特集「太陽系天体の種別とその概念整理」 衛星の内部構造と分類学、準惑星への示唆

木村 淳1

(要旨) 太陽系の構成メンバーは惑星や準惑星だけでなく,衛星も重要な要素のひとつである. "惑星の定義" に関する決議では直接は扱われなかったが、大きさでは惑星に匹敵するものもある衛星もまた、太陽系天体 分類の観点から議論を欠くことはできない. サイズや外見において幅広い多様性を示す衛星だが、氷+岩石 の固体天体という共通性は天体分類上大きな特徴であり、同時に衛星間の個性や種別を生み出す重要な要素 でもある. 本稿ではこれまでの研究によって示された、サイズによる構造の違いや氷岩石比の違いが生み出す進化パターンをレビューするとともに、太陽系外縁天体への示唆や、どのような衛星の定義づけが適切かについて議論する.

1. はじめに

太陽系には様々なサイズや形状、組成の天体が存在 する中で、惑星と並んで主要な構成要素となっている のが衛星である. 人類が古くから慣れ親しみ. 現在は 日本の探査衛星「かぐや」が調査を行っている月は地 球の唯一の衛星だが、外に目を向けると木星や土星な どの外惑星は、数十個もの衛星を従えたミニ太陽系と も言うべき巨大なシステムを形作っている。2007年 末の時点で太陽系には、惑星を周回する衛星だけでも 166 個発見されており、うち144 個には名前が付けら れている(表1). 衛星が持つ特徴としては、第一に大 きさや形状が極めて多様である点が挙げられる. 例え ば木星の衛星ガニメデや土星の衛星タイタンが地球型 惑星に匹敵する大きさを持つ一方で、半径が数km 程 度でいびつな形状を持つものも数多く存在する。第二 の特徴は、大部分の衛星が表面を氷で覆われていると いう組成的な共通性である。地球の月は主に岩石のみ で構成されるが、それ以外のほとんどの衛星すなわち 小惑星帯よりも太陽から離れた。木星以遠の領域にあ る大部分の衛星は、H2O 主体の氷と岩石あるいは氷 のみで出来ている.このような衛星は、月などの岩石 型衛星と区別する意味で氷衛星とも呼ばれているが、 数の多さや組成的な普遍性で見た場合、氷衛星という

1. 宇宙航空研究開発機構

形態こそが太陽系衛星の一般的な姿とも言える.

2006 年夏に行われた惑星の定義に関する決議において衛星は議論の俎上に載らなかったが、惑星に対して数の面で圧倒し一部は大きさの面で惑星に匹敵する衛星というカテゴリを概観しておくことは、太陽系天体の大分類を考える上で欠くことはできない。本稿では、太陽系の衛星に対して我々が持つべき分類学的認識に必要な共通性と特殊性を議論する。これに至るまでのアプローチは様々あるが、ここでは天体の分類における第一義的な方法としてサイズと内部構造の観点から定性的な理解をまとめ、惑星や準惑星というカテゴリと対比して衛星がどのように位置付けられるのかを議論したい。ちなみに衛星は惑星や準惑星を回るものだけではなく、衛星を持つ小天体(主にメインベルト小惑星)も100個以上見つかっている。しかしそれらは全て非常に小さいので、ここでは惑星の衛星のみを

表1: 2007年末の時点における太陽系の衛星数と、惑星系ごとに代表的な衛星の名称。

衛星数	代表的な衛星
1	Moon
2	Phobos
63	Europa
60	Titan
27	Miranda
13	Triton
(3)	Charon
166 (169)	
	衛星数 1 2 63 60 27 13 (3)

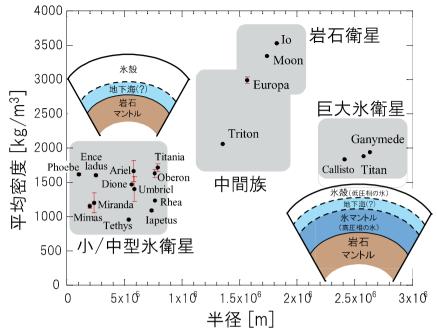


図1: 太陽系の主要な(半径50 km 以上の)衛星の半径と平均密度, および予想される内部構造の模式図.

扱うこととする.

また、惑星の定義付けに際しては準惑星(Dwarf Planets)という新たなカテゴリが注目されたが、これらの天体はサイズの面や氷+岩石の固体天体という組成の面で、衛星との共通項を持っていることを示唆する観測結果が得られている。本稿では衛星の理解が準惑星への強い示唆を与え得るという視点でも話を進めたい。そして最後に、"衛星の定義"をどのように考えるべきかに関して惑星の定義文を叩き台とした議論を試みる。

2. 衛星の内部構造と進化

2.1 サイズと内部構造の関係

一般に衛星に関する観測量は月や火星などの地球近傍天体に比べて圧倒的に少なく、太陽系の全衛星に共通して使える物理量は基本的に大きさと平均密度しかないのが現状である。図1は、太陽系の主要な衛星について半径と平均密度の関係を表したものである。これによると、地球の月や木星の衛星イオとエウロパを除く全ての衛星は、平均密度が約2,000kg/m³かそれ以下であることが分かる。これは衛星が高い氷含有率を

