

太陽系

Saturn's colossal ring

土星の巨大な環

Matthew S. Tiscareno and Matthew M. Hedman

Nature Vol.461(1064-1065)/22 October 2009

巨大な土星の環が発見された。この環は塵が集まってできたもので、惑星に付随する環としては最大のもの。今回の発見は、太陽系の謎の1つを解き明かすカギを握っている。

米国ヴァージニア大学の Anne Verbiscer らは、土星の周囲を回る巨大な環を発見し、*Nature* 2009年10月22日号1098ページで報告した¹。この環は、土星の環の中で最もかすかなものであり、その面積は、美しい主環(かん)の約1万倍を占める。Verbiscer らは米航空宇宙局(NASA)のスピッツァー宇宙望遠鏡を使い、この環が放つかすかな輝きを、遠赤外線領域の波長で検出することに成功した。この環は、主に、土星の遠く離れた衛星であるフェーブから供給された塵でできているとみられる。また、今回の環の発見は、「土星の衛星イアペトゥスの色がツートンカラーである原因は、フェーブからの塵状物質による」というこれまでの仮説を裏付けるものである。

今回の「フェーブ環」(図1)は、同じ土星のE環や木星のゴッサマー環など、外部太陽系でこれまで見つかった非常にかすかな環とよく似ている。こうした環をおもに構成している微粒子(直径100 μm 未満)は、衛星などから常に補充され続けていなければならない。なぜなら、こうした微粒子は、属している惑星軌道から、極めて短期間(1000年未満)のうちに取り除かれてしまうからだ。「フェーブ環」は、おそらく木星のゴッサマー環のように、衝突によって衛星表面からはじきとばされた塵でできている²。一方、土星のE環は、衛星エンケラドスの内部から出る間欠泉によって補充されている。

しかし、「フェーブ環」は、ほかの塵の環とはその大きさが大きく異なっている。コア半径(環の密度が最大に達する場所の土星からの距離)は土星の半径の約200倍で、これまで太陽系最大の惑星環だったE環の50倍にもなる。また総質量は、その巨大な大きさのためにE環の少なくとも10倍あるが、粒子数密度は20個/ km^3 で、E環の数千万分の1にすぎない¹。

「フェーブ環」を作っている物質の行方こそ、今回の発見で最も興味深い側面かもしれない。E環を作っている氷の塵はエンケラドスからまき散らされたもので、内側の衛星表面を覆い、それを明るく見せているようだ³。しかし、「フェーブ環」の塵は土星に向かってらせん状に降下していくと考えられ、その多くは、土星の大型衛星のうちで最も外側にあるイアペトゥスによって、掃き集められることになる。このイアペトゥスの表面パターンこそ、300年来のミステリーなのだ。

太陽系の多くの衛星と同じように、イアペトゥスは属している惑星(土星)に対して、常に同じ面を向けている。したがって、その運動方向に対しても、常に同じ面(先行半球)を向けている。このイアペトゥスの先行半球は、太陽系で最も暗い天体表面の1つである(宇宙へ反射される太陽光の割合、つまり反射率が約4%)。ところが、反対側の後行半球と極はとても明るいのだ。そして、中間の明るさの表面はほとんど存在しない⁴。イアペトゥスのこの奇妙な配色の理由として、最も可能性が高いのが、フェーブからの塵だと長く考えられてきた^{5,6}。しかし、この考えは必ずしも広く支持されていたわけではなかった。フェーブとイアペトゥスの暗い部分のスペクトルは、正確に一致しているわけではないし、また、この違いを、塵が超高速でイアペトゥスと衝突し、塵とイアペトゥスの本来の表面物質とが混合することによって説明できるかどうか、まだはっきりしない。

さらに、イアペトゥスの極に暗い物質がないことは、塵流入による汚染という単純なモデルでは予想外のことだ。もっともこれは、塵の流入とその後の熱過程を考慮したモデルで説明できるかもしれない。一方、これに代わる仮説としては、暗い物質が、原因は不明だがイアペトゥス内部から来た、というものがある。しかし、暗い場所が先行半球に集中している事実を、

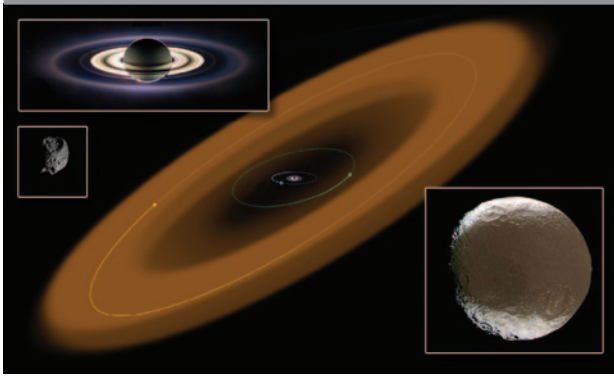


図1 土星の巨大な環。新たに発見された土星をめぐる「フェーベ環」のイラスト。「フェーベ環」は少なくとも直径2500万kmに及び、惑星を回る環としてはこれまでに見つかった中で最大のものだ。この環は、土星の衛星フェーベの軌道と密接に関係している。フェーベは、土星から遠いところにある不規則衛星（軌道が特殊な衛星）のうちで最大のものであり、明らかにこの環の材料の大部分の供給源である。この環は太陽の影響のために傾いている。環を作っている塵は、土星へ向かってらせんを描いて降下し、土星の衛星イアペトゥスの先行半球にぶつかり、イアペトゥスの独特のツートンカラーの原因になっているとみられる。図には、土星の最大の衛星タイタンの軌道、土星、土星のほかの環も示した。

