

氷衛星の起源と進化の解明に向けて

— カッシーニ探査がもたらしたインパクト —

倉本 圭 KURAMOTO Kiyoshi

カッシーニの土星系探査によって、目覚ましい発見が続いている。そのいくつかについては、本誌既刊号でも紹介されてきた。本稿ではカッシーニの探査が、土星の氷衛星の起源と進化の理解をどう刷新し、またどんな新たな謎をもたらしつつあるのか、いくつかの問題に焦点をしばって論じてみたい。

氷の起源をめぐって

土星には現在 50 個以上の衛星が見つかっている。その中で古くから知られてきたミマス、エンケラドス、テーチス、ディオオーネ、レア、タイタン、ヒペリオン、イアペトスの 8 つは特にサイズが大きい。これら土星の主衛星は、その平均密度や表面反射スペクトルの特徴から、 H_2O 氷が重要な構成成分になっていると考えられる。

公転方向と軌道面がそれぞれ母惑星の自転方向と赤道面にほぼ一致している衛星を規則衛星といい、土星の主衛星もこれに当てはまる。木星型惑星の規則衛星は、母惑星の周囲に形成されたガスと塵からなる円盤から形成されたと考えられている。木星型惑星が原始太陽系星雲ガスを取り込む際に、周惑星円盤が形成されることは自然だが、その力学的・物質科学的過程の詳細に関しては未知な点が多い。

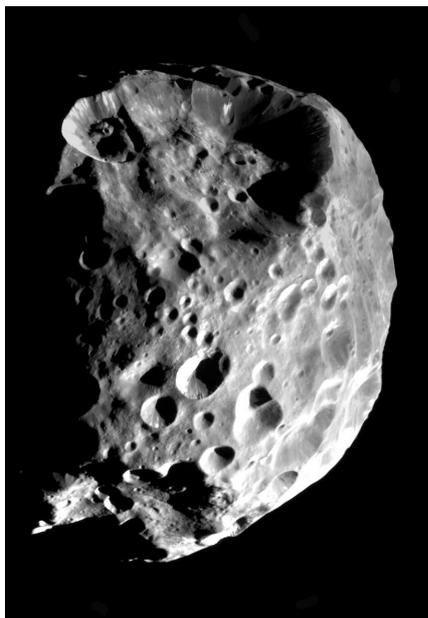


図1 フェーブ



図2 タイタン北極地方の雲

カッシーニは土星系に到達した際に、逆行衛星で捕獲起源と考えられるフェーベに接近し、その平均密度と表面組成を調べた。その結果、フェーベは主衛星よりも水成分に乏しいことが明らかになった (Johnson and Lunine, 2005)。冥王星とカロン、海王星の逆行衛星トリトンも比較的平均密度が高く、水成分に乏しい。したがって、今回のデータは周土星円盤で水成分の割合が増える過程があったことを示唆する。周惑星円盤は狭い空間に大量の星雲ガスが閉じ込められている分、原始太陽系星雲よりもガス密度が桁高い。そのために、酸素を帯びた主要な星雲ガス分子種の一つである CO が H_2 によって還元されて H_2O が生じ、水成分の割合が増したのかもしれない。

ボイジャー時代には不確定性の大きかった主衛星の平均密度 (質量) も、精度良く決定された (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par)。その結果、水成分の割合が衛星によっていちじるしく異なることが明らかになってきた。たとえば、テーチスの平均密度は $0.96g/cm^3$ と、水成分の割合が 100% に近いことが示唆されるのに対して、ほぼ同じサイズのディオオーネは $1.47g/cm^3$ と岩石成分がかなり含まれていることを示す値となっている。半径 500km を超えるこれらの衛星に高い空隙率は考えにくく、周土星系円盤あるいは誕生後の衛星系で、何らかの水成分の再分配過程があったことが示唆される。

