

# 小惑星族の百年

吉田 二 美

〈千葉工業大学・惑星探査研究センター 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1〉

e-mail: fumi.yoshida@perc.it-chiba.ac.jp

平山清次による小惑星族の同定から 100 年目を記念し、研究会 “A Century of Asteroid Families” が 2018 年の世界天文連合第 30 回総会（XXXth General Assembly of IAU）の際に開催されました。これは 100 年間にわたる小惑星族研究の進展をよく俯瞰する研究会となったので、ここではその報告を兼ね、100 年間を経た小惑星族研究の流れを概説します。

## 1. 世界の Hirayama

2016 年の夏、私は JPL の Joe Masiero 氏から突然のメールを受け取りました。「平山清次による小惑星族同定の論文<sup>1)</sup>の出版からもうすぐ 100 年になる。それを記念した研究会を開くか、論文集を出さないか？」と。実はちょうどその頃には日本でも同様な議論があり、私自身も何か行事を持ってないかと帝京平成大学の中村士先生らと話をしていました。しかし日本で研究会を開催するにしても旅費の確保が容易ではありません。当初 Masiero 氏は平山論文を出版した *The Astronomical Journal* (AJ) の編集者と話したようですが、AJ では特集号の出版が難しいことがわかりました。いくつかの面倒な調整を経た後、2018 年に Vienna で開催される国際天文学連合第 30 回総会（以下では IAU 総会と略記）の Focus Meeting（以下では FM と略記）で小惑星族の研究会を開催することになり、この業界の all star cast とも言える面々により科学組織委員会 (SOC) が作られました：Joe Masiero (Chair; USA), Miroslav Brož (Czechia), Valerio Carruba (Brazil), Alberto Cellino (Italy), Julia de León (Spain), Patrick Michel (France), David Nesvorný (USA), Noemi Pinilla-Alonso (USA), Federica Spoto (France), David

Vokrouhlický (Czechia), Fumi Yoshida (Japan)。この会議はその名も “FM1: A Century of Asteroid Families” と銘打たれ、200 名近い参加者が詰めかけました (<https://astronomy2018.univie.ac.at/focusmeetings/fm1/>, 図 1 参照)。ここで私は日本国外の研究者に平山清次の名が広く知られていること、また多くの外国人が平山の論文出版 100 周年を祝ってくれることに、日本人研究者として強く感銘を受けました。まさに世界の Hirayama です。そして日本でも小惑星族の研究の重要性を再認識するため同様な研究会を開くことが必要と考え、2018 年 11 月の千葉工大スカイツリーキャンパスでの研究会が実現しました。日本での研究会開催までの道のりについては本特集の吉川真氏の記事をお読みください。

## 2. FM の開催目的

Vienna での FM1 “A Century of Asteroid Families” ではまず、平山清次により小惑星族が同定されて族の研究が始まってから 100 年を経たことが祝われました。そして 100 年間の研究を振り返り、族の理解に関する幾つかの転換点を確認し、幾つかの最新の結果が提示され、将来の族研究の方向性が議論されました。日本からの発表者は多くありませんでしたが、まず吉田省子さんが招待

