

小惑星の族

伊藤 孝士

〈国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ito.t@nao.ac.jp



小惑星の族は太陽系天体の衝突・破壊現象の顕現であり、その研究が天文学の諸分野に与える影響は普遍的に大きい。本稿では本特集への導入として小惑星の族の根幹概念たる固有軌道要素について摘記する。また近年の進展著しい族研究の一部を略述し、引き続き記事群への架橋とする。

太陽系には多数の小天体が存在する。とりわけ小惑星は今や80万個近くが確認されており、望遠鏡と観測装置の高性能化によりその発見は頻度を増している。周知のように小惑星の大半は火星-木星間のメインベルトにあり、そこにある天体の研究は19世紀に遡る。小惑星(1) Ceresが19世紀の最初の日(1801年1月1日)に発見されたことは有名である。そして、メインベルトには似通った軌道要素を持つ小惑星の群れがあることも古くから知られていた。現代の目で見るとそれらは小惑星の族(family)であり、その定義は今やWikipediaにも見られる¹⁾。「小惑星族とは、軌道長半径、離心率、軌道傾斜角など類似の固有軌道要素を持つ小惑星の集団である。」この記載は概ね正しく、族の定義には固有軌道要素という概念が本質的である。固有軌道要素の定義は次段落以降で説明するが、図1には現在までに確認された族に属する小惑星とそれ以外的小惑星を(a^* , $\sin I_p$)平面上に描画した。 a^* は小惑星の軌道半長径の時間平均値、 I_p は固有軌道傾斜角である。この図より、メインベルト小惑星の多くが何らかの族に属することが分かる。

天体力学に於いて小惑星など太陽系小天体の軌道運動を論じる際、運動方程式から短周期で変動する成分を除去して長周期で変動する成分だけを残し、永年的な運動についての議論を行うことは

通例である。これを解析的に行う手法は永年摂動論と呼ばれ、その最低次の近似(線形近似)を用いて得られる主要惑星の軌道解は調和振動子を重ね合わせた形となる^{4),5)}。ここで小天体の運動は惑星の影響を受けて変化するものの惑星に対しては影響を与えない、いわゆる制限問題を仮定しよう。この仮定を置いて小天体の軌道解を導くと、それは惑星の軌道要素の変化に強制されて振動する項とそれ以外の振動を表す項に分離された形で表現される。後者の振動の周期は小天体自身と惑星の軌道半長径、および惑星の質量に依存する。そして振幅は小天体の軌道要素の初期値にのみ依存し、線形近似の範囲でこの振幅は定数となる。その意味で後者は小天体が持つ固有な振動と言うべきものであり、振動の振幅は各小天体が持つ固有な値である。小天体の固有軌道要素はこの振幅に相当する。なお永年摂動論では一般に天体の軌道半長径が時間的に一定であることが前提とされる(短周期の振動はあっても永年的には変化しない)。太陽系の八大惑星やメインベルトにある小惑星の議論に於いてこの前提は概ね正しいと言えるが、惑星との接近遭遇などにより軌道半長径が大きく変化する小天体に関しては固有軌道要素の計算が困難もしくは不可能となる。後述する近地球小惑星の多くはこの範疇に入り、それらについては固有軌道要素が計算されていない。

