惑星地質ニュース
PLANETARY GEOLOGY NEWS
Vol.18 No.2 June 2006
発行人：惑星地質研究会　小森長生・白尾元理・出村裕英
事務局：〒193-0845　八王子市初沢町 1231-19-B410 小森方
TEL & FAX: 042-665-7128
E-mail: motomaro@ga2.so-net.ne.jp
郵便振替口座：00140-6-535608

太陽系の最果てに広がるエッジワース・カイパーベルト天体

布施 哲治　FUSE Tetsuharu

すいきんちかもくどってんかいめい―― 80 年ほど前に現在の形となったこの呪文。手作り望遠鏡で偶然に見つかった「てん」、天体力学による計算が発見をもたらした「かい」、写真乾板を用いたサーベイ観測が写し出した「めい」。呪文が現在の形になってから約 20 年後の 1950 年前後、太陽系外縁部にさらなる天体の可能性が発表された。その存在が確認されたのは、いまからわずか 14 年前の 1992 年のこと。我々はいま、太陽系発見史の流れのまっただ中にいる。

EKBO の予言から発見へ

海王星や冥王星の軌道の外にも天体があるに違いない。いまから 50 年以上も前に、そう考えたのがアイルランド生まれのエッジワース (K. Edgeworth) と アメリカ人のカイパー (G. Kuiper) である。2 人は「惑星になりきれなかった氷の小天体が海王星軌道の外側にベルト状に分布しており、しばしば太陽系内部に入り込み彗星になる」というアイデアを発表した。

カイパーがエッジワースの論文を引用しなかったこともあり、太陽系外縁部に広がる小天体を単にカイパーベルト天体 (Kuiper Belt Object: KBO) と呼ぶことがある (特に、アメリカ人はそうである)。本稿では歴史的な経緯にしたがい、 エッジワース・カイパーベルト天体 (Edgeworth-Kuiper Belt Object：EKBO) と記す。より一般的には、汎海王星天体 (Trans-Neptunian Object: TNO) ということもある。EKBO の広がりがエッジワース・カイパーベルト (EKB) だ。現在では、原始惑星系円盤内で成長した微惑星の生き残りが EKBO であると考えられている。

最初の EKBO は、マウナケア山頂のハワイ大学 2.2 メートル望遠鏡で長年 EKBO 探査をしていたジューイット (D. Jewitt) とルー (J. Luu) が 1992 年 8 月 30 日に発見した。1992 QB1 と呼ばれるこの EKBO の軌道要素は、円軌道を仮定し、軌道長半径 41.197 天文単位、軌道傾斜

