

日本の小惑星研究史——平山族の発見から 100 年

中 村 つこう
士

〈大東文化大学東洋研究所 〒175-0083 東京都板橋区徳丸 2-19-10〉

e-mail: tsukonk@yahoo.co.jp

平山清次が 1918 年に小惑星の族を提唱してから以後の約 100 年間、特に後半 50 年間を中心に日本の小惑星研究の歴史を概観した。平山が用いた永年摂動理論は 1950 年代からさらに発展させられ、古在メカニズムとして花開いた。北村正利が 1959 年に発表した小惑星の測光分光観測は、平山族の物理的起源を解明するための極めて先駆的な研究だった。同様に、戦前の鈴木清太郎と 70 年代に藤原顕が始めた破壊・衝突実験も新たな小惑星の研究分野を切り開いたし、日本の南極観測隊が発見した大量の隕石は南極隕石学を誕生させた。こうした直接・間接の背景と平山以来の伝統があっはじめて、宇宙科学研究所と惑星科学コミュニティが実施した探査機はやぶさによる小惑星イトカワの科学的探査が成功したと筆者は考えている。

1. はじめに

この報告では、本特集の主題に沿って、平山清次 (1874-1943) が 1918 年に小惑星の族に関する論文¹⁾を発表してから後の約 100 年間、特に筆者が見聞した主に後半 50 年間 (2000 年始め頃まで) の我が国における小惑星研究史の概観を試みる。これとほぼ同じ内容の英文報告が、2017 年に Springer Nature から出版された *The Emergence of Astrophysics in Asia* にすでに収録されている²⁾。なお、記述の統一のため、ご存命の方も含めて氏名は敬称を省かせていただいたので、ご了解をお願いしたい。

研究に無我夢中で取り組んでいた若年の頃は一般に、得られた成果を自己の実力だけで達成したと思ひ込みがちだが、成熟してだんだん全体像が見えてくると、先輩や先人の業績からの影響と学問的伝統に改めて思いを致すようになる。日本の小惑星研究においても、当事者が意識するかしないかにかかわらず、平山による族の研究から何らかの影響を受けている場合が多いというのが筆者の印象である。似たような例がイタリアだ。この

国は 20 世紀後半にファリネラ (P. Farinella) に代表される優れた小惑星研究者を輩出したが、これは最初の小惑星ケレス (またはセレス) を発見したピアジの伝統を継承しているからではなかろうか。

一方で対照的なのが、平山が名著『小惑星』(1935)³⁾で触れているように、英国の場合である。岩屑の如き小天体をいくつ見つけても天文学の発展には寄与しないという考え方が背後にあり、小惑星には関心を示さなかったと平山は言う。

英国のような研究態度は一見賢いようだが、世界中の天文学者が同様な考えでいたとしたら、トロヤ群や地球接近小惑星に見られる多彩で興味深い天体力学の研究テーマが生まれることもなかったらろうと平山は指摘した。平山の指摘が的はずれでなかったことは、例えば、2018 年のウィーンの国際天文学連合で平山族 100 年というシンポジウムが開催された事実⁴⁾に示されている。

2. 小惑星の位置・力学的研究

2.1 小惑星エロスの観測と天文単位

天文単位 (太陽と地球との平均距離) は太陽系

天体の運動と力学を論じる際の基本尺度であるから、その精密測定には長い歴史がある⁵⁾。1898年に最初の地球接近小惑星 (NEAs) であるエロスが発見されると、これを天文単位の値の精密化に利用するため、1900-01と1930-31年の衝の時にエロスの国際観測キャンペーンが呼びかけられた。

東京天文台では口径65 cmのツァイス製赤道儀屈折望遠鏡が1929年に導入されたばかりだったので、科学的ファーストライトの対象としてエロスが選ばれ、1931年の上記キャンペーンに参加、写真撮影によって多数の位置観測が実施された。その整約結果はコペンハーゲンの天文電報中央局に送られ、後に天文単位の改訂に寄与した⁶⁾。