持つことを示している。岩石衛星として例外的に密度が高い地球の月は、そもそもsnow lineの内側にあり多量の氷は持ち得なかった。また木星の衛星イオとエウロパは、その熱史において木星との潮汐力で生じる摩擦熱の寄与が大きいことなどが原因で氷含有率が低いと第一義的には考えられる。

さらに図1によれば、衛星はいくつかのグループに 大別することができる。1つ目は水星をしのぐ大きさ を持った衛星ガニメデを含む大型のグループ、2つ目 はエウロパと海王星の衛星トリトンが属する中間グル ープ、3つ目がそれ以外の小・中型衛星グループであ る。ちなみに準惑星やその候補天体では、サイズ - 密 度関係すら分かっていないものが多い。

天体の大きさの違いは内部の圧力条件に違いを生み出す。太陽系の衛星において、この点は主に氷層構造の違いとして現れる。衛星の表層は低圧結晶構造を持つ固体相の氷の殻で覆われているが、内部圧力の大きい巨大氷衛星では氷殻に加えて高圧結晶相の氷からなるマントルが岩石マントルの上に存在する(図1). H_2O の融点は、この2つの結晶相が現れる中間の圧力(約2GPa)において最も低くなるという特徴を持っているため、衛星内部の熱的状態によってはこの圧力に近い深さ領域で液体の水が存在することも理論的には

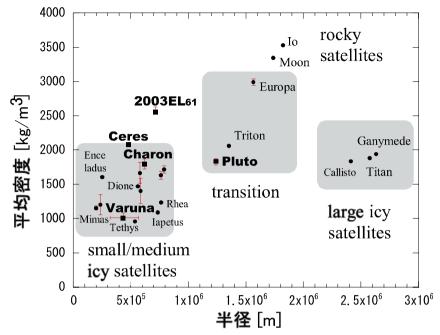


図2: 準惑星および比較的大型の太陽系外縁天体について、平均密度と半径が推定されているものを図1に重ねて示した[5,6,7,8].

あり得る. 実際に一部の衛星において, 地下海の存在する可能性が理論と観測の両面から示唆されている [例えば1, 2, 3].

2.2 サイズによる進化の違い

このようにサイズによって二別される氷層構造を持 つ衛星は、それぞれが異なる熱的構造的進化を経るこ とが理論的に示されている [例えば4]. 詳細は省略す るが、上に述べた構造的違いに加えて、衛星の氷・岩 石比(内部熱源量の違い)が氷層構造の進化に違いを生 み出すことで、太陽系の衛星には異なる3種の進化パ ターンが存在すると考えられている. すなわち小・中 型衛星は放射性熱源が少なく、地下海は形成後短期間 で消滅する. 中間族は、放射性熱源が大きいことと低 圧相の氷の融点が圧力に対して負の依存性を持つ特徴 によって地下海が凍りにくく. 現在まで保たれる可能 性が高い. 巨大衛星は、高圧氷のマントルが岩石から の放射性壊変熱を地下海に伝えるのを阻害してしまう ために地下海は消滅し、上部の氷殻と下部の氷マント ルが接した状態になる、といった明瞭な違いが出てく るのである.

もちろん,これだけで太陽系全ての衛星の構造とそ の進化を説明できるわけではない. 衛星に存在する氷 は H_2O の固体相だけではなく、太陽から離れるに従ってメタン、アンモニア、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素などの氷が増え、融点などの物性を変化させる。また軌道特性によって母惑星との潮汐相互作用が卓越し、これによる付加的な熱源が放射性熱源よりも支配的となっている衛星も存在する。各衛星が固有に持つ環境の違いが、外見や表層活動の細かい多様性を生み出していると考えられる。

3. 準惑星とその候補天体への示唆

1992 年にエッジワース・カイパーベルト内で初めて小天体1992QB1 が発見されて以来、海王星軌道を超える領域には次々と類似の天体が発見され、太陽系外縁天体(海王星以遠天体: TNOs)とグループ化されるようになった。そして現在、外縁天体のうち冥王星とエリス、そしてメインベルト小惑星のケレスが準惑星として新たにカテゴリ化されたのは周知の通りである。これらは太陽を周回する天体として惑星の定義に関する議論の対象となったが、先に述べたように大きさや組成の点では衛星に極めて近いことが、近年の観測から強く示唆されている。図2は、半径と平均密度が分かっている太陽系外縁天体を図1に重ねて示した

ものである。示した天体以外にも、外縁部には準惑星の候補となり得る大型の天体が数多く発見されており、冥王星を含め20個近くの太陽系外縁天体が直径500km以上に達することが分かっている。これによると平均密度は大部分の衛星と同じ2,000kg/m³かそれ以下で、衛星と同様に多量の氷を保持していることが分かる。中でも準惑星の冥王星とエリスはエウロパが属する中間族に近いので地下海の存在を示唆するが、平均密度の低さから予想される放射性熱源の不足や、表面温度が40Kかそれ以下と極めて低いことなどから、海の保持は実際には難しいかもしれない。

また衛星と同じく外縁天体にも、H₂Oの氷だけでなくアンモニアやメタンの氷の存在が確認されている.

