でたびたび出現した短命で希薄な環の粒子の一部を集積したものである可能性が高い。

4. 今後明らかにされるべき謎

本稿では鮮明な画像が得られている衛星のみ紹介したが、土星系には他にも興味深い小型衛星が数多く存在している。A環B環F環の内部にはmoonletと呼ばれる環にしては大きな天体が多く存在していることがわかっている。これは最大で直径1kmもある巨大な

ものだが、衛星と見なすか環の粒子と見なすかは議論が分かれている。数値シミュレーションなどでその形成過程などが明らかにされつつあるが、その表層の様子などは画像が得られていないため、詳しいことはわかっていない。今後のミッションによる詳しい探査が望まれる。F環とE環の間にアイガイオン(Aegaeon)という小さな衛星が知られているが、これも表層の様子がわかっていない。アイガイオンはG環と軌道を共有しているため、G環の供給源と見られている。この天体は500m程度の大きさしかない。1km以下のサイズの小天体はイトカワしか知られていない為、今後のミッションによってその表層の様子がわかるとよい比較対照になるだろう。

この論文で紹介した天体はすべてタイタンよりも内側の衛星である。タイタンの外側の小型衛星はこれまでに詳しい探査がなされていないために紹介していない。タイタンの外側の小型衛星はみな軌道が不規則であることから、捕獲された衛星と見られている。その場合、多くがエッジワースカイパーベルト天体起源であると考えられる。このため、タイタンより外側の衛星系を探索することで、いまだ近接探査されたことのない小型エッジワースカイパーベルト天体についての興味深い発見があるかもしれない。表面構造の詳細な撮像やその他の科学観測によって、土星系の小型衛星は表層の物質が必ずしも内部を代表していないことがわかった。A環F環領域の衛星の表層のスペクトルは氷と良く一致するが、内部は氷よりもずっと密度が小さいことがわかっている。A環の粒子を集積してできたこれらの衛星の内部構造を詳細に調査することは、これらの衛星の起源を明らかにするだけでなく、原始太陽系円盤での集積過程に対して興味深い知見を与えてくれるかもしれない。またヤヌスやエピメテウスも、その内部構造がラブルパイルであるのか一枚岩であるのかで(土星系で最も古いと見られる両衛星の)起源が異なってくると考えられる。そのため土星系の小型衛星に関する内部構造の探査は重要な意義があることがわかった。筆者らは、高い精度で表層付近の内部構造を決定するための地中レーダ型のサウンダ機器を開発しているが、土星系探査のようなマルチフライバイミッションを行う際には重要な探査方法であると考えている。カッシーニ探査機は2017年まで稼働することが決まっているが、理想的にうまく稼働したとしても、

現在までで既にミッション全過程の半分を終えている。上で議論した謎を解決するためにも、次の土星系ミッションの実現が熱望される。

引用文献

- [1] Porco, C. C. et al., 2007, *Science* 318, 1602.
- [2] Cuzzi, J. N. et al., 2010, *Science* 327, 1470.
- [3] Smith, B. A. et al., 1981, *Science* 212, 163.
- [4] Stooke, P. J. and Lumsdon, M. P., 1993, *Earth, Moon, and Planets* 62, 223.
- [5] Stooke, P. J., 1993, *Earth, Moon, and Planets* 63, 67.
- [6] Morrison, S. J. et al., 2009, *Icarus* 204, 262.
- [7] Kempf, S. et al., 2008, *Icarus* 193, 420.
- [8] Filacchione, G. et al., 2010, *Icarus* 206, 507.
- [9] Buratti, B. J. et al., 2010, *Icarus* 206, 524.
- [10] Minton, D. A., 2008, *Icarus* 195, 698.
- [11] Charnoz, S. et al., 2007, *Science* 318, 1622.
- [12] Hirata, N. et al., 2009, *Icarus* 200, 486.
- [13] Miyamoto, H. et al., 2007, *Science* 316, 1011.
- [14] Hirata, N. and Miyamoto, H., *Icarus*, in revision.
- [15] Robinson, M. S. et al., 2001, *Nature* 413, 396.
- [16] Colwell, J. E. et al., 2005, *Icarus* 175, 159.
- [17] Whipple, E. C., 1981, *Rep. Prog. Phys.* 44, 1197.
- [18] Coates, A. J. et al., 2005, *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S09.
- [19] Richardson, L. E. et al., 2004, *Science* 306, 1526.
- [20] Stooke, P. J., 1992, *Earth, Moon, and Planets* 62, 199.
- [21] Belton, M. J. S. et al., 1995, *Nature* 374, 785.
- [22] Cheng, A. F. et al., 2002, *Meteoritics & Planetary Science* 37, 1095.
- [23] Baum, W. A. et al., 1981, *Icarus* 47, 84.