2.2 平山族発見の意義と受容

1918年に平山族の論文^{1),7)} (ここではまだ族familyという言葉を使わずgroupと書いている)が出た後、世界の天文学コミュニティからの反応はきわめて鈍かった。その原因の一つは2回に及ぶ世界大戦にもあったが、主な理由は平山が用いた天体力学の永年摂動理論が高度で難しく、固有軌道要素と通常の接触軌道要素との区別がなかなか理解されなかったことによる。古在由秀(1928-2018)は1979年の集録*Asteroids*の中で、1970年代初頭になっても接触軌道要素の値が密集した集団を平山は族と命名した、と誤解していた3名の著名な天文学者の名前を例として挙げている⁸⁾。

平山の小惑星族に関してもう一つ興味深いのは、1918年論文の引用履歴である。NASAのAstrophysical Data System (ADS)によれば、2019年5月現在の引用総数は139件である。しかし、平山の族を論じた論文数がこんなに少ないはずはなく、実際にはおそらく10倍くらいはあるだろう。

そう推測する根拠は、例えば、最初の小惑星ケレスの発見200周年を祝う国際会議がシシリー島のパレルモで2001年に開催され、そこで発表された論文総数228篇の内、直接・間接に平山族を取り扱った論文だけで74篇に達したが、この事実はADSの統計には反映されていないからであ

る。このことは、小惑星の族という言葉が、平山の発見という修飾語なしで、今や天文学の一般用語として自立したことを物語っているのだろう。

2.3 永年摂動理論による小惑星の力学的研究

平山族の重要性を最初に正しく認識したのは、米国の優れた天体力学者、ブラウアー (D. Brouwer) とファン・ヴルコム (A. van Woerkom) だった。平山が族の分別に初めて固有軌道要素を用いた意義を強調すると共に、平山以後の観測データも利用して新たな小惑星の族をかなりの数発見した⁹⁾⁻¹¹⁾。

戦後、竹内端夫(2003年没)と古在が小惑星の永年摂動の研究をはじめた。平均運動が木星と4:3の共鳴関係にある小惑星チューレ (Thule) の長期的運動を解析的に議論した^{12),13)}。小惑星の族はブラウアー以後も何人かが力学理論と族の同定法を改良して新しい族を検出したが、1979年の古在による論文もその一つだった⁸⁾。古在の示唆を受けて、リー・堀源一郎の正準変換理論¹⁴⁾に基づき、湯浅学が小惑星の高次・高階の摂動論を発展させた¹⁵⁾。古在は族の検出にこの湯浅の結果を応用した⁸⁾。

その後、古在が指導した院生や後継者らによって、小惑星の長期的な軌道進化がさらに解明された。例えば、木下宙と中井宏による永年共鳴の研究¹⁶⁾、3:1の平均運動共鳴が起こすカークウッド間隙附近の吉川真による永年摂動理論¹⁷⁾などが挙げられる。

2.4 古在メカニズム

1962年に古在は、太陽、木星、小惑星の三体問題で小惑星の離心率 (e) と軌道傾斜角 (I) が大幅に変動する場合の正準変数による永年摂動理論を発表した¹⁸⁾——従来の理論は e と I が大きな値になる運動は取り扱えなかった。古在は、円軌道に近い時は I が非常に大きくなり、逆に I がゼロに近い時は極端に細長い軌道に変化する運動が実際に起こり得ることを示した。

その後1980年代から高速コンピュータの発達

と共に、数百万年以上の軌道進化が容易にしかも精度よく計算できるようになり、古在の理論は数値的にも確かめられた。その結果、こうした天体の振舞いは「古在メカニズム」と称されるようになった（1961年に同様な運動の研究をロシア語で発表（英訳は1962年）した天文学者の名前から、リドフ（M. L. Lidov）・古在メカニズムとも呼ばれる）。古在メカニズムは小惑星だけでなく、衛星、彗星、太陽系外の天体の長期的運動にも見られることが近年明らかになっている¹⁹⁾。

3. 初期の光学的物理観測

3.1 測光観測

小惑星エロスは発見後まもなく変光の振幅が大きく変動する奇妙な振舞いを示したため、その原因を探る観測が世界中で行われた。東京天文台でも1930年から1938年まで断続的に、神田茂（1894-1974）らが眼視と写真によってエロスの変光観測を実施した²⁰⁾。神田は日本天文学史の研究で有名だが、弟の神田清と共に変光星観測の専門家でもあった。