その具体的なメカニズムは今のところまったく不明だが、円盤内での水成分の蒸発・凝結を伴った、ダスト粒子とガス間の相対運動、氷マントルと岩石コアに分化した原始衛星への破壊的巨衝突とそれによる放出物の再集積、集積期の巨大氷衛星からの水蒸気の流出とそれらの再凝結と集積、などが可能性として考えられる。土星系では木星系や天王星系と異なって、一つの衛星 (タイタン) に衛星系全体の大部分が集中している。この理由も良くわかっていないが、水成分の再分配と何らかの関係があるのかもしれない。

タイタンの起源と大気の形成

水星を超えるサイズを有する巨大氷衛星タイタンの最も顕著な特徴は、濃い大気をもつことであり、その起源には古くから興味をもたれてきた。この土星系の巨人も小天体の集積によって形成されたに違いないが、その際に解放される重力エネルギーは質量が大きい分とても大きくなる。単位質量あたりに解放される平均重力エネルギーは H_2O の蒸発熱を上回る。

土星を周回しながらの集積過程では、公転周期が短いため、集積時間は 100 ~ 1000 年のオーダーとなる。この時間内には放射冷却はそれほど進まないため、解放された重力エネルギーによってタイタンは一度加熱され、大規模な溶融を起こす。

集積期のタイタンの熱史を数値的に解いた研究 (Kuramoto and Matsui, 1994) によれば、タイタンが半径 1000km 以上に成長すると表面温度が水の融点を超えて海ができ始める。海では岩石成分が沈み、未分化なコアを覆う岩石層が形成される。さらに成長すると、厚い原始水蒸気大気で覆われるようになり、その保温効果も相まってさらに地表面温度が上昇する。同時に大気の一部はタイタンの重力を振り切ってタイタンの重力圏外に流出する (図 3)。

このようなタイタン誕生のモデルは、カッシーニの決めたタイタンの大気組成 (表 1) の特徴に説明を与えることができる。今回の探査で、大気中には ^{36}Ar がごくわずかしき含まれていないことが判明した。これは大気の主成分である N_2 がタイタンの材料物質から直接脱ガスしてもたらさ

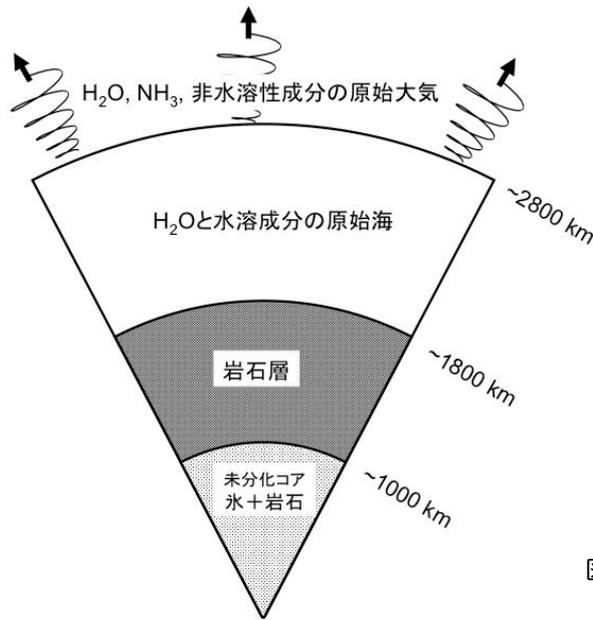


図 3 集積完了直前のタイタンの構造 (Kuramoto and Matsui, 1994 を一部改)

表 1 タイタン大気的主要成分の化学・同位体組成 (Niemann et al., 2005)

成分	モル分率	備考
N ₂	0.98	
CH ₄	0.049	地表面
H ₂	~0.001	
³⁶ Ar	2.8×10 ⁻⁷	
⁴⁰ Ar	4.3×10 ⁻⁵	
	同位体比	タイタン / 地球
¹⁴ N/ ¹⁵ N	183	0.67
¹² C/ ¹³ C	82.3	0.92
D/H	2.3×10 ⁻⁴	1.44
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	154	0.51