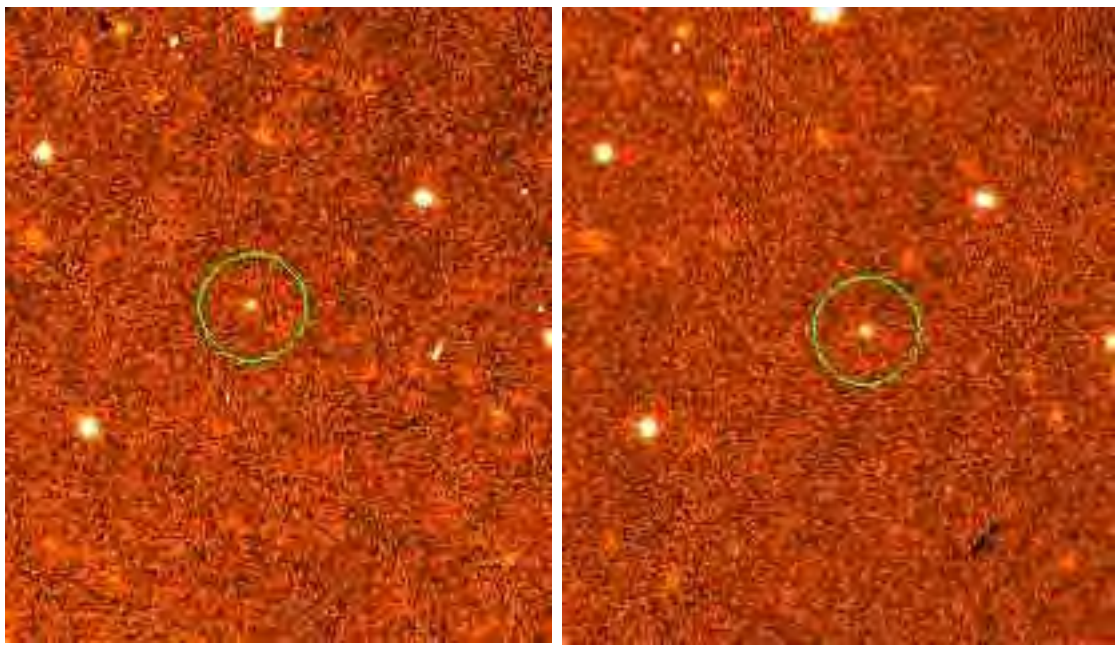


図 1　2005 年に発見した、直径数十 km 程度の EKBO の動き。

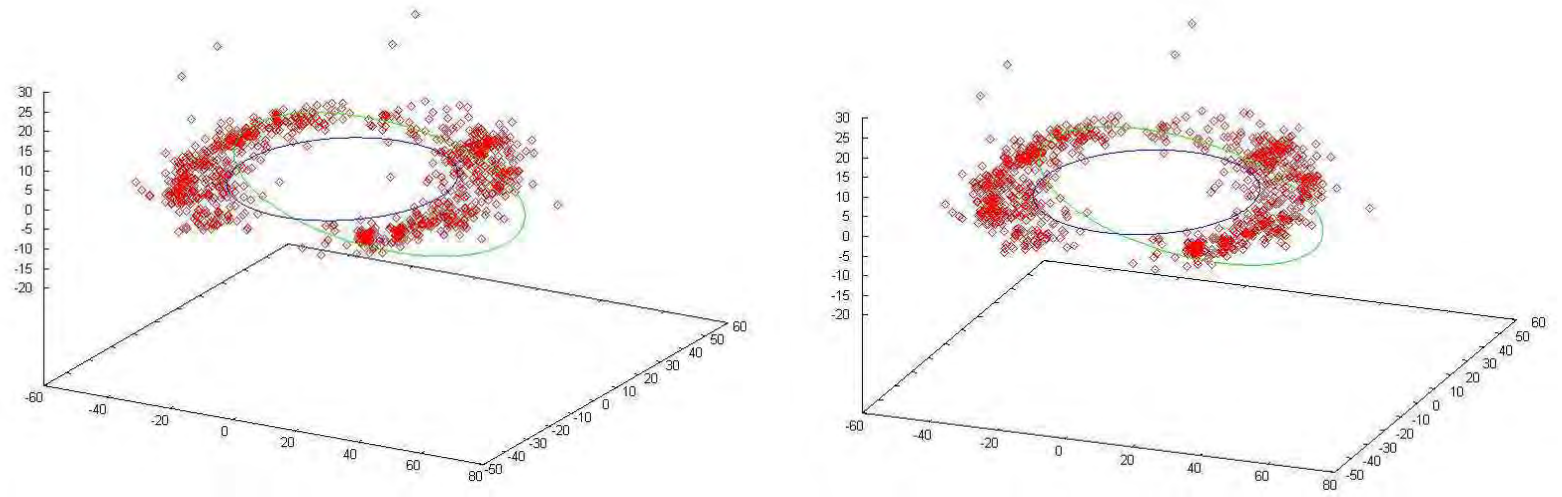


図 2　2010 年 1 月 1 日における約 1000 個の EKBO の位置と海王星・冥王星の軌道。交差法で立体視ができる。たて軸・よこ軸の数字は AU。

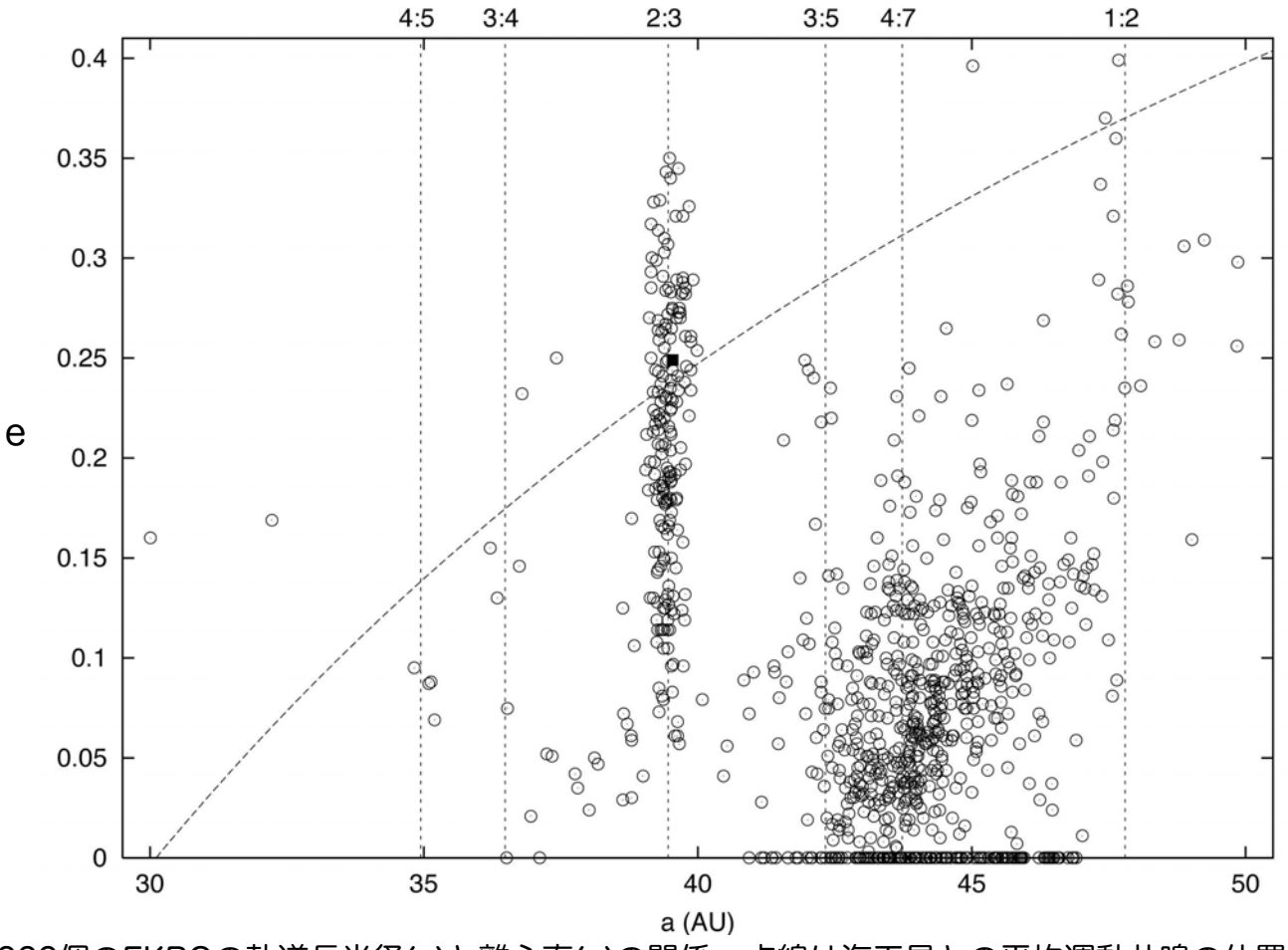


図3　約1000個のEKBOの軌道長半径(a)と離心率(e)の関係。点線は海王星との平均運動共鳴の位置で、左下から右上に伸びる曲線は各軌道長半径において海王星軌道と近日点が交わる最小の離心率の値。■は冥王星の値。

角 2.334°で、反射率を彗星の核と同じ 4%と仮定すると大きさは直径約 200km である。

1992 QB1 の発見後、世界中の天文台で EKBO の探査がさかんに行われるようになったことは容易に想像がつく。現在までに約 1000 個の EKBO が見つかった。 図 1 に、私が 2005 年にすばる望遠鏡による観測で発見した EKBO が約 2 時間で移動する様子を示す。また、2010 年 1 月 1 日における、既知の EKBO の位置と、海王星、冥王星の軌道および同日の位置を描き、交差法で立体視ができるよう 2 つを並べた（図 2）。発見された EKBO が少ない 2 つの経度は、背景に星が多い天の川の方向にあたることに注意したい。EKB に広がる天体の総質量は、地球質量 の 0.08 倍程度と考えられる。

発見された EKBO の軌道長半径に対する離心率の値を図 3 に示した。冥王星と同じ、海王星と 2：3 平均運動共鳴には多数の EKBO が存在する一方、1：2、 3：4、3：5、4：5、4：7 の各平均運動共鳴にも見つかっているのが特徴だ。