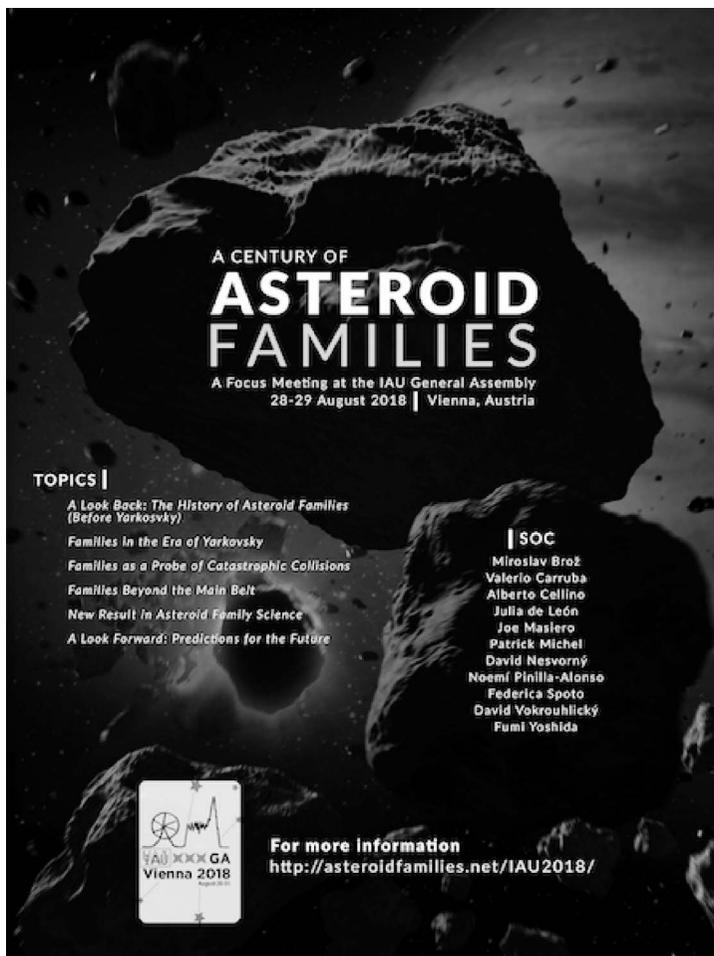


図1 第30回IAU総会でのFM1 “A Century of Asteroid Families” のポスター。

講演を行い、平山清次の置かれていた研究環境や族発見に至る経緯を話されました。中村士先生はポスターにて平山清次による族発見に始まる日本における小惑星研究の流れを概説し、族の研究は日本で始まったことを改めて世界の研究者に認識してもらいました。この二つの発表内容の詳細は本特集のそれぞれの記事をご参照ください。最近の研究セッションでは私（吉田）が若い小惑星族の測光観測結果を発表し、また名古屋大学の杉浦圭佑さんが最新の衝突シミュレーション結果を発表しました。この研究会での日本人の発表は上記の4件のみでしたが、以下に記す族研究の変遷と

将来展望をお読み頂き、次の100年間の族研究を日本の若い世代に引き継ぎたいと思います。

### 3. 族の研究方法の変遷

本特集の他記事で詳述されたように、小惑星族は軌道のよく似た小惑星の集団です。その集団は、大きな母天体が衝突破壊された際の破片群で構成されていると考えられています。すなわち、族は地上の実験室で行う衝突実験では模擬できない規模の天然の衝突実験の結果です。では、そうした小惑星の族を見ることで私達は太陽系の歴史について何を知ることができるのでしょうか？こ

ここでは以下の二点を強調しておきます。

- 1) ひとつの族の破片を全部足し合わせれば、母天体の大きさを推定できる。
- 2) もし母天体が分化した天体であれば、族の構成員間で組成のバリエーションが見られるはず。それは母天体の内部を直接見る機会である。

族研究でまず重要なことは、族の構成員を正しく同定することです。族構成員の同定は、基本的には軌道要素の類似性を元に行われます。族形成の衝突事象に際し、破片の脱出速度は母天体の軌道運動速度（メインベルトでは15–20 km/s）よりずっと小さいと考えられます<sup>2)</sup>。よって族形成直後の衝突破片群の軌道要素はどれもほぼ同じです。これにより、固有軌道要素（軌道要素から惑星摂動や短周期な振動成分を取り除いたもの、時間が経過してもほぼ変化しません）の似た小惑星を集めることで族が同定できます。固有軌道要素の説明は本特集の伊藤孝士さんの記事をお読みください。この方法は平山清次が導入したものであり、大半の小惑星族はこのようにして同定されました。現在 Planetary Data System node には122種の小惑星族が登録されています (<https://sbn.psi.edu/pds/resource/nesvornyfam.html>)。

族の同定方法は平山清次以来いくつもの改良が重ねられてきましたが、族を同定し、構成員の一覧を作るのは容易な作業ではありません。まず各小惑星の固有軌道要素を算出しなければなりません。これには非常に煩雑な計算が必要となり、素人が手を出せる代物ではありません。よって登録番号がついた小惑星および仮符号を持ち、かつ何度か「衝」の位置で観測された小惑星については Z. Knežević 氏や A. Milani 氏らが固有軌道要素を計算し、AstDyS node で公開しています (<https://newton.spacedys.com/astdys/>)。

多くの小惑星の軌道を固有軌道要素空間（固有軌道長半径、固有離心率、固有軌道傾斜角）に描画すると、この空間内に小惑星が集中する領域

（クラスタ）が幾つもあることが分かります。これも伊藤孝士さんの記事の図1をご覧ください。あの図に見える一つ一つのクラスタが小惑星の族です。但しクラスタの境界は明快ではなく、境界線の引き方には研究者の主観が入ります。クラスタの分離には Hierarchical Clustering Method (HCM) という方法がよく使われます<sup>3)</sup>。この方法では族の中心部から或る小惑星までの位相距離  $d$  を計算し、それがある閾値  $d_{\text{cut}}$  よりも小さければその小惑星は族の構成員だとみなします。 $d_{\text{cut}}$  の値を決めるのは研究者の裁量です。 $d_{\text{cut}}$  の値が小さ過ぎれば構成員数は減り、大き過ぎると族とは無関係な天体が構成員に紛れ込みます。いかにして  $d_{\text{cut}}$  の値を合理的に定めるかは現在でも研究対象です。小惑星の絶対等級や分光型・アルベド情報を取り入れ、できる限り正確な族の構成員境界を定義する工夫が続いています（例えば4,5）。