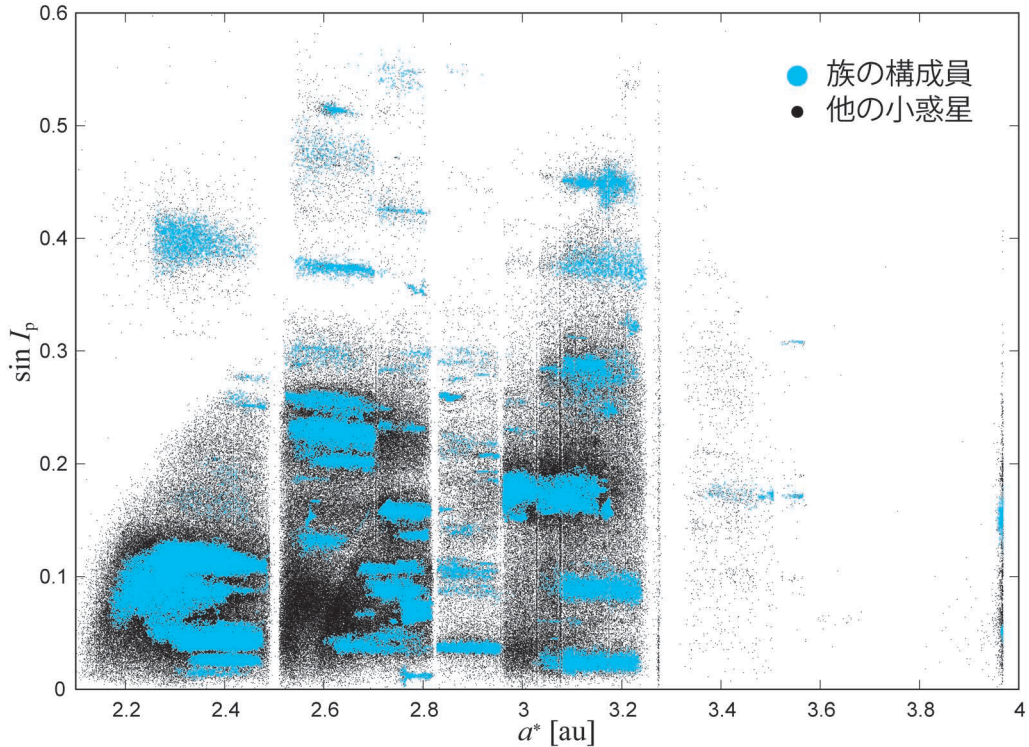


図1 小惑星の軌道半長径の時間平均値 a^* [天文単位] と固有軌道傾斜角の正弦 $\sin I_p$. 現在確認されている族に属する小惑星²⁾を青丸で描画し、それ以外の小惑星³⁾を黒点で描画した.

メインベルト内に似通った軌道要素を持つ小惑星の群れがあることは19世紀から知られていた⁶⁾. だがそれらは固有軌道要素ではなく接触軌道要素(ある瞬間での軌道要素)に基づく議論であった. 接触軌道要素は短期間で変化する上に、惑星による強制振動の寄与を含み、小惑星を力学的に分類するための変数として適切ではない. ここに固有軌道要素を持ち込んで小惑星の分類に力学的な意味を与え、更には「族」という名称を与えたのが平山清次である^{7),8)}. その歴史的経緯は本特集の別記事⁹⁾で詳述されるが、平山による研究は小惑星の発見数や発見頻度が現在と比べて圧倒的に小さい時代(1910–1920年代)に行われたことに留意すべきである.

その最も有名な論文⁷⁾で平山が発表した族はKoronis, Eos, Themisの三種のみであった(注・本特集の他記事に於いてこれらは「コロニス」「エ

オス」「テミス」等と片仮名表記されることがある). 本稿の図2a, b, cには原論文の図をそのまま引用している(平山の原論文に軌道要素の元期などに関する記載は無いが、引用元である暦¹⁰⁾を見る限り基準座標系は1925年の黄道で、元期は小惑星ごとに異なるようである). この時、平山はわずかに13個の小惑星からKoronis族の存在を議論した(Eos族は19個、Themis族は22個). それから百年を経た現在、Koronis族への帰属が判明した小惑星は2300個近くに上る(Eos族は約3300個、Themisは約1600個)²⁾. それらの軌道要素分布を平山と同じ方法で可視化したものが図2d, e, fである(ここでの軌道要素元期と座標系はJ2000.0. なお本稿では平山が用いた $\tan I$ ではなく、最近の天体力学で良く用いられる $\sin I$ を用いる. 軌道傾斜角 I が小さければ両者の差異は大きくない). いずれの図に於いても原点からやや離れた位置を中心