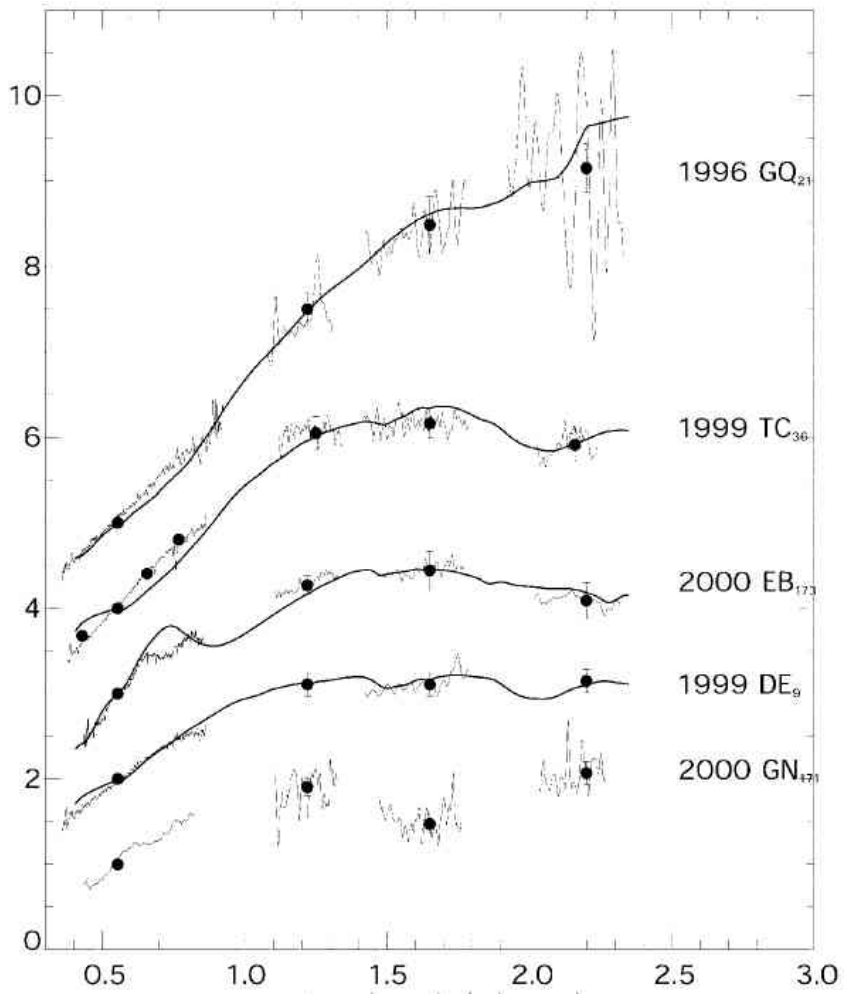


図4　EKBO の近赤外線域の反射スペクトルと相対測光観測（●）の結果 (Boehnhardt et al. 2003)。実線は、実験室で作った表面物質モデルの反射スペクトル。横軸：μ m、縦軸：反射率。

いろいろな EKBO の仲間たち

力学的な特徴によって、EKBO にはいくつかの分類がある。海王星と平均運動共鳴にあるものが共鳴 (レゾナント Resonant) EKBO で、プルチーノ (Plutino) は冥王星と同じ 2：3 平均運動共鳴にある EKBO のことをいう。図 3 や 図 4 に入っていないが、軌道長半径がさらに大きく、離心率、軌道傾斜角が共に大きな EKBO も見つかっている。これらは過去に重力的な散乱によって飛ばされたと考えられることから、散乱 (スキャッタード Scattered) EKBO と呼ばれる。いずれにも属さない小さな離心率と軌道傾斜角を持つものが古典的 (Classical) EKBO である。

EKBO がお互いの重力散乱や衝突により、太陽系内部へ軌道進化した天体がケンタウルス族と考えられている。同様に、近日点が太陽に近い軌道になることで、彗星の中でも軌道傾斜角が比較的小さな短周期彗星の木星族彗星になることが コンピュータ・シミュレーションによって確認されてきた。しかし、発見された EKBO、ケンタウルス族、彗星核の大きさの違いは未解決の問題である。

50 天文単位よりも大きな軌道長半径を持つ古典的 EKBO がほとんど見つかっていないというのが「50 天文単位問題」だ。EKB を生成した原始惑星系円盤は 数百天文単位まで広がっていたとされる一方、現在の観測では 100 天文単位にある数百 km サイズの天体も十分発見できる。EKBO 同士や惑星との力学的メカニズムや、恒星接近などの現象により、現在の EKB 構造になったと考えられるが、 詳しいことはわかっていない。

EKBO の明るさと反射率がわかれば大きさがわかるものの、反射率が測定された EKBO は少ない。約 2%の反射率の 1993 SC は直径約 330km、約 7%のヴァルナ (20000 Varuna) は約 900km と得られた。彗星核と同じ反射率 (4%) を仮定すると、これまでに見つかった多くの EKBO の直径は数百 km といえる。明るい EKBO については変光観測が行われ、自転周期が求められた。例えばヴァルナは 6.35 時間、セドナ (90377 Sedona) は 10.3 時間、(29981) 1999