以下では、最近の族研究に於ける画期的な進歩から四点を挙げて解説します。

### (1) 分光型の情報—族構成員同定に利用

固有軌道要素の分布に基づいて同定された族の多くに於いて、各々の族の構成員は同じ分光型を示します。分光型が知られている小惑星はこれまでそれほど多くはありませんでしたが、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) が  $u, g, r, i, z$  の5色同時測光サーベイを行ったことにより、数万個の小惑星の色データが得られました<sup>6)</sup>。この結果を従前得られていた分光観測結果と併せることで、小惑星の分光型分類は飛躍的に進展しました。こうした背景があり、族構成員の同定に分光型を利用することが可能になりました。

分光型を利用する分類は、幾つかの族が重なり合う混雑した領域での構成員同定に有効です。具体的には、固有軌道要素だけでは同定が難しい、族の分布中心から離れた“halo”構成員の同定に役立ちます。また、偶然にも軌道要素がよく似ており族の構成員であると認識されてきた部外者天体 (interloper) を見つけ出すのにもこの方法は

有効です。大きな interloper に気づかずにいると、族の母天体のサイズ推定や衝突破壊過程の解釈を誤りかねません。

族の halo の構成員に関連し、S. Dermott 氏はこの FM1 で（厳密には族構成員と認定されていないもののその近傍にある）halo 小惑星を加えることで、メインベルト内側では全小惑星の 85% が Flora, Vesta, Nysa, Polana, Eulalia のどれかの族に帰属すると発表しました<sup>7)</sup>。このことは、内側メインベルトからやってくる近地球小惑星、および地球で回収される様々な隕石がごく限られた母天体から供給されたことを示唆します。

## (2) 若い小惑星族の発見—族形成年代の精密な推定

Nesvorný らは 580 万年と言う非常に若い年齢を持つ小惑星族 (Karin 族) を同定しました<sup>8)</sup>。こうした若い小惑星族の同定には固有軌道要素を使う必要がありません。形成がつい最近ですから、現在からそこへ向かって数値的に精密な軌道伝搬を行えば良いのです。若い小惑星族では軌道・衝突進化が族形成事象の痕跡を消し去るほど進んでいないので、この方法で軌道要素の集中を発見することが可能です。衝突破壊の直後、最終的に族を作る各構成員の軌道は似通っており、作用変数に相当する軌道長半径・離心率・軌道傾斜角のみならず、角変数に相当する昇交点経度・近日点経度・平均経度についても全構成員がほぼ同一の値を持つでしょう。その後の惑星摂動や Yarkovsky 効果（後述）などで軌道要素は徐々に変化しますが、昇交点経度と近日点経度が「ばらける」速度は大きくありません。これはメインベルトのように惑星との近接遭遇がない空間だからこの特徴です。よって現在から過去へ遡る軌道伝搬の計算を行い、構成員の昇交点経度や近日点経度が一致する時刻があれば、それがその族の形成時刻となります。この Backward Integration Method (BIM) により若い小惑星族が同定され、その年齢を精度良く推定できるようになりました

た。V. Carruba 氏は今回の FM1 で、現在までに 30 種以上の若い族がこの方法で同定されたと述べました。

こうして確認された若い小惑星族は次の二点で研究の新展開をもたらします。(i) 若い小惑星族は天然の大衝突直後の状態を保存しています。生成された衝突破片の散乱・再集積過程や角運動量の再分配などが族構成員の形状・サイズ・自転状態・密度などに刷り込まれます。よって族構成員の物理特性を調べ、そこに衝突実験結果による考察を加えれば、天体の大規模な衝突破壊過程の全容を知る手がかりが得られます。(ii) 小惑星の表面では太陽風照射や微小隕石の爆撃等で宇宙風化が起こります。宇宙風化の程度は時間と共に進行し、小惑星表面の光学特性を変えます（例えば宇宙風化によって反射スペクトルの傾きが変化します）。宇宙風化の詳細な物理過程とその時間スケールはまだ完全には解明されていませんが、若い小惑星族はその同定法により形成年代が良く分かっています。よって、若い族構成員の表面状態の観測は宇宙風化の時間スケールの推定に使える格好の材料と言えます<sup>9)</sup>。