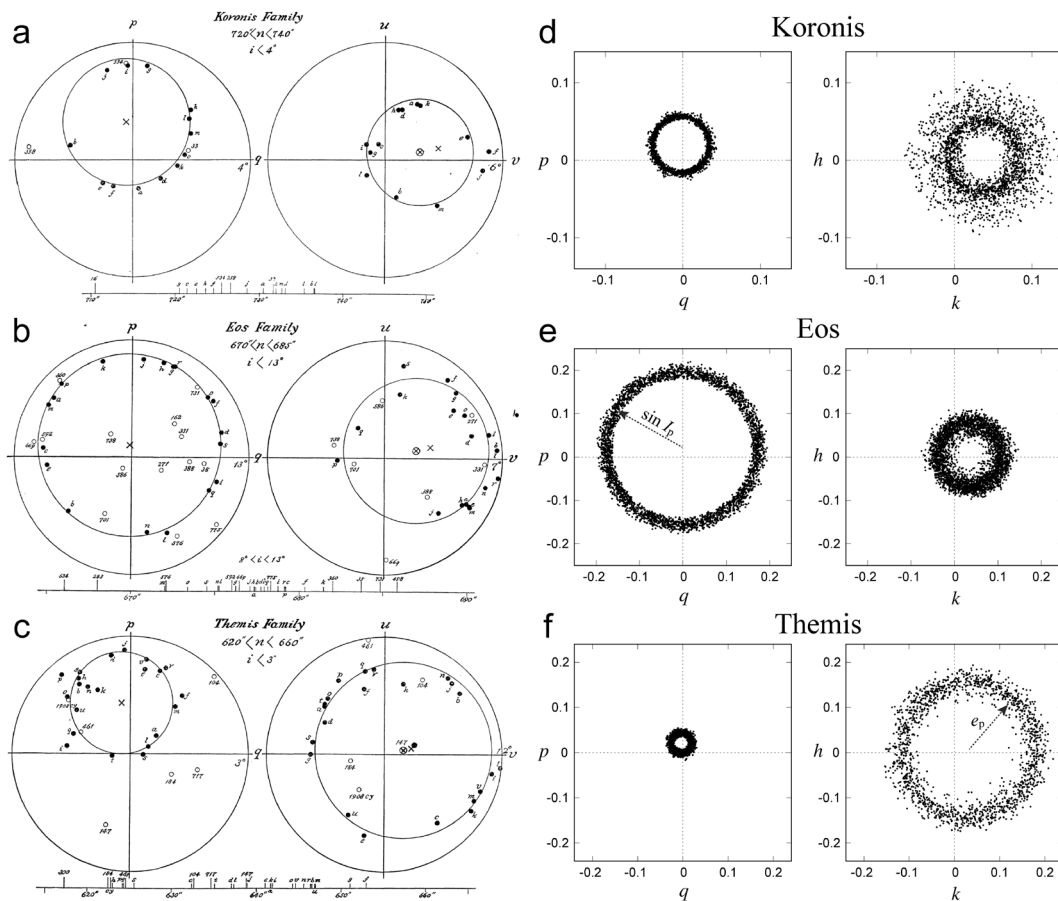


図2 a, b, c: 平山清次⁷⁾が見出した Koronis, Eos, Themis の各族構成員の軌道要素の分布 (Credit: AAS. Reproduced with permission). Ω を昇交点経度, ω を近日点経度とし, 左は $(q, p) = (\tan I \cos \Omega, \tan I \sin \Omega)$ 平面, 右は $(v, u) = (e \cos \omega, e \sin \omega)$ 平面. \times は両平面上での木星の位置を示す. d, e, f: この三族に関して現在知られている構成員²⁾の軌道要素¹¹⁾の分布. 左は $(q, p) = (\sin I \cos \Omega, \sin I \sin \Omega)$ 平面, 右は $(k, h) = (e \cos \omega, e \sin \omega)$ 平面. 変数の記法が平山の時代とは少々異なる. e と f には固有軌道要素 I_p と e_p の意味する所を書き入れた.

とする円周上に小惑星が分布している. (q, p) 平面ではこの円の半径が固有軌道傾斜角の正弦 $\sin I_p$ であり (e の左を参照), (k, h) 平面 (平山の記法では (v, u) 平面) に於いてそれは固有離心率 e_p である (f の右を参照). 原点から各円の中心までの距離は惑星の摂動による強制的な軌道傾斜角および離心率を示し, これらは時間と共に変化する. だが各々の円の半径はほぼ変わらず, 各小惑星はその円周付近を周回する. 固有軌道要素が定数であるとはこうした意味である. 平山の時代 (a, b, c) と比べて現代 (d, e, f) では多くの小惑星が同一の

円周上にあり, 点の密度は高い. この結果を見れば族の存在は誰の目にも明らかであろう. だが平山は, 小惑星の発見数が圧倒的に少ない時代に族の存在を正しく予見した. その洞察は深く, 万人が恐懼せざるべからざる慧眼と言える.

線形近似した永年摂動論に依拠する固有軌道要素の算出とそれによる族の分類作業は, 平山の時代から長く行われて来た. しかし近年の観測研究の進展は離心率や軌道傾斜角の大きな小惑星を多く見出した. こうした天体の固有軌道要素を正確に計算するには線形近似では精度が足りないこと