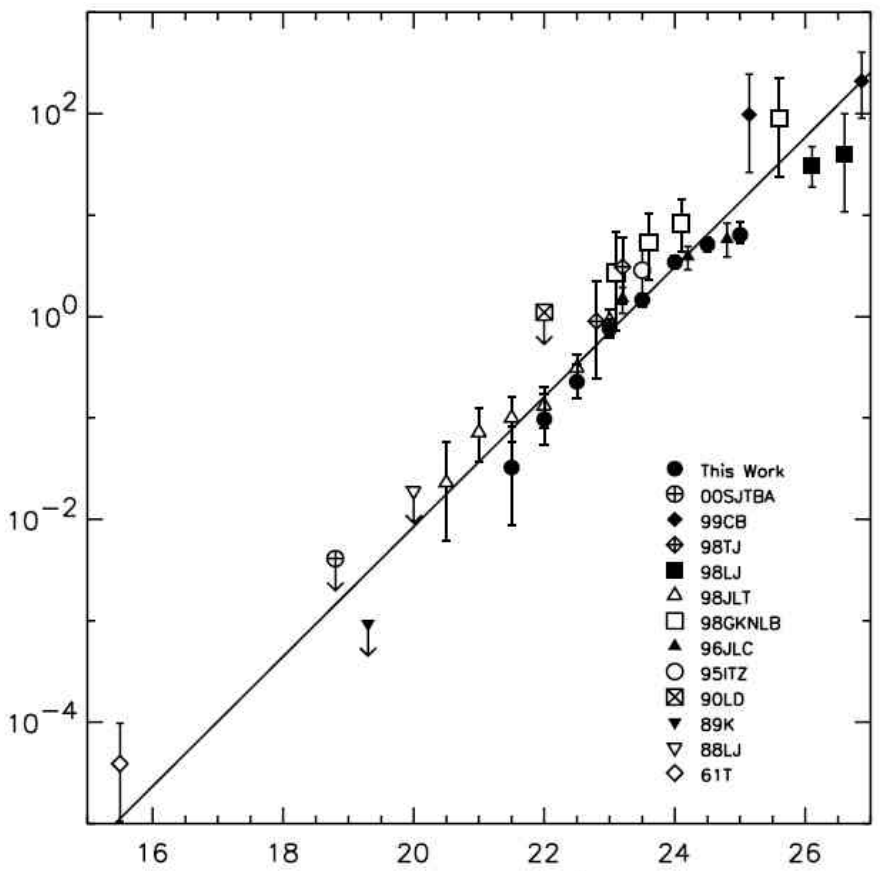


図5 EKBOの見かけの等級(Rバンド)と1平方度あたりの累積存在数の関係 (Trujillo et al. 2001)。マークはこれまでの各探査の結果。横軸：見かけの等級(Rバンド)、縦軸：累積存在数(個／平方度)。

TD10は15.4時間と、数時間から10数時間程度の幅を持つ。

EKBOの可視光域から近赤外線域の反射スペクトルの例を図4にあげた。ケンタウルス族と同様に右上がりの傾向のEKBOもあれば、スペクトルに特徴がないものもある。一般的にEKBOは暗く表面の組成まで特定することは難しいが、明るいクワーワー(50000 Quaoar)やオルクス(90482 Orcus)などでは水の氷の存在が確認された。

横軸に発見されたEKBOの見た目の等級(Rバンド)、縦軸に観測から得られた1平方度あたりのEKBOの累積存在数を図5に示す。観測値にフィットさせた直線の傾きから、23.2等級のEKBOは1平方度に1天体ほどあり、1等級暗くなるにつれて4天体程度ずつ増えていくことが期待される。しかし、暗い(小さな)EKBOでは、明るい(大きな)EKBOと同じようなフィットができないことが示唆されている。

バイナリーEKBO、巨大EKBO

これまでに、衛星を持つEKBOが10天体以上も発見された。EKBOの発見総数が1000であることから、現在のところ割合は1～2％程度である。冥王星・カロンと同様、両者の大きさの比が小さいことから、衛星というよりはバイナリーEKBOと呼ぶ方がふさわしい。バイナリーの公転周期とケプラーの第三法則から、質量の和は冥王星・カロンの数千分の1から数万分の1であることがわかっている。バイナリーEKBOの発見は、重要な物理量の一つ、質量を知る唯一の手段なのだ。

これまでに、大きなEKBOが発見されるたびに「新惑星発見」という報道がなされている。2005年にも2003UB313が第十番惑星として発表された。最近になり、直径が約2400kmとの報告がなされ、冥王星(直径約2300km)よりも大きいことは、誤差を考慮しても確実になってきた。

このような巨大なEKBOは、たいてい大きな離心率と軌道傾斜角を持つ。これまでの議論からもわかるように、冥王星は大型のEKBOの一つであり、カロンの存在からバイナリーEKBO

と表現することもできる。大きな EKBO を惑星と呼ぶかどうかは、2006 年の国際天文学連合の総会で議論がなされるだろう。

冥王星は、これまでに宇宙探査機が訪れたことのない唯一の惑星である。アメリカの NASA は、可視光カメラをはじめ、赤外線や紫外線の撮像分光器などを搭載した探査機を 2006 年 1 月に冥王星へ向けて打ち上げた。ニュー・ホライゾンズと呼ばれるこの計画では、探査機は 2015 年に冥王星とカロンの近傍を通過後、さらに遠方の EKBO へ向かう。探査機の軌道に近い EKBO が未発見であったため、私がサイエンスチームの外部メンバーに加わり、すばる望遠鏡を用いた EKBO サーベイ・プロジェクトを実行中である。

人類が初めて目にする冥王星・カロン、そして EKBO の姿は、いったいどのようなものであろうか？ ミッションチームのウィーバー (H. Weaver) らは、 2005 年のハッブル宇宙望遠鏡により、冥王星に 2 つの新衛星を発見した。探査機の接近により、さらに小さな衛星が発見できる可能性も高い。

太陽系の未知の世界への挑戦は、まさにこれからといえよう。

※EKBO に関して、日本語で書かれた包括的な唯一の本：『太陽系の果てを探る』渡部潤一・布施哲治著 (東京大学出版会) をご参照ください。

（国立天文台ハワイ観測所）

〈編集者付記〉太陽系外縁部の小天体については、以前に一度とりあげたことがあり、本誌 Vol.11, No.4（Dec.　1999）で渡部潤一氏に「太陽系外縁部小天体研究の現状――太陽系の果てを求めて――」を書いていただいた。あれからだいぶ時間がたち、発見と研究も大きくすすんできたので、再度とりあげることにした次第である。幸い布施哲治氏から明解でわかりやすい解説をいただくことができた。紹介の労をとってくださった渡部潤一氏ともども、ご両氏にあつくお礼申しあげる。

本文中でものべられている 2003UB313 は、直径が冥王星よりも大きく、新聞などでは“第 10 番惑星発見”と大きく報じられた。この天体をめぐっては、最近「Nature」誌でも、次の論文でいろいろと論じられている。

Sheppard, S.S., 2006, A planet more, a planet less? Nature, Vol.459 (2 Feb. 2006), 541-542.

Bertolidi, F. ほか 4 名, 2006, The trans-neptunian object UB313 is larger than Pluto. Nature, Vol.459 (2 Feb. 2006), 593-594.

あわせてご参照いただきたい。

ついでに余談をもう 1 つ。スイキンチカモクドッテンカイメイ、というこの呪文のような覚え方は、子供から大人にまで広く知られている。これと似た覚え方は外国にもあるのだろうか。あるときそんな想いが頭をよぎった。そこで、親しくしているイギリス人の先生にお伺いしてみたところ、次のような覚え方があると教えてくださった。

M y Very Easy Method Just Speeds Up Naming Planets.

