

彗星状に見える小惑星たち

石黒正晃

〈ソウル大学物理天文学科 Department of Physics and Astronomy, Seoul National University,
Seoul 151-742, Korea〉
e-mail: ishiguro@astro.snu.ac.kr



2005年11月26日、はやぶさ探査機は小惑星イトカワの表面物質の採取を行い、惑星物質科学に大きな発展をもたらしました。この日、もう一つの小惑星に関する興味深い観測的証拠が見つかりました。この観測を元に、「メインベルト彗星」という新しい概念が生まれ、活発にその研究が行われてきました。本稿では、最近の筆者らの研究成果を交えて、メインベルト彗星の研究によって明らかになってきた小惑星の実像について紹介させていただきます。

1. 謎の天体エルスト・ピサロ

小惑星は、岩石を主成分とする天体です。望遠鏡を用いて観測すると、小惑星は点状に観測され、雄大な尾をたなびかせる彗星とは対照的です。ところが1996年7月、小惑星として登録されていた天体が突如、彗星のような姿で見つかりました(図1)。この天体は1979年に小惑星として

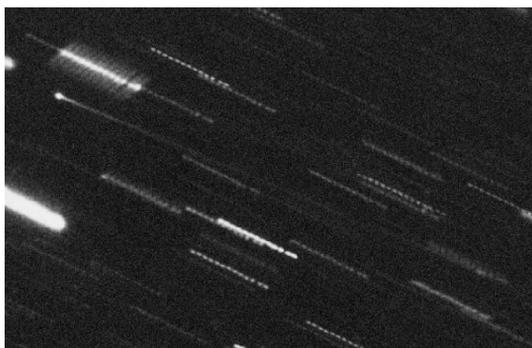


図1 エルスト・ピサロ彗星。彗星の動きに合わせて望遠鏡をトラッキングしているため、背景の星は点線状に伸びている¹⁾。

発見されていた天体で、その軌道は「メインベルト」と呼ばれる火星軌道と木星軌道の中間にあります。発見当時、さまざまな憶測が飛び交いましたが、決定的な観測的証拠をつかむことができませんでした。この天体は、彗星活動の発見者E.エルストとG.ピサロにちなんで「エルスト・ピサロ彗星^{*1)}」と命名されました。その後しばらくの間、このような風変わりな天体が見つからなかったことから、エルスト・ピサロ彗星は多くの太陽系天文学者から忘れ去られることになりました。

2. 「小惑星」と「彗星」の識別方法

そもそも「小惑星」と「彗星」の違いは何でしょうか？ 実は、統一された識別方法がないのが現状です。これまでに、見かけや組成、天体力学的な観点から識別されてきました。

まず、見かけによる識別ですが、この手法はその語源から容易に理解できます。本号「星空の砂金採り—小惑星データベースの新時代—(白井文彦著)」でも述べられているとおり、小惑星の英語表記である「アステロイド(asteroid)」とは、

*1) 厳密には、小惑星として7968 Elst-Pizarro、彗星として133P/Elst-Pizarroで登録されています。

ギリシア語の「恒星のようなもの」に起因しています。一方、彗星の英語表記である「コメット (comet)」は「長い髪をもった (もの)」からきています。つまり、彗星特有のコマや尾が検出されると彗星に、点状^{*2}だと小惑星に分類されてきたのです。惑星物質科学的な観点から、この両者を分類することもできます。メインベルトの小惑星は、単一の惑星を形成することができずに火星と木星の間に取り残されている微惑星の残骸だと考えられています。彗星もまた、微惑星の残骸であると考えられているのですが、太陽系形成以降46億年間氷を保持していることから、メインベルトよりさらに外側からやってきた天体だと推測されています。つまり、小惑星は岩石質の天体、彗星は岩石と氷を両方含んだ天体だと考えられてきたのです。最後に、天体力学的に分類する方法を紹介します。前述の通り、彗星は太陽系外縁部から内惑星領域に投入されたものですが、特に短周期彗星（軌道周期200年未満）の大半を占める木星族彗星の起源は、エッジワース・カイパーベルトであることがよく知られています²⁾。氷を含んだエッジワース・カイパーベルト天体は、ガス惑星の重力によって軌道進化し、近日点が約3天文単位より小さくなると太陽からの強い熱放射を受けて氷の昇華（つまり彗星活動）を起こします。このような天体の大半は、木星と強い重力作用をもっているため、木星族彗星と呼ばれています。円制限三体問題で不変量と近似できるティスラン・パラメーター T_J ³⁾ を用いることによって、木星族彗星とメインベルトの小惑星を区別することができます。メインベルトの小惑星は $T_J > 3$ 、木星族彗星は $2 < T_J < 3$ です^{*3}。