エロスの場合、不規則に変光しながら星々の間を移動するため、そのつど光度の比較星を変える必要があり、測定は変光星の場合に比べて相当に困難だったろう。神田の1931年の光度曲線²⁰⁾を見ると、現在知られた自転周期にほぼ近く、等級も0.2等ほどの精度で評価しているから、神田はよほど熟達した観測者だったに違いない。

1968-9年になって、東京天文台の^{みかりや} 忽滑谷基らが小惑星（15）エウノミアの変光の光電測光観測を行なった。自転は逆向きで周期は0.2534日と求められ、自転軸の天球上の方向も決定することができた²¹⁾。

3.2 分光的観測

1953年頃、東京天文台の65 cm望遠鏡に光電子増倍管1P21を使用した光電測光装置が装着された。近接連星が専門だった北村正利（1926-2012）は、1953年からこの装置を使用して小惑

星のカラー観測を約3年間実施した²²⁾。目的は、平山族の起源を物理観測から解明することを意図していた。2色のバンドフィルターによって、総計42個の小惑星を光電観測し、実験室で隕石と岩石の測定も行い次の結論を得た。

小惑星の自転に伴うカラーの変化は見られないこと、小惑星のカラーと固有軌道要素（つまり小惑星の族）との相関もほとんど認められないこと、9個の国内隕石の反射スペクトルを測定した結果、全体として小惑星のカラーと非常によく似ていること、などである。例として、平均運動（軌道半長径）とカラーとの相関図を図1に示す。明るい小惑星（黒丸）については弱い相関（相関係数 ~ 0.8 ）があるが、全体としては目立った相関は見られなかったし、他の物理量とカラーとの関係も同様だった。これ以後、北村が小惑星研究に戻ることはなかった。

ところが、北村自身も認識しなかったと思われるが、この論文は小惑星の分光観測の分野では極めて先駆的で重要な研究だったのである——恥ずかしながら筆者も、北村の評価を海外のレビュー論文によって初めて知った²³⁾。

まず、小惑星と隕石のカラーが全体として非常によく似ていたという結果によって、地上隕石の多くは小惑星帯小惑星（MBAs）からもたらされ

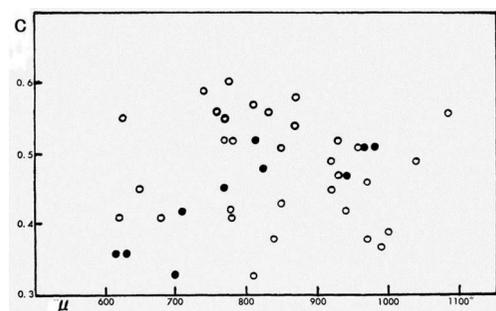


図1 北村正利が観測した小惑星の平均運動 (μ) とカラー (C) との相関図 (1959年)²²⁾。平均運動の600"が軌道半長径の3.3 AU, 1000"が2.3 AUに対応する。黒丸は小惑星暦に記された基準等級が明るい (<6 mag) 小惑星を示す。

たことを物理観測で示したことになる。サンプル数の点では、小惑星研究の大家ゲーレルス (T. Gehrels) がUBVシステムによる小惑星の分光結果を北村から約15年後の1970年代にまとめているが、その数は北村よりわずかに多い約50個だった²⁴⁾。また、図1中で北村が気づいた明るい小惑星のカラーと軌道半長径の間の弱い相関も²²⁾、現代の小惑星の基礎知識である、小惑星帯の内側にはS型が多く、外側ではC型が多いという傾向を初めて統計学的にとらえていたことを意味する。

4. 衝突実験

4.1 初期の破壊実験

東京帝国大学の物理学教授だった寺田寅彦 (1878-1935) は1920年代から、日常の物体に広く見られるひびや割れ目を統一的な物理現象として理解することに関心があった。寺田は平山による小惑星の族の話聞き、「割れ目学」の好例として興味を抱き、弟子だった九州大学の鈴木清太郎 (1886-1977) にこのことを話したと思われる。鈴木は早くも1921年に理化学研究所で実験を行っていたから²⁵⁾、その延長として1932-38年に改めて種々の衝突・爆発による破壊実験に従事することになる²⁶⁾。鈴木業績を最初に発掘した