[例えば8, 9, 10] ほか, 一部の大型の外縁天体では, トリトンや土星の衛星エンセラダスなどで見られる氷 火山現象の存在が示唆されていたり [11, 12]、 理論計 算からは半径600 km を超える外縁天体では地下海の 存在が可能、という結果も報告されている[13](ただし H₂O-NH₃ 氷の融点降下の影響を考慮する). このよ うに外縁天体は、サイズや組成のみならず表層活動や 内部構造においても衛星との共通点の多さを窺わせる。 特に海王星の衛星トリトンは、母惑星の自転方向と逆 向きに公転する軌道特性や、表面スペクトルに冥王星 との類似点が多く見られることなどから、かつては単 独の外縁天体として存在していたものが、ある時に海 王星に重力的に捕獲されたと考えられており [14], 衛 星と外縁天体とを繋ぐ存在として注目されている。衛 星に比べると外縁天体に関する観測量はさらに少ない と言わざるを得ないが、氷を有する固体天体という大 きな共通点を介して、衛星に対する知見は準惑星、特 に太陽系外縁天体への強い示唆を与えるはずである.

2015年には人類初の太陽系外縁天体探査機New Horizonsが冥王星をフライバイ観測し、さらに2016 ~ 2020年にかけては1つないし複数の外縁天体を探査する予定である(対象天体は選定中). 地上観測では得にくい遠方天体の基礎的な物理量が直接探査で特定されることによって、ようやく太陽系全体の天体分類に必要な、統一した指標を持てるようになることが期待される.

4. 衛星の定義に向けて

2006 夏にIAU は太陽系の惑星の定義を決議したが、その際に衛星の定義に関しては示されず、"今後、天文学連合で検討されて決定する見込み"となった、いまだ衛星の定義に関する具体案は出されていないようだが、第一義的には衛星は「惑星や準惑星および太陽系小天体の周りを公転する天然の天体」と言えるだろう。しかしより厳密な衛星の定義付けを設けることにおいては、惑星の定義を流用するだけでは不適切と思われる。

例えば惑星の定義第二項は、「天体が十分大きな質量を持つために自己重力が固体としての力よりも勝る結果、重力平衡形状(ほぼ球状)を持つ」ことであるが、衛星の場合は球状でないものが数多くある。最も典型的な例が土星の衛星ハイペリオンで、この衛星は長軸と短軸の比が1.6(長軸径が約360 km,短軸径が約225km)の、太陽系最大の非球形天体である。一方で同じく土星の衛星であるミマスは平均直径が約390 km とハイペリオンよりやや大きい程度だが、長軸短軸比は1.1 とかなり球形に近い。従って、球形であることを条件に衛星を定義すると、これまで衛星と呼んできた天体が定義に外れるケースが多数生じてしまう。

また冥王星と衛星カロンの関係のように、両天体のサイズが比較的似通っており、天体間の共通重心が母惑星の表面よりも外側にある場合に、これを従来通りの(準)惑星 - 衛星系とするかあるいは二重天体(二重準惑星)と見なすか、という問題も議論されている。しかし共通重心は衛星の軌道進化の過程で変化するため、これを衛星の定義として用いるには不適切かもしれない。

5. まとめ

以上のように、衛星はサイズと密度という共通の指標に沿って2種の内部構造と3種の進化パターンを持ち得ることを示した。"氷と岩石から成る固体天体"という衛星に共通の特徴は、太陽系外縁天体にもシームレスに当てはまるものだろう。衛星や外縁天体では現在もなお様々な探査計画が進んでおり、日々新たなデータがもたらされている。衛星の定義付けや分類、概念整理に役立つ知見がさらに得られることを期待し

たい.

謝辞

本稿を執筆する機会を与えて下さいました榎森啓元博士(秀明大学)に厚く御礼申し上げます。また査読者・編集者の方から多くの有意義なコメントを戴きましたことに深く感謝致します。

参考文献

- [1] Kimura, J. et al., 2007, EPS 59, 113
- [2] Kivelson, M. G. et al., 2000, Science 289, 1340.
- [3] Hussmann, H. et al., 2002, Icarus 156, 143.
- [4] 木村淳·栗田敬, 2006, 遊星人 15, 20.
- [5] Brown, M. E. and E.L. Schaller, 2007, Science 316, 1585.
- [6] Grundy, W. M. et al., 2005, Icarus 176, 184.
- [7] Sicardy, B. et al., 2006, Nature 439, 52.
- [8] Barucci, M. A. et al., 2005, A&A 439, L1.
- [9] Brown, M. E. et al., 2005, Astrophys. J. Lett. 632, L45.
- [10] Licandro, J. et al., 2006, A&A 445, L35.
- [11] Cook, J. C. et al., 2007, A&A 663, 1406.
- [12] Jewitt, D. C, and J. Luu, 2004, Nature 432, 731.
- [13] Hussmann, H. et al., 2006, Icarus 185, 258.
- [14] Agnor, C. B. and D. P. Hamilton, 2006, Nature 441, 192.