しかしながら、これら彗星と小惑星の分類方法は、どれも完全であるとはいえません。例えば、

エンケ彗星 (2P/Encke) はその名のとおりに、彗星状の尾やコマを見せるのですが、そのティスラン・パラメーターは $T_J = 3.03$ とわずかに3より大きく、力学的には小惑星の範疇に入ります。エンケ彗星の $T_J > 3$ になる原因として、非重力効果（氷の昇華による加速）や内惑星の重力作用で軌道進化したことが原因だと考えられています^{4), 5)}。また、力学的に彗星のような軌道（つまり $T_J < 3$ ）の小惑星の中に、かなりの割合で枯渇した彗星が存在している可能性も示唆されています⁶⁾。このような一部の例外を除くと、これら三つの分類方法は矛盾しないことから、最近まであまり問題視されてきませんでした。

では、いよいよ本題に戻ります。冒頭で紹介したエルスト・ピサロ彗星は、文字どおり観測的には彗星に分類されていますが、そのティスラン・パラメーター $T_J = 3.18$ で、力学的には紛れなくメインベルトの小惑星に分類されます。では一体どうしてメインベルト帯の小惑星が彗星のような姿になったのでしょうか？

3. 「メインベルト彗星」

「エルスト・ピサロ彗星のような天体はほかにもあるはずだ」—そのような信念をもって彗星のように見える小惑星のサーベイ観測を行った研究者たちがいました。当時、ハワイ大学大学院生だった H. Hsieh（シエ）と指導教官の D. Jewitt（ジューイット）です。彼らは、比較的、軌道長半径の大きな小惑星が近日点を迎える前後を集中的に観測しました。メインベルト外縁部の小惑星は、今なお氷を保持していて、近日点付近で太陽フラックスが大きくなることによって彗星活動するのではないかと考えたからです。彼らは、約600個の小惑星を長時間撮像し、コマや尾の存在

^{*2} 一部の大きな小惑星（例えば1 Ceres）は、ハッブル宇宙望遠鏡などによって空間分解して撮像されているので、厳密には観測天文学的に言っても小惑星は点光源であるという考え方は成り立たなくなってきています。

^{*3} ハリー (Halley) 型彗星や長周期彗星は $T_J < 2$ です。

表1 メインベルト彗星一覧 (2012年6月現在)

	軌道長		軌道面	
	半径 (AU)	離心率	傾斜角 (°)	T_J
133P/Elst-Pizarro	3.16	0.17	1.39	3.18
238P/Read	3.17	0.25	1.27	3.15
176P/LINEAR	3.20	0.19	0.24	3.17
259P~Garradd (P/2008 R1)	2.73	0.34	15.9	3.22
P/2010 R2 (La Sagra)	3.10	0.15	21.4	3.10
2006 VW139	3.05	0.20	3.24	3.20
P/2010 A2	2.29	0.12	5.26	3.58
(596) Scheila	2.93	0.17	14.7	3.21
P/2012 F5 (Gibbs)	3.00	0.04	9.74	3.23

を調べました⁷⁾。そして、2005年11月26日*4、小惑星として分類されていた天体(118401) LINEARの尾を検出することに成功しました(後に176P/LINEARとして登録)。彼らは、このような彗星状に見えるメインベルト天体を「メインベルト彗星」と呼びました⁸⁾。

2012年5月末日現在までに見つかっているメインベルト彗星一覧*5を以下に示します。メインベルト天体なので、これらのティスラン・パラメーターはいずれも3以上です。2005年以降メインベルト彗星は、毎年1-2個の割合で見つかっています。図2は小惑星と彗星、メインベルト彗星の軌道分布を示しています。

4. 小惑星からのダスト放出メカニズム

ここからは、メインベルト天体が彗星状に見える原因について探っていきましょう。まず、可視分光観測から、メインベルト彗星のコマや尾は、チリによる太陽散乱光が寄与していることがわかっています。小惑星からのチリ放出の原因として、以下のようなメカニズムが提唱されています⁹⁾。