のは横尾広光 (1943-2013) で²⁷⁾、その後吉田省子が平山族の研究に関連して詳しく議論した²⁵⁾。

実験方法は、自由落下に加えて岩石同士の衝突や火薬による爆破も試みた。破片のサイズや形状・質量分布だけでなく (図2)、2台のカメラを用いて破片の空間速度も測定し、運動量、運動エネルギー、破片の回転状態まで調べた。しかし、小惑星の起源については、自己爆発説と相互衝突説とを弁別するには至らなかった。おそらくこの鈴木らの実験の影響を受けて、平山も自己爆発説の方を支持するようになったと思われる。

鈴木らの実験は、衝突速度や写真の時間分解能などの点で現代の衝突実験に比べてかなり素朴な実験だったには違いない。だが、アポロ計画と月のクレーター形成に関連して始まった本格的な衝突実験が1970年頃からであることを考えれば、鈴木らの破壊実験がいかに時代を先取りしていたかが納得できるだろう。

4.2 近代的衝突実験

当時、京都大学物理学科の大学院生だった藤原顕は、1975年頃から航空工学科の2段式軽ガス銃を借りて数km/sという高速衝突実験を開始した。ポリカーボネートの弾丸を玄武岩に衝突させた。衝突現象がいくつかの形態に分類できること、最大破片と破片全体を集積した質量を求める経験

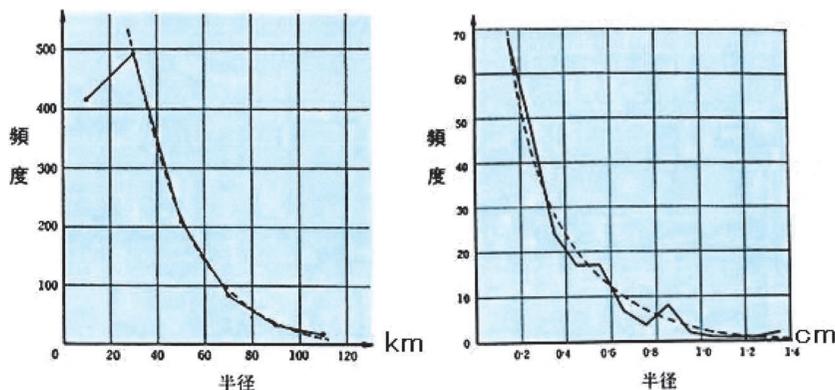


図2 サイズvs頻度の関係を小惑星 (左) と鈴木・長島 (1938)²⁶⁾ による実験結果 (右) とを比較した図 (横尾1997)²⁷⁾。実験では乾燥した粘土球を6 mの高さから鋼板上に落とした。曲線の形は両者でよく似ている。現在は、たて・よこ座標とも対数で、頻度は累積度数で表示する方が普通 (8.2節参照)。

式、結果の火星衛星への応用、などを論じた最初の論文が1977年に惑星科学研究所誌 *Icarus* に発表された²⁸⁾。

藤原らの最初の論文は世界中から大きな注目を集め、米国、イタリア、日本で実験室内や戸外での衝突・破壊実験が始まった²⁹⁾。日本では主に名古屋大学と東京大学で、衝突物体のサイズ、岩石、金属、氷などの材質と衝突条件をいろいろに変えた様々な実験が行われた。その後この衝突実験が、太陽系小天体やクレーターの起源を探究する重要な研究分野に発展したことは記憶に新しい。

5. 宇宙探査機による小惑星研究への歩み

5.1 宇宙科学研究所の創立

日本の宇宙探査技術の黎明は、東京大学生産技術研究所の糸川英夫(1912-1999)が1955年3月に長さ30 cmに満たないペンシル型ロケットを飛ばした時代まで遡る。その後、大型のロケットを開発して宇宙空間や地球物理学の探査に利用するため、科学者と工学者の協同研究を促進する目的で1964年に東京大学の中に小さな研究所が設立された。この組織は1981年には拡大・再編されて宇宙科学研究所(ISAS)が誕生する(現在はJAXAの一部門)。惑星科学と天体物理学を宇宙空間から観測研究する中枢機関の役割を担っていた。