## (3) Yarkovsky 効果の利用—族年齢推定の新しい方法

一般に小惑星の族はずっと昔に起こった衝突の痕跡ですが、現在でも動的な力学進化を見せています。この動的進化を利用して族の形成年代を見積もる方法が開発されました。それは Yarkovsky 効果を使う方法です<sup>10,11)</sup>。

一般に、自転する小天体表面からの熱輻射は太陽直下点よりわずかに遅れた午後半球で最大になります。地球で言えば正午より午後 2 時くらいの気温が高いのはこれが理由です。この熱輻射の遅れは宇宙空間から見ると非一様なジェット噴射のようなものであり、天体の運動に影響を与えます。具体的には、このジェットが天体を加速または減速させることで天体の軌道長半径が変化します。これが Yarkovsky 効果と呼ばれるものです。

Yarkovsky効果は惑星摂動などの重力と比べると微弱であり、質量の大きな天体では無視できます。しかし小さな天体、例えば直径約20 km以下の小惑星では長い時間スケールで大きな軌道長半径の変化をもたらします。例えば、直径1 kmのメインベルト小惑星の軌道長半径は $10^{-10}$  au/年の変化率を持つとされます<sup>12)</sup>。すると、ある小惑星族が形成してから10億年後に構成員はおよそ $\pm 0.1$  auの範囲に拡散することになり、その広がりにはメインベルトの幅の約1/6にも及びます。拡散の過程で小惑星はいくつかの共鳴帯（平均運動共鳴や永年共鳴）と遭遇し、軌道離心率や軌道傾斜角が変化します。古い小惑星族の同定が難しい理由の一つはこれです。年齢が10億年より古い族は、固有軌道要素を用いた族同定の方法ではその幾つも見落とされている可能性もあります（例えば<sup>13, 14)</sup>。

Yarkovsky効果は小惑星の大きさに依存し、軌道長半径の変化率はサイズの小さな天体ほど大きくなります。これにより、特定の族の構成員の軌道長半径を $1/D$ の関数（ $D$ は天体の直径）として描画すると“V”字型の分布が現れます<sup>15)</sup>。V字の開き具合はその族の年齢と関連があります。Delbo'氏らはこのV字構造を利用し、これまでどの族の構成員にも分類されていなかったメインベルト内側の暗い小惑星の多くが、40億年前という太古の昔に形成された族を構成することを発見しました<sup>16)</sup>。構成員のサイズ頻度分布を元に推定されたこの族の母天体の大きさは $D=35$  kmです。これは40億年前の微惑星の典型的なサイズかもしれません。

#### (4) 数値シミュレーション—計算機技術の発展と共に本格化

従来行われてきた実験的および理論的アプローチを補完するものとして、族研究にとって数値シミュレーションは欠かせない道具となりました。このFM1ではP. Michel氏が族形成時の衝突と衝突破片の形状やスピン状態・再集積の様相を調べ

る数値的な天体衝突研究の現状を概説しました。小惑星衝突の数値シミュレーションは通常、二つの段階を踏みます。まずは流体力学コードを使用してターゲット小惑星の断片化を計算し、次に重力 $N$ 体コードを使用して断片の重力再集積を計算します。ここには従来、流体力学コードから $N$ 体コードへの受け渡しの技術的困難や、速度の大きい粒子が含まれることによる時間分解能の限界といった問題がありました。しかし最近の計算機技術の発展によりこうした困難は徐々に克服され、衝突現象をより直接的に模擬できる計算が可能になりました。族形成過程の数値シミュレーションの最先端をFM1で示したのが名古屋大学の杉浦さんです。彼は小惑星衝突の高解像度計算を行い、破壊的な衝突によって形成された多数の破片の統計情報を抽出して、衝突後に生成された破片の振る舞い、再集積した天体の形状、自転周期分布の特徴などを調べました<sup>17)</sup>。この発表は日本の数値天文学界の水準の高さを如実に示す研究として高く評価されました。