なるほど、これならたやすく、すばやく覚えられそうだ。ほかにもおもしろい覚え方があるかもしれない。ご存知の方は教えてくだされば幸いである。（小森長生）

ガレキが集まった構造をもつ小惑星イトカワ

Ｓｃｉｅｎｃｅ誌「はやぶさ」初期成果論文から

平田　成　HIRATA Naru

小惑星探査機「はやぶさ」は 2005 年の 9 月 12 日に目的地である近地球型小惑星イトカワに到着し、二ヶ月半にわたって科学観測をおこない、最終的には試料採取のために着陸を試みた。「はやぶさ」の動向は新聞、テレビなどのメディアでたびたび取り上げられたほか、インターネットのさまざまなサイトでも注目された。特に、11 月下旬の着陸への挑戦は、国内のみならず海外からも大きな注目を集めた。筆者もサイエンスチームの一員として、この期間、相模原の JAXA 宇宙科学研究本部に詰めて、探査機の運用とデータの初期解析に専念していたが、この一種異様なまでの盛り上がりにあてられる形で自身もどんどん興奮の度合いが上がっていったのを覚えている。あれから半年以上が経過し、「はやぶさ」自体については着陸後に発生したトラブルに対処しつつ、2010 年の地球帰還を目指しての運用が淡々と行われている。

サイエンスチームは、科学観測で得られた知見を初期成果論文の形で発表するために、データ解析と議論を進めてきた。今回その結果を、Science 誌の特集号で一挙に 7 篇の論文を発表することができた。このような特集が Science 誌で組まれるのは、日本発の科学研究ではおそらく初めての快挙である。ここではこれら 7 篇の論文から、われわれが小惑星イトカワについて何を知ることができたのか、全体形状、表面地形、組成、内部構造の観点からまとめてみたい。

イトカワは XYZ の各軸長が 535×294×209m の細長い天体である。さらに、長軸の 1/3 ほどのところで大きくくびれつつ湾曲した形状を持つのが特徴で、まるで貝を腹に載せたラッコのようにも見える。ラッコの頭部と胴部に相当する部分はくびれのところで繋がり、それぞれが元は別々の小惑星であったものが合体して一つになっているかのようにも思える (Fujiwara et al., 2006; Demura et al., 2006)。

その表面の 8 割は大小のボールダー（岩塊）で覆われたラフテレーンと呼ばれる領域である。ボールダーのもっとも大きなものは長辺が 50m にも及び、イトカワ上の衝突現象で生成されたとは考え難い。一方残りの二割はスムーステレーンと呼ばれ、その名の通り遠目には非常に滑らかな表面をもっている。最大 6mm/pixel に及ぶ超高解像度画像の解析の結果、このスムーステレーンは cm オーダーの砂利で覆われていることが明らかになった。この表面地質の二分性は当初全く予想されていなかったもので、当初予想されていた一枚岩で構成された天体でもなく、エロスなどの過去探査されてきた微細なレゴリスに完全に覆われた天体でもない、全く新しい小天体像を示したことになる。表面の重力場の解析からは、スムーステレーンはイトカワ上の低地に対応することがわかっている。小さな粒子は移動しやすいので、これらが低地に集積した結果、スムーステレーンが形成されたようである (Saito et al., 2006; Yano et al., 2006; Fujiwara et al., 2006)。

地上からの観測によって、イトカワの構成物質は普通コンドライト隕石に近い組成をもつと考えられてきた。「はやぶさ」に搭載された近赤外線分光器と蛍光Ｘ線分光器の観測によ

ISAS/JAXA

り、LL5ないしLL6コンドライトがもっとも類似した隕石種であることが示唆されている。興味深いことに、表面地形が多様性に富むのに比べて、イトカワは物質的にはほとんど一様な組成であるようにみえる。ただ一方で、カメラ画像では表面の反射率に大きなバリエーションが見られている。これは微小隕石の衝突による宇宙風化によって表面の反射スペクトルと反射率が変化したためと考えられる。地域毎の宇宙風化度の差は表面の物質移動で説明できそうであるが、この過程の詳細は今後も議論が必要であろう (Abe et al., 2006; Okada et al., 2006; Saito et al., 2006)。

イトカワの質量は、着陸時の探査機の挙動を解析することで推定することができる。形状解析から得られた体積の値と合わせて、イトカワの密度は1.9g/cm^{3}と見積もられている。もしイトカワが本当にLLコンドライト的な物質でできているとすると、内部の空隙率は40%にもなる。このような高い空隙率からすると、イトカワは瓦礫の集合体のようなラブルパイル構造をもっていると考えるのが適当である。ラブルパイル構造は小惑星が衝突現象によっていったん破壊された後、その破片が重力で再集積した際に形成されると考えられている。太陽系の歴史の中でこのような破壊と再集積はたびたび生じたと思われるのに、これまでの探査ではラブルパイル構造をもつ小惑星に出会うことはなかった。その意味で、今回イトカワで始めてラブルパイル小惑星の実例を観測することができたことになる。前述したイトカワ表面の巨大なボールダーや、頭部と胴体からなる全体形状は、母天体の衝突破壊でできた破片とその再集積物であると考えられる (Abe et al. 2006; Demura et al. 2006; Fujiwara et al., 2006)。

７篇の初期成果論文で、小惑星イトカワの基本的な様相は明らかにできたと考えられる。しかし、その姿は事前の予想などとは全くかけ離れたものであった。その形成と進化の過程は今回の成果を元に、さらに詳細に議論されるべきものであろう。イトカワクラスの小惑星は数の上では最もメジャーな存在であり、今後の研究は太陽系の小天体像を考える上で非常に重要なものになるといえる。

文　献

Science誌の「はやぶさ」特集は2006年6月2日号に掲載されている。全7篇の筆者、タイトルは以下のとおり。

Fujiwara, A., ほか 21 名, 2006, The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa. Science,, 312 (2 June, 2006), 1330-1334.

Abe, M., ほか12名, 2006, Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft. Science, 312 (2 June, 2006), 1334-1338.

Okada, T., ほか6名, 2006, X-ray Fluorescence Spectrometry of Asteroid Itokawa by Hayabusa. Science, 312 (2 June, 2006), 1338-1341.

Saito, J., ほか33名, 2006, Detailed Images of Asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa. Science, 312 (2 June, 2006), 1341-1344.

Abe, S., ほか15名, 2006, Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa. Science, 312 (2 June, 2006), 1344-1347.

Demura, H., ほか19名, 2006, Pole and Global Shape of 25143 Itokawa. Science, 312 (2 June, 2006), 1347-1349.

Yano, H., ほか19名, 2006, Touchdown of the Hayabusa Spacecraft at the Muses Sea on Itokawa. Science, 312 (2 June, 2006), 1350-1353.

(会津大学コンピュータソフトウェア学科)

論文紹介

原始惑星としてのケレス、ベスタ、そしてパラス

McCord, T.B., McFadden, L.A., Russell, C.T., Sotin, C., and Thomas, P.C., 2006, Ceres, Vesta, and Pallas: Protoplanets, Not Asteroids. Eos, Vol.87, No.10 (7 March 2006), 105, 109.