がある。また前述のように小惑星の固有軌道要素を計算するにはまず惑星の軌道解を得ることが必要だから、それ自体の精度向上も望まれる。こうした背景があり、20世紀終盤からは従来よりも高精度で小惑星の固有軌道要素を求める研究が進んだ。最初に現れたのは解析的な手法の洗練であり、端的に言えば永年摂動論の高次化である¹²⁾。線形近似の範囲では惑星や小惑星の軌道要素の変化が図2の (q, p) 平面上と (k, h) 平面上で独立に発生する。このとき両者は相互に干渉しないので、求解の作業は比較的容易である⁴⁾。しかし線形近似から一歩進んで高次項を採り入れると (q, p) 平面と (k, h) 平面の独立性は無くなり、求解には両者の相互作用を考慮する必要があるため計算は急激に複雑化する。だがそれを完遂すれば、離心率や軌道傾斜角の大きな天体の固有軌道要素を高精度で求められる。更には軌道半長径-離心率-軌道傾斜角の三次元空間に於ける永年共鳴の構造も解き明かされる。1990年代にはこのような研究が進展した。なおこうした解析的手法の高精度化が可能となった背景には日本人研究者による卓越した力学理論の存在がある^{13),14)}。小惑星族の研究に於ける日本の貢献がここにも見られる。

解析的な手法により固有軌道要素を求める道筋は美しく、結果は普遍的である。しかし実際の手続きは複雑であり、計算には長い時間が掛かる。一方、20世紀も終わりに近付くとデジタル計算機の性能向上と価格低下が著しくなり、これにより数値的な方法で固有軌道要素を精度良く算出する研究が発展した¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。この種の方法ではまず、小惑星や惑星を含めた関連全天体の軌道を数値的に伝播させる。それにより惑星の軌道解が数値的に求められるので、それを周波数分解して主要な周期成分を抽出する。次に小惑星の軌道要素の時系列にローパスフィルタを作用させ、短周期成分を除去する。その上で、惑星の軌道運動に起因する振動成分を小惑星の軌道運動の時系列から差し引く。これにより小惑星の軌道解から惑星による

強制振動の成分が取り除かれ、固有の振動成分のみが残されるので、自ずから固有軌道要素が求められる。昨今はこうした数値的な方法で算出された小惑星の固有軌道要素がウェブページで公開され、族の研究に広く利用されている³⁾。

21世紀に入ってから族研究の進展には目を見張るものがある。1990年代から盛んになったYarkovsky効果研究との組み合わせがその代表と言えよう。Yarkovsky効果は自転する天体に対する運動量の輸送機構のひとつであり、熱エネルギーの非等方的な吸収・射出に起因する。この効果はサイズが10 kmから 10^{-3} kmといった天体に対して特に有効であり、長い時間をかけてその軌道を拡大・縮小する¹⁸⁾。小惑星の多くはこのサイズ領域にあるので、この効果は重要である。Yarkovsky効果による小惑星の軌道拡大・縮小を考慮して族の力学進化を追う研究は大きな成果を挙げて来た¹⁹⁾。こうした軌道の拡大・縮小はメインベルト小惑星を共鳴帯（例えば小惑星の公転周期と惑星のそれが簡単な整数比となる平均運動共鳴の領域）へ突入させ、共鳴帯内で離心率が上昇することで小惑星が地球へ向かう軌道に乗ることも定量的に示された²⁰⁾。またYarkovsky効果による族の拡散の度合から族の年齢（形成年代）を推定する試みも一般化した。その結果、Karin族やVeritas族といった非常に若い族の確認が相次いだ²¹⁻²⁴⁾。更には族の年齢と族構成員の表面色の情報を対応させることで、小惑星の表面に発現する宇宙風化現象に時間軸を与え得るようになった^{25),26)}。そうした研究はS型小惑星が宇宙風化で赤化し、一方でC型小惑星が宇宙風化で青化することを予言したが、今やそれは隕石を試料とする室内実験で実証されている^{27),28)}。

小惑星族の形成要因として平山清次は爆発説を唱えたが⁶⁾、現在では小惑星同士の衝突がもたらす破壊こそ族の成因だと考えられている。従って、族の研究は太陽系に於ける衝突・破壊の痕跡の探索そのものと言える。天文観測による族の探索と

同様に小天体の衝突・破壊現象に関する研究も大きな進歩を見せており、そこでは日本の研究者が世界標準の何歩も先を進んでいる。本特集の他記事に於いて存分に発揮されているその本領を一目すれば瞭然のように、日本に於ける族研究の伝統は衝突・破壊現象の研究へ受け継がれた。最近ではメインベルト小惑星の相当数のごく少数の母天体の衝突・破壊により作られたとする説も発表された²⁹⁾。族に属する小惑星は特殊な存在ではなく、メインベルトの主成分だという主張である。衝突・破壊を起源する小天体の族はメインベルトだけではなく、太陽系外縁天体内にも見られる³⁰⁾。そして軌道半長径が頻繁に変化するため固有軌道要素が定義されず、古典的な意味での族を確認できない近地球小惑星の領域に於いても、分裂や破壊は普遍的であることが示されている³¹⁾。(3200) Phaethon と 2005 UD³²⁾、(1566) Icarus と 2007 MK₆³³⁾ などはその実例であり、特に (3200) Phaethon は活動的小惑星としての側面も持つために盛んに研究され³⁴⁾、³⁵⁾、探査計画も推進されている³⁶⁾。太陽系の歴史が衝突と破壊の歴史である以上、その本質の顕現である族の研究が歩みを止めることは無い。今後の発展は益々もって刮目に値する。