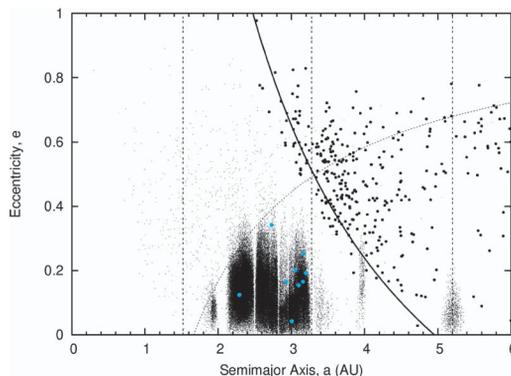


図2 小惑星(●)と彗星(●)の軌道分布. 小惑星の多くは火星軌道と3.2天文単位(木星との2:1平均運動共鳴)に分布しており、メインベルトと呼ばれている。メインベルト以外にも、キベレ族(3.27-3.70 M_{\odot})、ヒルダ族(3.70-4.20 M_{\odot})、木星のトロヤ群(5.05-5.35 M_{\odot})、地球近傍小惑星等がある。木星族彗星のほとんどは木星軌道と交差、または接近する軌道をもっている。メインベルト彗星(青●)は、メインベルト帯にいる彗星のような姿を見せた天体である。参考のため、遠日点で木星と、近日点で火星と交差する条件をそれぞれ実線と点線で描いている。

1. 氷の昇華
2. 小惑星同士の衝突
3. 静電浮遊
4. 高速回転による破壊

この中でも、「1. 氷の昇華」と「2. 小惑星同士の衝突」は誰もが真っ先に思いつくチリの放出メカニズムです。1の場合、チリの放出は近日点近くで每周回起こることが予想されます。2の場合、チリの放出は一瞬です。「3. 静電浮遊」は、アポロ月面探査時代からその可能性が指摘されてきました。光電効果によって昼面が正に帯電することによってチリが浮遊すると考えられます¹⁰⁾。この場合、大きなチリは脱出速度を超えて放出する

*4 偶然にもこの日、はやぶさ探査機が小惑星イトカワ表面に2回目のタッチダウンを行いました。地球に回収された小惑星サンプルの多くは、この日に採取されたものだと考えられています。

*5 これらすべてをメインベルト彗星に分類しない研究者もいますが、本稿では、一度でも彗星のような尾をもったことのある天体はメインベルト彗星と呼ぶことにします。

ことはできません。「4. 高速回転による破壊」は、YORP（ヨーブ）効果と関連しています。小惑星は固有の自転運動をしていますが、小さな小惑星の自転速度は、その表面からの熱放射により加速もしくは減速することが知られています（YORP効果）。小惑星の多くは、イトカワのような弱い重力によって集まっていると考えられているのですが、YORP効果によって自転速度が速くなり、遠心力で小惑星が壊れてしまう可能性が理論的に予測されています¹¹⁾。これらを踏まえて、具体的な例を見ていきましょう。

4.1 氷の昇華の観測例

現在までに、三つの天体で氷の昇華による観測的証拠が見つかっています。

エルスト・ピサロ彗星とリード彗星（238P/Read）は、近日点通過前後で活動することが知られています。しかもこれらの天体は、2周回にわたりほぼ軌道上の同じ場所でチリの放出が起こっていることもわかりました。つまり、氷の昇華によってチリが放出している可能性が非常に高いのです^{1), 12)}。

リニア彗星（176P/LINEAR）もまた、氷の昇華が原因だと考えられています。この天体は、約1年間にわたり尾が確認されましたが、1年後に

点光源状になりました。リニア彗星（176P/LINEAR）が彗星状に見えた時期と、点光源状に見えた時期を図3の軌道面上に示します。この図から、彗星活動は近日点（図中のP）近くで起こっていることがわかります。チリの放出が長期間続いたことから、衝突で説明することはできません。また、ダスト粒子サイズが大きい（10 mm）ことや自転速度がゆっくりしていることから、静電浮遊や高速回転による破壊の可能性も否定されています。リニア彗星（176P/LINEAR）の尾の形状を説明するため、極域近くに存在しており、極域付近に日光が当たる季節にダスト放出が起こっていることまで示唆されています¹³⁾。

このように、メインベルト彗星のうち3天体に氷の存在がしている可能性が高いです。このような氷は、天体表面に存在して昇華しているわけですから、小惑星表面を直接分光観測して3 μm帯の水氷の吸収を探す試みも行われてきました。残念ながらメインベルト彗星は暗いので、3 μm帯分光は困難ですが、氷をもっていると考えられるメインベルト彗星に似た軌道の小惑星 テミス（24 Themis）とキベレ（65 Cybele）表面に氷の存在が確認されました^{14), 15)}。現在までにこれらの小惑星は彗星活動しておらずメインベルト彗星として分類されていません。

このような観測結果から、小惑星外縁部には氷を含んだ小惑星が現存することがほぼ確定的となりました。

4.2 衝突の観測例：シーラ（596 Scheila）

メインベルト彗星の中で、シーラ（596 Scheila）ほど詳細なダスト放出メカニズムがわかっている天体はありません。筆者自身、この研究に深くかかわってきたので、少し詳細に述べさせていただきます。