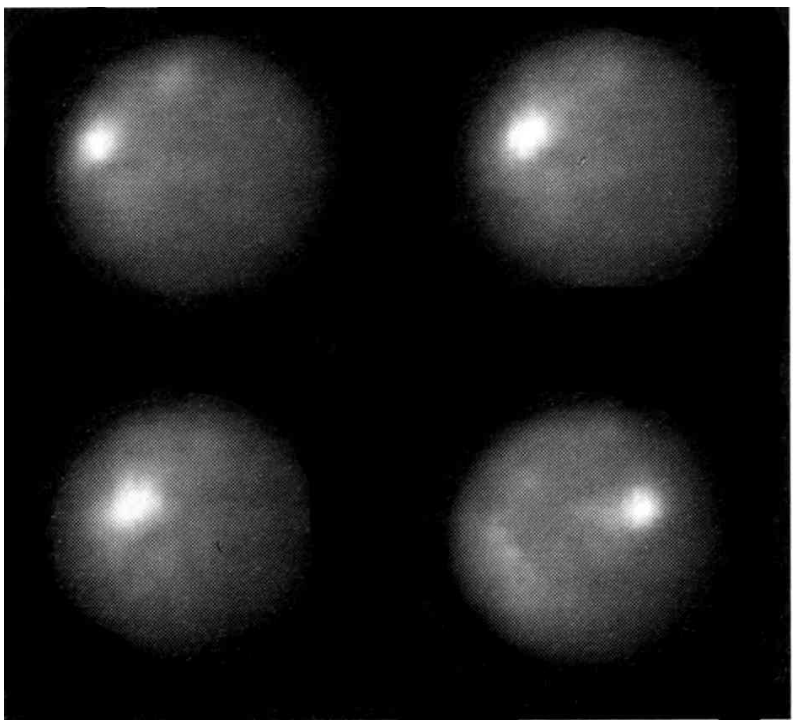
われわれの太陽系の天体は、原始太陽系をとりまく星雲ディスクの中でおこった、ガスとダストの凝縮と集積によって形成された、と現代では考えられている。ダスト粒子は集積して、まず直径1kmほどの小天体を形成し、それらは更に集積して、直径約1000kmの天体に成長した。このような天体のいくつかは、やがて惑星にまで成長し、放射性元素の崩壊熱で内部が溶けて、物質の再配分がおこり、コア、マントル、地殻の各層が形成された。大きく成長した惑星はまた、重力による摂動で、残された小天体の分布や運動に影響をあたえた。

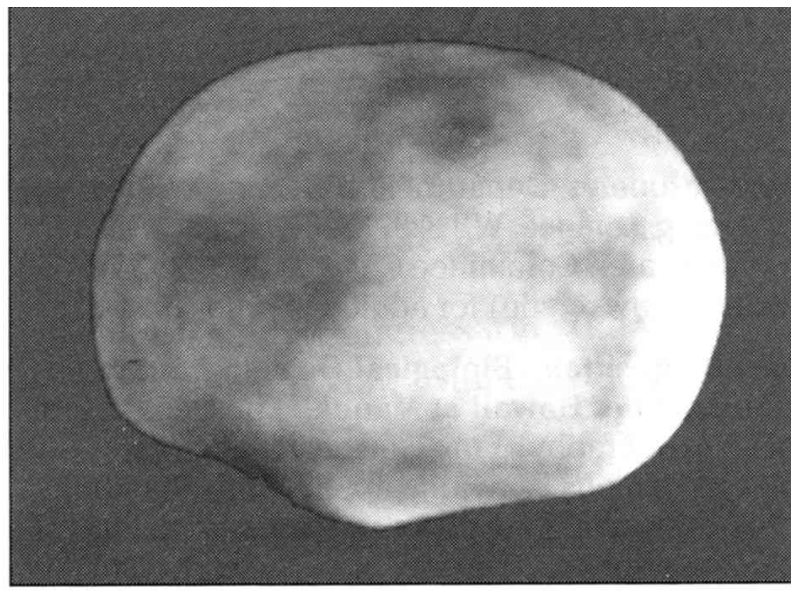
太陽に近い5天文単位（AU）以内の領域では、地球型惑星と、木星の重力によって守られている小惑星帯だけが残された。小惑星帯には、熱で融解した証拠をもつ天体も存在するが、小惑星帯をつくる天体の大部分は、相互衝突による破壊で形成された破片天体だと考えられている。一般的な小惑星（Asteroids）の概念は、こうした破片天体だ、というものである。

ところが、この小惑星帯に存在する、直径数100kmから1000kmの天体のいくつか、たとえばケレス、ベスタ、パラスなどは、単なる破片天体ではないのである。一般にasteroidsの仲間に入れられてはいるが、それらはむしろ、原始惑星（protoplanets）そのものだといったほうがよい、と著者たちは主張する。このような天体が今日もなお存在しているということは、惑星の形成理論を確かめるのに役立つばかりでなく、地球型惑星の形成プロセスの研究にも重要な示唆をあたえるものでないかと考えられる。

ケレスが分化した原始惑星である証拠

ケレス、ベスタ、そしてパラスは、太陽系の2.36AUから2.77AUの間の領域にあって、似たような軌道をまわり、大きさも直径約500km（ベスタ、パラス）から約1000km（ケレス）とよく似ている。しかしながら、この3天体の性質はかなり異なっており、平均密度はケレスが2.100g/cm^3、パラスが2.710g/cm^3、ベスタが3.440g/cm^{3}である。





ハッブル宇宙望遠鏡が撮影したケレスの画像（左）とベスタの画像（右）

ケレスの平均密度の低いことは、この天体が水をかなり含んでいる可能性が高いことを予想させる。望遠鏡によるスペクトル観測で、ケレスの表面物質に水酸化化合物が含まれているらしいことが示唆された。このことによって、ケレスは一躍注目されるようになった。最近の熱進化モデル（T.B. McCord and C. Sotin, 2005）によると、ケレスはかなり分化の進んだ天体で、含まれている水の一部は、まだ液体の状態を保っているかもしれないという。

このモデルにもとづけば、ケレスでは、超寿命の放射性元素が出す熱を考えた場合にのみ、氷はとけて珪酸塩岩石から分離するであろう。このプロセスは、珪酸塩のコアと液体の水のマントル、そして凍結した地殻の薄層をすみやかにつくり出した。水の凍結と融解、そして温水の循環によって生ずる珪酸塩の変質作用と分化は、ケレスに膨張と収縮をおこさせ、このプロセスが続いている間、ケレスは活発な天体であった。