謝 辞

平山清次⁷⁾が参照した独語の天体暦¹⁰⁾の解説作業では国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクトの樋口有理可さんより支援を頂いた。

参考文献

- 1) <https://ja.wikipedia.org/wiki/小惑星族> (2019.7.19)
- 2) <http://sbn.psi.edu/pds/resource/nesvornyfam.html> (2019.7.19)
- 3) <https://newton.spacedys.com/astdys> (2019.7.19)
- 4) Brouwer, D., & Clemence, G. M., 1961, *Methods of Celestial Mechanics*, New York (Academic Press)
- 5) Murray, C. D., & Dermott, S. F., 1999, *Solar System Dynamics*, Cambridge (Cambridge University Press)
- 6) 吉田省子, 杉山滋郎, 1997, *科学史研究* 第II期, 36, 218
- 7) Hirayama, K., 1918, *Astron. J.*, 31, 185
- 8) Hirayama, K., 1922, *Japanese J. Astron. Geophys.*, 1, 55

- 9) 吉田省子, 2019, *天文月報*, 112, 602
- 10) *Berliner Astronomisches Jahrbuch für 1917*.
- 11) <https://asteroid.lowell.edu/main/astorb> (2019.7.19)
- 12) Milani, A., & Knežević, Z., 1990, *Celes. Mech.*, 49, 347
- 13) Hori, G., 1966, *PASJ*, 18, 287
- 14) Yuasa, M., 1973, *PASJ*, 25, 399
- 15) Knežević, Z., & Milani, A., 2000, *Celes. Mech. Dyn. Astron.*, 78, 17
- 16) Knežević, Z., & Milani, A., 2003, *A&A*, 403, 1165
- 17) Knežević, Z., & Milani, A., 2019, *Celes. Mech. Dyn. Astron.*, 131, 27
- 18) Bottke, W. F., et al., 2006, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 157
- 19) Bottke, W. F., et al., 2001, *Science*, 294, 1693
- 20) Farinella, P., et al., 1998, *Icarus*, 132, 378
- 21) Nesvorný, D., et al., 2002, *Nature*, 417, 720
- 22) Nesvorný, D., et al., 2003, *ApJ*, 591, 486
- 23) 伊藤孝士他, 2004, *遊・星・人*, 13(4), 212
- 24) Yoshida, F., et al., 2016, *Icarus*, 269, 15
- 25) Jedicke, R., et al., 2004, *Nature*, 429, L25
- 26) Nesvorný, D., et al., 2005, *Icarus*, 173, 132
- 27) Sasaki, S., et al., 2001, *Nature*, 410, 555
- 28) Matsuoka, M., et al., 2015, *Icarus*, 254, 135
- 29) Dermott, S. F., et al., 2018, *Nature Astron.*, 2, 549
- 30) Ragozzine, D., & Brown, M. E., 2007, *AJ*, 134, 2160
- 31) Granvik, M., et al., 2016, *Nature*, 530, 303
- 32) Ohtsuka, K., et al., 2006, *A&A*, 450, L25
- 33) Ohtsuka, K., et al., 2007, *ApJ*, 668, L71
- 34) Jewitt, D., 2012, *AJ*, 143, 66
- 35) 脇田茂他, 2019, *遊・星・人*, 28(2), 124
- 36) <https://destiny.isas.jaxa.jp/> (2019.7.19)

The Asteroid Family

Takashi Iro

*National Astronomical Observatory of Japan,
Center for Computational Astrophysics (CfCA),
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The asteroid family is a typical manifestation of the collisions and disruptions that have happened in our solar system. The study of the asteroid family has had major impacts in many areas of astronomy. As an introduction to the special issue entitled “100th Anniversary of the Asteroid Family Studies”, this article briefly describes the definition of the asteroid family based on the basic underlying concept: the proper orbital elements. This article also provides a brief summary of the recent advances in asteroid family research to give the readers an overview of what the following articles explain.