5.2 太陽系科学研究の推進

惑星科学については、1968年の夏から「月惑星シンポジウム」が組織され、英文の立派な集録も刊行された。ちなみに、NASAのLunar and Planetary Science Conferenceが始まったのは2年後の1970年からである。筆者も駆け出しの研究者としてこの集會に参加した時の印象は、今でも昨日のように頭に残っている。駒場にあった東京大学宇宙航空研究所の古めかしい講堂が立ち見が出るほど満員になり、偉い先生も院生も区別なくみな真剣に議論する熱気に圧倒された。1979年からは「太陽系科学シンポジウム」も毎年開催さ

れ(集録は日本語)、こちらの方は、新しい実験装置や宇宙探査法のアイデアを自由に提案できる場としても機能していたように筆者には思えた。

1989年にはISASは駒場から相模原に移転した。この時期の小惑星に関するハイライトは、1993年に相模原キャンパスで開催された、ISASと国立天文台の共催による国際研究集會「平山族発見75周年記念シンポジウム」だろう。世界の主要な小惑星研究者の多くが参加し、天体力学、理論研究、観測プログラム、衝突実験、宇宙探査計画などが活発に発表・議論された。集録は太平洋天文学会が研究叢書の1冊として出版してくれた³⁰⁾。

筆者もシンポの裏方として動員され、箱根へのエクスカージョンを企画したが、終日の雨で景色はまったく見えなかった。ところが夕方最後に立ち寄った山中湖では、奇跡的に晴れて雄大な富士山が突然姿を現した。それを見た海外参加者の多くは、子供のように飛び上がって喜んだ有様が今でも目に浮かんでくる。

5.3 レーダー観測実験

小惑星をレーダー観測(レンジとドップラーを使用)する試みは、1968年のイカルスと1975年のエロスから始まった。小惑星レーダーの代表的研究者であるオストロ(S. Ostro)のホームページによれば、レーダー観測された小惑星は2019年5月現在でMBAが138個、NEAは846個に達するという。これらの成果は主にアレシボなどの巨大アンテナで得られたが、国際共同観測も行われた。

その最初は、1995年の小惑星ゴレブカ(Golevka)の観測である。米国のGoldstoneから電波を発射し、ウクライナのEvaptriaと鹿島の郵政省通信総合研究所の34 mパラボラアンテナで反射波の受信に成功した³¹⁾。そのため、これら観測地名の頭文字の組み合わせでゴレブカと命名されたのである。

5.4 小惑星探査機はやぶさと小惑星イトカワ

2003年5月に日本最初の小惑星探査機はやぶさ

が九州の内之浦から打ち上げられ、地球接近小惑星イトカワ（糸川英夫の名にちなむ）とのランデブー軌道に乗せることに成功した。この小惑星探査計画が実現するまでには、実に20年近い年月がかかった。1985年にISASの数人の工学研究者が、小惑星の表面からサンプルを地上に持ち帰るミッションの検討を始めた——当時の日本の技術水準を考えれば驚くべき野心的な計画だった。このグループは約10年間、種々の可能性の検討に悪戦苦闘したが、現実的なミッションは提案できなかった。

ところが1990年代の前半になって、M-V型と呼ぶ、従来より強力なロケットがISASで開発され、そのお蔭で小惑星ミッションも1994年にやっと公式な計画として認められた。ただし、以下に列挙する工学技術の実証試験機MUSES-Cという立場で承認された：(a) イオンエンジンの長期的性能テスト、(b) 地球スウィングバイによる軌道制御、(c) 微小重力下での自律的サンプル採取、(d) サンプルの地球大気圏内への回収、である。これらはISASにとってはどれも初めての経験であり、“小惑星に到達できただけでほぼ100%成功”とMUSES-Cの責任者が設計会議の度に強調していたことを思い出す。実際には探査機はやぶさは、1500枚に及ぶ小惑星イトカワの詳細画像を撮影し、藤原グループが設計・製作したサンプラーも表面の微小サンプルの採取に成功して、2010年6月に地球に無事持帰った。