放射性元素による加熱が弱まるにつれて、ケレスはしだいに冷却し、液体の水は外層から内部に向かって凍結していったが、暖かい珪酸塩コアとの境界部では、凍ることはなかっただろう。水の含有量が多いこと、その水が大きな潜熱をもつこと、そして液体の水と固体の氷の対流などのために、ケレスの珪酸塩コアは、短寿命の放射性元素（^{26}Al など）が含まれていたとしても、溶けることはなかったと考えられる。なぜなら、水のもつ大きな潜熱はエネルギーを吸収し、一方対流によって熱は失われていくからだ。

この分化モデルからはまた、9.075 時間の周期で自転するケレスの、静水圧的形態を予想することができる。もし観測でその形がわかれば、それはケレスの分化を示すさらなる証拠になることが期待された。

実際、ケレスの形は、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）の ACS（Advanced Camera for Surveys）をもちいて観測された。その結果わかったことは、ケレスが扁平な楕円体の形をしていること、その長半径は 487.3±1.8km、短半径は 454.7±1.6km であること、などであった。このような、なめらかで扁平な楕円体は、ケレスが静水圧的にコントロールされた形をつくってきたことを示している。それは均質な天体ではあり得ず、質量が中心に集中していることを意味する。この分

化した状態と、赤道半径と極半径の差（32.6km）は、すでにMcCord and Sotin（2005）のモデルで予言されていたものである。そのモデルでは、蛇紋岩の密度の珪酸塩コアをもつ原始惑星では、赤道半径と極半径の差は32kmである。これは、理論と観測がよく一致しためずらしい例である。

さらに加えて、3つの波長で撮影されたケレス表面の最初のアルベドマップが、同じHST-ACSのデータセットをもちいて解析された。これらのマップには、11の表面反射率のちがいと、40〜350kmサイズの色の違いを示す特徴が表現されている。こうしたバラエティは、他の小惑星や氷衛星にみられるものよりは変異幅が小さいが、過去にケレスが活動的だったときに、マントルと表面の物質がよく混じりあい、表面が変化してきたことを物語っている。もう1つ、波長約280mmに中心をもつ強い吸収帯が気付かれているが、これはケレスの性質にさらなる興味をおこさせるものである。

ベスタは鉄のコアをもつドライな原始惑星

ベスタの性質や歴史は、K. Keil（2002）によって論じられてきた。彼もまた、ベスタは始源的な内部構造をもつ分化した天体であり、原始惑星だと考えている。

謎にみちたベスタの正体は、望遠鏡のスペクトル観測によって、まず明らかになってきた（McCordら, 1970)。それによると、ベスタの表面は、Caの少ないパイロキシン（輝石）を含む玄武岩質エコンドライトの組成とよく似ていた。このことは、ベスタがかつて溶融して内部が分化したこと、そして玄武岩質エコンドライトとベスタが密接な関係をもっていることを意味する。

こうしたことから、ベスタは広く注目されるようになり、玄武岩質エコンドライトの化学的性質のくわしい研究にもとづいて、ベスタの進化を解明する研究が始められた。

ベスタは明らかに、乾いた小天体の集積で形成されたか、あるいはその形成過程の初期に水を失ったか、のいずれかである。ケレスでおこったような、水による変質作用の特徴はみられない。ベスタの珪酸塩は溶融後すばやく分化し、今日もっているであろう鉄のコア、珪酸塩のマントル、そして玄武岩質の表層地殻を形成した。ベスタは最も小さな地球型惑星と考えてもよい。それは進化した氷のガリレオ衛星により似ている、ともいえる。ハッブル宇宙望遠鏡が1997年にとらえたベスタの画像には、南極近くに巨大なクレーターが観察される。これはもしかしたら、マントルの奥深くまで掘りおこされたもので、鉄のコアの一部が露出しているかもしれないと思われる。

McCord and Sotin（2005）は、彼らのモデルをつくった研究のなかで、ベスタの平均密度が高いのは、この天体が主として玄武岩質物質でできており、いかなる形の水も含んでいないためであるとのべた。もしこの天体が、ケレスをつくったと同じような小天体（直径約1km）の集積でできたのならば、そしてその小天体が^{26}Alなどを十分もっていたとするならば、その熱で水分は沸とうして逃げ去り、ドライな物質ばかりが集積した、より大きな天体ができたであろう。それがベスタのような天体であり、ケレスとベスタの両極的な性質のちがいは以上のようにして説明できると考えられる。そのちがいをつくったのは、たった数10万年の時間差にすぎないのでもある。

未知の問題が多いパラスはこれからの研究対象

パラスは明らかに、ケレスとベスタの中間的性質をもつ天体であるが、まだわかっていないことが多い。直径はベスタとほとんど同じなのだが、スペクトル観測によれば、その表面組成はむしろケレスのほうに似ている。平均密度はケレスよりも高いから、形成されたときもともと水が少なかったか、あるいはその後の進化の過程で水が失われたのであろう。しかし一方で、ベスタよりは密度が低いから、純粋な珪酸塩だけでできあがっているのでもなさそうである。

もう1つ注目すべきは、パラスの軌道が黄道面に対して35.7°と大きく傾いていることだ。このことは、パラスが形成されたあとに、何か強力な重力の作用があったか、あるいは大規模な衝突の影響をうけたのではないか、といったことを想像させる。このようなことから、探査機も接近させにくく、いろいろと困難はあるが、今後の探査と研究に期待がかけられる。

原始惑星としてのケレス、ベスタ、パラスなどからのデータのつみ重ねは、太陽系の形成と進化の解明に新しい光を投げかけるものとなろう。

〈紹介者付記〉

火星と木星の軌道の間にある小惑星帯を構成する小天体が、すべて破片天体だといわれてきたわけではないと思うが、著者たちがいうように、asteroidsの多くが破片状天体であることは確かであろう。そんななかで、ケレス、ベスタ、パラスのような大型のasteroidsはprotoplanetsだ、というのが著者たちの考えである。

ケレスやベスタがほんとうにprotoplanetsの生き残りだとすれば、それはまさに生きている化石のようなもので、太陽系の形成と進化の解明に重要な手がかりをあたえるであろう。ひとくちにprotoplanetsといっても、ケレスとベスタのように対極的性質をもつもの、パラスのように中間的性質のものなど、バラエティにとんだいろいろな性質のものがありそうである。これらが著者のいうように、形成時の物質のちがい、またその後の進化のちがいにあるのか。これは今後の重要な研究課題であり、探査機を送ってもっと確かなデータをきちんと集める必要がある。

実際NASAは、ケレスとベスタに探査機を送るドーン（Dawn）ミッションを2001年に発表し、2006年6月に打ち上げることを計画していたが、残念なことに今年に入って中止された。また新しい形で復活することを願わずにはいられない。