シーラは、1906年に発見された、直径120キロメートルの比較的大きな小惑星です。この天体は、2010年12月上旬に突如増光を見せました。図4左は、石垣島天文台が観測した増光時のシー

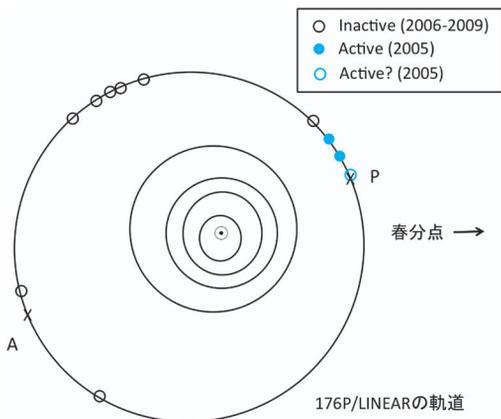


図3 176P/LINEARの軌道と活動が確認された位置。PとAはそれぞれ近日点と遠日点の位置。内惑星（水星～火星）軌道も描いている¹³⁾。

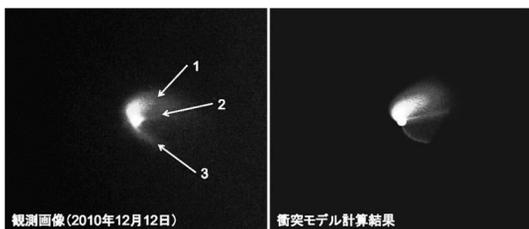


図4 シーラの奇妙な尾の観測画像とモデル計算の比較（視野64万km×39万km）. 左：石垣島天文台での観測画像. 右：衝突実験を元にした理論モデルによる再現画像. このシミュレーションから、尾1は衝突方向への高速放出流、尾2と尾3は放出物カーテンであることがわかった. これらを形成するダスト粒子は、太陽光圧を受けて、右方向に加速している.

ラの画像です. 小惑星の周囲に奇妙な形の尾が観測されました. その後、チリ雲はどんどん広がって、中口径の望遠鏡ではほとんど検出することができなくなりました. 後に、すばる望遠鏡を用いて観測を実施し、細長く伸びた直線上構造を捕らえることができました. この構造から、2010年12月3日衝動的にチリが放出されたことがわかりました¹⁶⁾.

シーラで興味深いのは、そのチリ雲の形状です. 図4左から、「三つの尾」をもっていることがわかります. このような奇妙な尾は、彗星の尾では今まで観測されたことがありません. 奇妙な三つの尾の原因は、ダスト放出のメカニズムと大きくかかわっています. まず、紫外線波長域の観測から、シーラ周辺にOHラジカルが検出されませんでした¹⁷⁾. このことから、氷の昇華によってチリ雲が発生したとは考えにくいです. また、他のメインベルト彗星と異なり、シーラの脱出速度は55 m/sもあるので、表面レゴリスが静電浮遊して惑星間空間に放出したとは考えることができません. また、シーラは比較的ゆっくりと自転（周期15.85時間）していることから、遠心力でチリを放出したとも考えることができません. つまり、衝突によってチリが放出された最初のメインベルト彗星に認定されたのです¹⁶⁾⁻¹⁸⁾.

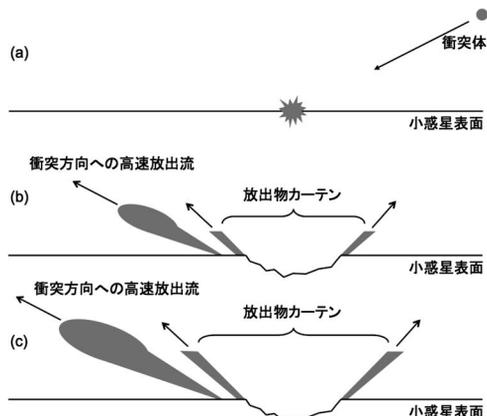


図5 室内衝突実験によって知られている衝突放出物. (a) 天体表面に別の小さな天体が衝突すると、(b) 衝突方向への高速放出流と、円錐状に出る放出物カーテンの二つの構造が現れる. これらの構造は時間とともに広がり、やがて太陽光圧によって軌道が変化する. 衝突方向への高速放出流は、主に衝突体が粉碎、条件によっては気化してできるものだ. また、円錐状に出る放出物カーテンは、衝突の衝撃波による天体表面の破壊に引き続いて生じる外向きの掘削流によって発生するダスト雲で、その下にクレーターが形成される. シーラの場合、観測されたダスト雲の明るさから直径500-800メートルのクレーターが形成されたと推定されている.