れたとする直接起源論を否定する。N₂と Ar はともに化学的に不活性で、揮発性やクラスレート氷への取り込まれ方など、物理化学的特性が似ている。したがって、N₂分子が材料物質に取り込まれたなら、Ar も同時に取り込まれ、大気的重要な成分となるはずだが、実際には Ar は大気中ほとんど含まれていなかった。

次に注目されるのは⁴⁰Ar/³⁶Ar 比が原始太陽系星雲の値 3×10⁻³と比較して非常に大きな値になっていることである。⁴⁰Arは半減期約 13 億年の⁴⁰Kの放射壊変によってもたらされる同位体であるため、この比が高いことは、現在の大気中の Ar の大部分が比較的長期間にわたってタイタン内部から脱ガスしてきたことを示唆する。

原始水蒸気大気の流出が起こったとすると、液体の水に溶けにくい揮発性成分は集積期のタイタン表面からは失われてしまう。これは³⁶Arが現タイタン大気に欠乏していることを説明する。また集積初期の重力エネルギー解放は小さいため、中心部には冷たい揮発性物質に富む未分化コアが残る。未分化コアは集積完了後に重力不安定を起こして岩石層と入れ替わり、タイタンの浅部へ揮発性物質をもたらす。そして潮汐加熱や放射壊変熱で昇温することによって、揮発性物質

の一部が表面へ脱ガスしたとすれば、現在の大気を説明することができる。

カッシーニによって明らかにされたタイタンの地表には、クレーターが非常に少なく、地表面の更新が盛んなことを物語っている。また氷の火山と考えられる地形も見出されている (Sotin et al., 2005)。タイタンでは地球と同様に、火山活動によって大気へ揮発性物質が供給されているのかもしれない。

タイタンの大気中の CH_4 は徐々に光分解されるため、その寿命は 1000 万年程度とみられ、太陽系の年齢に比べて短い。そこでかつては、地表に深さ数百メートル以上の液体の CH_4 と C_2H_6 の海が広がっており、大気から失われた分が蒸発して補給され、逆に光化学生成物である C_2H_6 が海へ溶解してゆくという、メタン海仮説が提唱された。しかしカッシーニの探査によって、メタン海は存在していないことが明らかになった。タイタン大気の連続脱ガス起源モデルは、メタン海なしに現在の大気を一応説明できる点でも有利である。

タイタンの表面には、流体による浸食地形や湖沼地形が豊富に存在し、また降雨性と考えられる雲も撮影されている (Tomasko et al., 2005; Porco et al., 2005; Stofan et al., 2007)。絶対温度が 100K を割るタイタン表層の条件下では、その作業物質は CH_4 である。物質がまったく異なるにもかかわらず、地球における水循環に伴うものと相似した地形群や気象現象が観察されることは、実に驚くべきことである。このような相似性が表層にとどまるのか、あるいは地球同様に揮発性物質が表層と内部を循環しつつタイタンの表層環境を決めてきたのかを考えることは、これからの面白いテーマであろう。

エンケラドスからのメッセージ

エンケラドスは半径約 250km の比較的小さな衛星だが、氷衛星の潮汐進化、材料物質、さらには熱・化学進化と大気形成、の解明につながる豊かな手がかりを私たちにおくり届けてくれている。

この小型衛星は、“Tiger stripes” と呼ばれている南極に近い 4 本の地溝帯から、 H_2O を主成分とする噴煙を放出していることが、カッシーニによって発見された (Porco et al., 2006)。噴煙には CO_2 , N_2 , CH_4 が含まれており、比較的揮発性に乏しい H_2O と CO_2 を除くと、タイタンの大気組成と合致する点が興味深い。