この仮説で説明するのは難しい。Verbiscerらが今回、土星を囲む塵の巨大円盤を発見し、それがフェーベの軌道に一致するのを示したことは¹、イアペトゥス上の暗い物質が外部由来であることの強い証拠になる。しかし、今回見つかった塵の起源と行方を決めるには、まだ調べることが数多く残っている。

「フェーベ環」の塵が土星へ向かってらせん状に降下していくとき、その一部はイアペトゥスを通過し、次にぶつかる可能性の高い標的である、衛星ヒペリオンと衛星タイタンへと向かう。ヒペリオンはカオス的自転をしているため⁷、イアペトゥスのように非対称にではなく、塵で均等に覆われるはずだ。タイタン表面には複雑な化学現象があり、塵の流入はそれにもう一つ要素を加えることになる⁸。

この巨大な環の構造とスペクトル特性をより精密に決定するには、さらなる観測が必要だ。特に、可視光での相補的な測光（天体の明るさの測定）をすれば、構成粒子の大きさ分布と反射能について、詳しい情報が得られるだろう。環の構成粒子は本当に、その推定されている供給源（フェーベ）や目的地（イアペトゥスの先行半球）と同じくらい暗い色をしているのだろうか。さらに、そうした観測から、フェーベ以外のほかの衛星が、この環に塵を供給しているかどうかもわかるかもしれない。フェーベは土星の遠い衛星の中では特別に大きい、大きいほうが塵の源である可能性が高いわけではない。衛星が大きければ天体衝突の標的となりやすく塵も作りやすいが、表面重力も大きくなるので噴出物をより強く引き留める。塵を作るのにどれほどの大きさの衛星が最適なのか、まだ明らかではない²。

Verbiscerらのデータによれば¹、今回発見された環は、事実上、フェーベからの塵できていることを示している。この環の垂直断面（環は地球から見るとほとんど真横から見る形になる）は2層構造を示す。フェーベは傾いた軌道に沿って進むためにその運動は垂直方向にぶれ、環の厚さはこのフェーベの垂直方向の移動距離と一致している。この構造は木星の環と非常によく似ており、フェーベから生じる塵の集団に予想される特徴をよく表している²。

環の構成粒子は、Verbiscerらが主張するように¹、かつてフェーベに大衝突があったためにフェーベ由来のものが多くなっているのかもしれない^{9,10}。大衝突が起こると、氷や

岩のセンチメートル大やもっと大きな塊ができる。こうした塊は太陽系の年齢ほどの時間、軌道にとどまることができる。塊はやがてフェーベ由来の塵を作り、その塵の軌道はフェーベの軌道の特性を維持していこう。しかし、土星の遠い衛星であるフェーベの小さな兄弟衛星たちも、今回見つかった環を構成する塵を作るのに重要な役割を果たし、イアペトゥス上の化学現象にも関係していると思われる。

太陽系のほぼすべての天体が、上から見たときに反時計回りに自転や公転をしているが、「フェーベ環」は逆向きに回転（逆行運動）していることはほぼ間違いなく、逆行していることがわかった最初の環となった。また、惑星の赤道に対して大きく傾いている点でも、初めての環である（27度傾いている）。いずれの特徴も、環の源になった土星の遠い衛星そのものの特徴であり、フェーベを含め、逆行軌道をとるこれらの衛星の多くは、土星の赤道部のふくらみよりも、太陽からより強く影響を受けている。

ほかの惑星のまわりにも巨大な環が存在しているかどうか、調べてみる価値がある。木星の衛星ヒマリアは、フェーベよりもわずかに小さい。そして木星の衛星カリストの色合いは、コントラストの面でも分布の面でもイアペトゥスほど極端ではないが、実際に明るい場所と暗い場所があり、その先行半球と後行半球とでスペクトルが異なっている¹¹。今後の観測で、木星やほかの惑星にも巨大な環が存在することが明らかになるかもしれない。あるいは、土星の巨大な環は、もっと有名な主環と同様、とてもユニークな存在であり続けるのかもしれない。（新庄直樹 訳）

Matthew S. Tiscareno と Matthew M. Hedman、コーネル大学天文学科（米国）。

1. Verbiscer, A., Skrutskie, M. F. & Hamilton, D. P. *Nature* **461**, 1098–1100 (2009).
2. Burns, J. A. *et al. Science* **284**, 1146–1150 (1999).
3. Verbiscer, A. *et al. Science* **315**, 815 (2007).
4. Porco, C. C. *et al. Science* **307**, 1237–1242 (2005).
5. Soter, S. *IAU Colloq.* **28**, abstr. (1974).
6. Burns, J. A., Hamilton, D. P., Mignard, F. & Soter, S. *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.* **104B**, 179–182 (1996).
7. Wisdom, J., Peale, S. J. & Mignard, F. *Icarus* **58**, 137–152 (1984).
8. Lunine, J. I. & Lorenz, R. D. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **37**, 299–320 (2009).
9. Nesvorný, D., Alvarellos, J. L. A., Dones, L. & Levison, H. F. *Astron. J.* **126**, 398–429 (2003).
10. Turrini, D., Marzari, F. & Tosi, F. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **392**, 455–474 (2009).
11. Moore, J. M. *et al. in Jupiter: The Planet, Satellites, and Magnetosphere* (eds Bagenal, F., Dowling, T. E. & McKinnon, W. B.) 397–426 (Cambridge Univ. Press, 2003).