## 4. 研究は進む

小惑星族の研究はメインベルト小惑星から始まりました。しかし現在では、メインベルト以外にも族の存在が指摘されています。木星トロヤ群やヒルダ群、巨大惑星の不規則衛星、カイパーベルト天体にも族の存在が推定されています。ヒルダ群や木星のトロヤ群は共鳴領域にあるため、固有軌道要素の計算は従来のものとはやや異なります。T. Vinogradovaさんは新しい計算法を取り入れ、ヒルダ群に2つの族（Schubart族とHilda族）、L4トロヤ群にの4つの族（Eurybates族、Epeios族、Hektor族、1996RJ族）を同定したとFM1で報告しました。太陽系外縁天体（TNOs）領域ではHaumea族が知られています。Haumea族はTNO領域で初めて発見された衝突で形成された族です。Haumea族の中で最も大きい天体は（136108）Haumeaであり、これは現在発見されているTNOsの

中でも最大の部類に属します。高いアルベドと細長い形状、高速自転（自転周期は4時間以下）、2個の衛星に加えてリングを持つという非常に興味深い天体です。Haumea族には現在のところHaumeaを含んで11個の構成員が確認されています<sup>18)</sup>。

近い将来には宇宙と地上からの観測が連携し、衝突イベント直後、すなわち生まれたての族の観測が可能になるでしょう。M. Drahus氏は、Keck望遠鏡で活動的小惑星P/2012 F5から高速自転に伴う分裂で放出されたと思われる極めて新鮮な衝突破片を検出しました<sup>19)</sup>。引き続きHubble宇宙望遠鏡での観測により、P/2012 F5が新たな族を形成したばかりであることも分かりました<sup>20)</sup>。8 m級の望遠鏡（すばるやLSSTなど）によるサーベイ観測が進めばさらに多くの活動的小惑星が見つかるでしょう。また東京大学の木曾観測所ではTomo-e Gozenカメラによる全天サーベイが行われるので、日本でも活動小惑星を発見できる可能性があります。活動的小惑星の多くで、活動性の原因は衝突や分裂によるものと推定されます<sup>21)</sup>。このような場合は活動性は短期間で沈静し、観測不可能となりますが、活動が継続している間に大型望遠鏡で観測すれば、形成直後の小惑星族の姿を直接見ることができます。このような活動的小惑星の直接観測は小惑星の族の形成頻度や形成過程の研究を一層前進させることでしょう。それは前述した若い小惑星族の研究<sup>22)</sup>とも相乗効果を持つはずで、族の研究がこれからますます面白くなることは疑いありません。

## 参考文献

- 1) Hirayama, K, 1918, AJ, 31, 185
- 2) Nesvorný, D., Brož, M., & Carruba, V., 2015, in Asteroids IV (Univ. of Arizona), 297
- 3) Zappalá, V., et al., 1990, AJ, 100, 2030
- 4) Parker, A., et al., 2008, Icarus, 198, 138
- 5) Carruba, V., et al., 2013, MNRAS, 433, 2075
- 6) Ivezić, Ž., et al., 2001, AJ, 122, 2749
- 7) Dermott, S. F., et al., 2018, Nature Astron. 2, 549
- 8) Nesvorný, D., et al., 2002, Nature, 417, 720
- 9) Yoshida, F., et al., 2004, PASJ, 56, 1105
- 10) Vokrouhlický, D., et al., 2006a, Icarus, 182, 92
- 11) Vokrouhlický, D., et al., 2006b, Icarus, 182, 118
- 12) Bottke, W. F. Jr., et al., 2006, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 34, 157
- 13) Brož, M., & Morbidelli, A., 2013, Icarus, 223, 844
- 14) Spoto, F., et al., 2015, Icarus, 257, 275
- 15) Nesvorný, D., et al., 2003, ApJ, 591, 486
- 16) Delbo', M., et al., 2017, Science, 357, 1026
- 17) Sugiura, K., et al., 2018, A&A, 620, A167
- 18) Snodgrass, C., et al., 2010, A&A, 511, A72
- 19) Drahus, M., et al., 2015, ApJ, 802, L8
- 20) Drahus, M., & Waniak, W., 2016, BAAS, 48, 325 (DPS Meeting #48, 522.03)
- 21) 脇田茂他, 2019, 遊・星・人, 28, 124
- 22) Yoshida F., et al., 2016, Icarus, 269, 15

## A Century of Asteroid Families

Fumi YOSHIDA

*Chiba Institute of Technology, Planetary  
Exploration Research Center, 2-17-1  
Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan*

Abstract: We had a meeting named "A Century of Asteroid Families" at XXXth General Assembly of the International Astronomical Union held in Vienna in 2018. This was to commemorate the 100 years from the first publication of the asteroid family identification by Kiyotsugu Hirayama. This meeting turned out a very good summary of the research on the asteroid families over the past 100 years. Here I briefly outline the flow of the 100 years of the asteroid family studies.