なお、Ceres、Vestaのカナ表記（ケレス、ベスタ）は、「天文年鑑」などで使われている一般的な表記にしたがったことをお断りしておく。

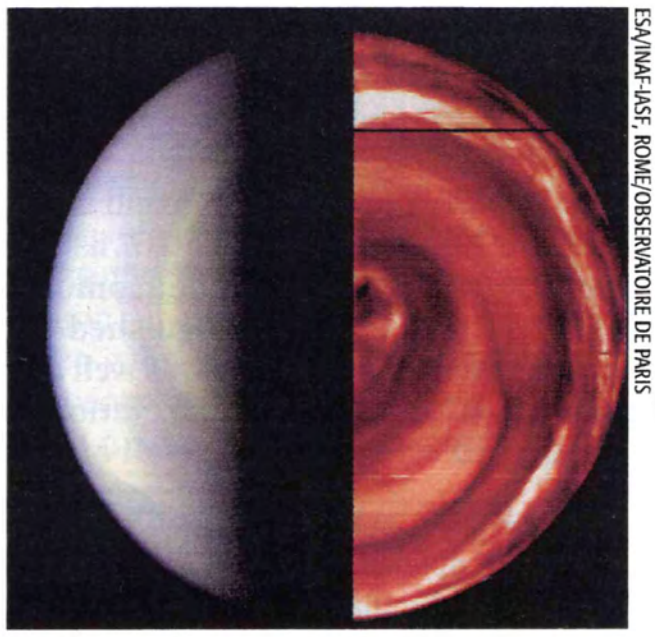
（小森長生）

INFORMATION

●エンケラドスでおこる氷火山活動の詳細発表

カッシーニ探査機によって観測された、土星の衛星エンケラドスにおける氷火山活動については、本誌Vol.17、No.4（Dec.2005）のこの欄で紹介したが、その詳細な報告が「Science」Vol.311（10 March 2006）に特集として発表された。P.1388〜1428まで41ページにわたって11編の論文が掲載されている。

これらの報告によると、エンケラドスの地下で生成した液体の水は、南極のトラ縞地帯から間欠泉的に噴出し、おもに微小な氷粒からなる噴煙を数 100km の高度まで噴き上げている。噴煙は雪片となって地表へ降り積もる一方、宇宙空間へも流れ出して、土星の E リングを構成する粒子の供給源ともなっている。


ESA/INAF-IASF, ROME/OBSERVATOIRE DE PARIS

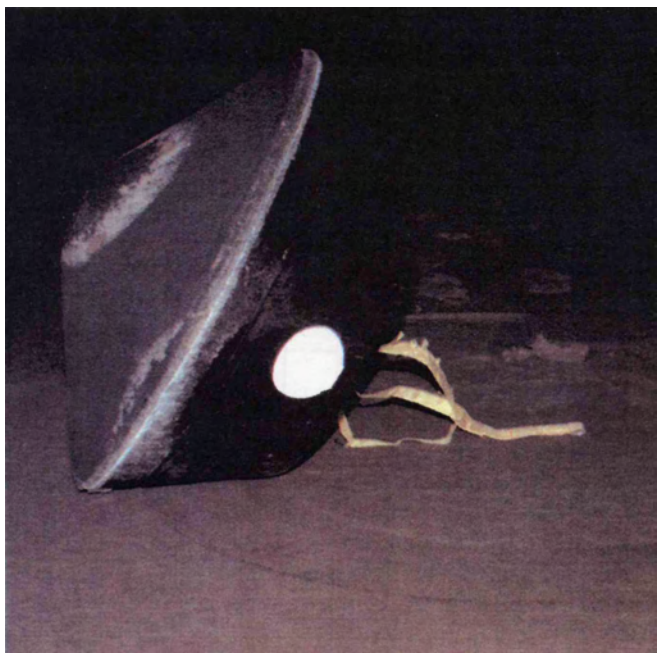
●ビーナスエクスプレスが金星に到着

昨年 11 月 9 日に打ち上げられた ESA の金星探査機「ビーナスエクスプレス」は、153 日におよぶ旅を終えて金星周辺に到着、2006 年 4 月 11 日午前 11 時 07 分（中央ヨーロッパ標準時）、金星周回軌道に入った。近金星点 368km、遠金星点 326900km の長楕円軌道で、約 9 日間で 1 周している。今後軌道を修正し、最終的には近金星点 250km、遠金星点 66000km の軌道に落ちつく予定。本格的な観測は 6 月から始められる。

写真は、金星周回軌道に入った直後に、VIRTIS（可視／赤外画像スペクトロメーター）で約 20 万 km の距離から撮影された、金星南極周辺の画像。左は昼側の可視画像で、雲の頂部が示されている。右は夜側の赤外画像で、高度約 55km に浮かぶ雲が写し出されている。この南極をとりまくうず巻状の雲の列は、すでに北極上空で明らかにされているうず巻状の雲とひじょうによく似ている。これからの本格的な探査で、金星大気圏のより詳細なデータが得られることを期待したい。

●彗星の塵を収めたスターダスト探査機のカプセルが地球帰還

1992 年 2 月 7 日に打ち上げられた彗星探査機「スターダスト」は、2002 年 11 月 2 日、5535 番小惑星アンネフランクに接近して撮影と観測をおこなったあと、2004 年 1 月 2 日、ついに目標の天体、ヴィルト第 2 彗星に接近、彗星核から放出されるダスト粒子の採集に成功した。そして 2006 年 1 月 15 日、サンプルを収めたカプセル（重量 46kg）が米国ユタ州の砂漠に無事着陸した。


NASA

ヴィルト第 2 彗星の核から放出されたダスト粒子は、エアロゲルを塗ったテニスラケット状の採集器で捕らえられたが、この採集器には、彗星接近の前後に、太陽系空間をただよう惑星間ダストや恒星間ダストの粒子も捕獲されているはずである。これらの粒子は、世界各地の研究者の手で目下分析中である。

なお、ヴィルト第 2 彗星（81P/Wild2）は、1978 年に発見された、公転周期 6.37 年、軌道離心率 0.538、軌道傾斜角 3°.2、近日点距離 1.590AU、の木星族短周期彗星。核の直径は約 5km。

編集後記：本号はエッジワース・カイパーベルト天体の最新情報を布施哲治さんから、「はやぶさ」の成果速報を平田成さんからいただき、加えて小惑星のケレス・ベスタ・パラスの論文を紹介しましたので、太陽系の小天体特集号となりました。ガレキの集まりのような「イトカワ」の画像をみて驚いたように、太陽系にはまだまだ未知の世界が残っています。これからの研究の進展が楽しみです。（S）