では、三つの奇妙な尾の正体について考えてみましょう. 室内衝突実験から、天体表面に別の小天体が斜めから衝突すると、衝突方向への「高速放出流（ダウンレンジ）」と、「円錐状に出る放出物カーテン（インパクトコーン）」の二つの構造が現れることが知られています（図5）. 室内衝突実験で得られた知見をもとに、ダスト粒子の放出機構をモデル化し、重力と太陽光圧を考慮した理論モデル計算を行った結果、小天体が小惑星シーラの進行方向に対して後方から追突したときのみ、観測画像をうまく再現することができたのです（図4右）¹⁹⁾. このような、衝突放出物が小惑星表面で観測されたのは、観測天文学史上初めてのことです. さらに、詳細に衝突実験と比較することによって、クレーターの大きさや、表面

の硬さなどについてもわかりました。

5. 最後 に

これまで述べてきたとおり、メインベルト彗星の活動メカニズムが明らかになりつつあります。それと同時に、まだ解決していない問題も生じています。まず、なぜいまだにメインベルトに水氷が残っているのでしょうか？ メインベルト天体にある氷の寿命は、太陽系の年齢よりもずっと短いはずですが。このような氷がどのような形で46億年間保持されてきたかということは、今後の研究課題です。また、メインベルト彗星によって、観測的な衝突の研究という新しい手法が開拓されました。100 mサイズの小天体の衝突はほぼ毎年起こっていることが予測されています²⁰⁾。今後は、このような天体レベルでの衝突を観測することによって、小惑星の衝突進化について活発な議論がされることが期待されます。

はやぶさ探査によって、メインベルトの中でも比較的高温状態で生成されたS型小惑星の実体が明らかになりました。一方、赤外線天文衛星あかりやWISEによって、小惑星帯の物質分布やサイズ分布の全体像が詳しく調べられています。メインベルト外側に多く分布するメインベルト彗星の多くはC型に分類される炭素質な小惑星です。2014年打ち上げ予定のはやぶさ2は、C型小惑星からのサンプルリターンを目指しています。より低温領域で形成された小惑星の科学は新しい局面を迎えようとしているのです。

謝 辞

本研究は、国内外の多くの研究者の方によって支えられてきました。特に、国立天文台の渡部潤一さん、石垣島天文台の花山秀和さん、ハワイ観測所の藤原英明さん、寺田 宏さん、JAXAの

長谷川 直さん、神戸大学の中村昭子さんには貴重な助言や観測データをご提供いただきました。JAXAの白井文彦さんには、本稿に関するコメントをしていただきました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hsieh H. H., et al., 2010, MNRAS 403, 363
- 2) Levison H. F., Duncan M. J., 1997, Icarus 127, 13
- 3) Murray C. D., Dermott S. F., 1999, Solar system dynamics. Cambridge University Press, Cambridge
- 4) Sekanina Z., 1988, AJ 96, 1455
- 5) Levison H. F., et al. 2006, Icarus 182, 161
- 6) Weissman P. R., Bottke W. F., Levison, H. F., 2002, Asteroids III, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pp. 669–686
- 7) Hsieh H. H., 2009, A&A 505, 1297
- 8) Hsieh H. H., Jewitt, D., 2006, Science 312, 561
- 9) Jewitt D., 2012, AJ 143, 66
- 10) Colwell J. E., et al., 2007, Reviews of Geophysics 45, 2006
- 11) Jacobson S. A., Scheeres D. J., 2011, Icarus 214, 161
- 12) Hsieh H. H., Meech K. J., Pittichová, J., 2011, ApJ 736, L18
- 13) Hsieh H. H., et al., 2011, AJ 142, 29
- 14) Campins H., et al., 2010, Nature 464, 1320
- 15) Licandro J., et al., 2011, A&A 525, 34
- 16) Ishiguro M. et al., 2011, ApJ 740, L11
- 17) Bodewits D., et al., 2011, ApJ 733, L3
- 18) Jewitt D., et al., 2011, ApJ 733, L4
- 19) Ishiguro M., et al., 2011, ApJ 741, L24
- 20) Bottke, W. F., et al., 2005, Icarus 179, 63

Comet-Like Asteroids in Main-Belt

Masateru ISHIGURO

Seoul National University, Seoul 151–742, Korea

Abstract: Some main-belt asteroids eject dust particles showing comet-like comae and tails. In this Japanese article, we introduce the past observations and the potential mechanism for the dust emission.