図4 エンケラドス

噴煙の噴出域は周囲よりも高温なことが観測されており、何らかの熱源の存在を示している。エンケラドスのサイズを考えると放射壊変熱は熱源としては力不足で、木星系のイオやエウロパ同様に、潮汐加熱が主要な熱源と考えられる。エンケラドスはディオオーネと 2:1 の平均運動共鳴 (公転周期の比がちょうど 2:1) の状態にあり、ディオオーネの効果的な重力の作用で、軌道が真円からやや歪んでいる。そのために土星の及ぼす潮汐歪が時間変化し、エンケラドス内部に潮汐熱が生じる。

エンケラドスから放出されている H_2O のフラックスは

10~100kg/s と推定されており (Waite et al., 2006)、仮にこれを 45 億年間積分すると $1.4 \sim 14 \times 10^{18}$ kg と、エンケラドスの総質量 1.08×10^{20} kg と比較して無視できない大きさとなる。エンケラドスの平均密度が比較的大きいことは、水成分の放出で説明がつくのかかもしれない。

水蒸気の噴煙を説明するために、内部がどれほどの高温になっているのかは、議論になっている。水にほとんど溶けない N_2 と CH_4 が噴煙に含まれていることから、地下の高温部に液体の水が貯えられており、それが噴出するという素朴な理解には修正が必要かもしれない。クラスレート氷が分解することで放出されたガス分子が噴煙を加速する、というモデルも提案されており (Kieffer et al., 2006)、もしこれが本当なら、エンケラドス内部に必ずしも液体の水は存在していないとみてよいだろう。

エンケラドスに CO_2 , N_2 , CH_4 はどのようにもたらされたのだろうか。 CO_2 は熱力学的には星雲ガス中で不安定な分子種だが、希薄な分子雲や外部太陽系の環境下では、水で覆われた塵粒子上での光化学反応などによって比較的豊富に合成され、また一度形成されると、蒸気圧が低いために氷成分として留まりやすい分子である。一方の CH_4 は星雲ガス中で熱力学的に安定な分子であり、現在の木星型惑星大気における主要な炭素化合物である。土星系の衛星の材料物質は、より始原的で非平衡過程で作られたものと、その後の熱化学過程を受けたものの混合物なのかもしれない。

一方、これらの成分の一部は、衛星内部の化学反応によって生じたとする考え方もある。ケイ酸塩による NH_3 の酸化による N_2 生成 (Matson et al., 2006) や、有機物の熱分解とケイ酸塩との化学反応などがその候補として挙げられる。これらの考え方の利点は、 N_2 に希ガスが伴っていないことをうまく説明できることで、タイタン大気の N_2 もこのようにして生成したのかかもしれない。また、前生物学的な化学進化や原始生命系の可能性にもつながる魅力的な考え方といえる。

(北海道大学 大学院理学院 宇宙理学)

文 献

- Johnson, T. V. and Lunine, J. I., 2005: Saturn's moon Phoebe as a captured body from the outer Solar System. *Nature*, 435, 69-71.
- Kuramoto, K. and Matsui, T., 1994: Formation of a hot proto-atmosphere on the accreting giant icy satellites: Implications for the origin and evolution of Titan, Ganymede, and Callisto. *J. Geophys. Res.*, 99, 21183-21220.
- Niemann, H. B. et al., 2005: The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, 438, 779-784.
- Tomasko, M. G. et al., 2005: Rain, winds and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface. *Nature*, 438, 765-778.
- Stofan, E. R. et al., 2007: The lakes of Titan. *Nature*, 445, 61-64.
- Porco, C. C. et al., 2005: Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature*, 434, 159-168.
- Porco, C. C. et al., 2006: Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science* 311, 1393-1401.
- Waite, J. H. et al. 2006: Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure. *Science* 311, 1419-1422.
- Kieffer, S. W., et al., 2006: A clathrate reservoir hypothesis for Enceladus' south polar plume. *Science*, 314, 1764-1766.
- Matson, D. L., et al., 2006: Enceladus' interior and geysers ? possibility for hydrothermal geochemistry and N_2 production, *Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXVII*, abstract 2219.