はやぶさ計画は工学実証機という位置づけだったが、いくつかの理学機器を積んで科学データも取得することが期待された。そのため、弾丸を発射する表面サンプラーに加えて、光学航法用のカメラ(ONC-T)を兼ねた多バンド可視撮像装置(AMICA)、近赤外分光器、蛍光X線分光器、レーザー高度計が搭載された。筆者も行き掛かりでAMICAを担当させられることになり、若い研究者や院生、日本電気の技術者と共に約5年間カメラ開発と性能試験に携わった³²⁾。ここでは、

今でも印象に残っていることを少し記してみよう。

まずAMICAは、Asteroid Multi-band Imaging CAmeraの省略名である³³⁾。何か意味のある略号にしたかったので、最初の小惑星ケレスの発見国に敬意を表して、イタリア語で女友達を意味するamicaになるように機器名を決めた。小惑星の分光上の分類システムとしては、米国のD. Tholenが1980年代に提案したECAS(0.3-1.1 μm の範囲を8バンドでカバー)が割に広く用いられてきた。AMICAでもこの測光分光システムを導入したかったことと、AMICAはNASAとの共同プロジェクトでもあったので³³⁾、Tholenに頼み込んで協同研究者に入ってもらった。

もっとも悩んだ問題は、CCDの各受光素子の感度むらを較正するための、いわゆるフラット補正だった(宇宙空間では時間経過につれて予測できないCCDの感度劣化が起きる)。小惑星の表面は基本的に単調な灰色の世界であり、鉱物種、レゴリスの粒状と物理状態によってわずかな色の違いが生じる——場所による色の差はさらに小さいだろう。これら微妙な色の分布を正しく検出するためには、CCDのフラット補正が極めて重要になる。

一方、はやぶさの重量削減のために、AMICAも最終的に衛星底部に固定されてしまったから、当初予定した較正白板法はもはや使えない。何か解決策はないものかと随分思い悩んだ。ある時、CCDの露光テストをしていてたまたま、望遠レンズの直前に豆電球を点灯する方法に思い至った。早速試験データを取りなんとか使えそうなのが分かったので、図3のカメラでも同じ方式を採用した^{33), 34)}。

このはやぶさ探査機の初期の科学的成果は、7篇の論文として*Sciences*誌特集号に掲載されたが、その内の3篇^{35), 36), 37)}は主にAMICAのデータを使用して得られた成果であると言ってよいだろう。

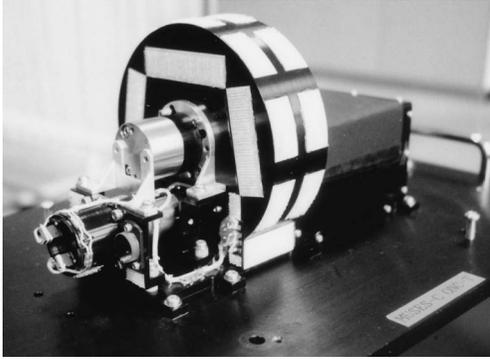


図3 多バンド可視カメラ (AMICA) の飛行試験モデル。中央の円筒ケースは8バンドのフィルターホイールで、貼られた多くの白テープはストレス試験のためのストレインゲージ。望遠レンズ (左下) の先端の2個の突起は、フラット補正のための豆電球光源である (ISAS 提供, 2001年6月9日筆者撮影)。

6. 南極隕石

6.1 国際地球観測年と南極隕石の発見

1959年、明るい火球がプラハの郊外プリブルムに落下するのが目撃された。火球の飛行経路から大気圏外の軌道が計算され、落下隕石も運良く回収された。その後現在まで7個の落下隕石の軌道が計算されたが (『理科年表』)、いずれもMBAかNEAに属する軌道を示した。このことは、隕石は小惑星の破片であることを証明しており、小惑星の物理特性と起源とを研究するのに隕石が決定的な役割を担っているとみなす根拠でもある。

1957年から国際地球観測年 (International Geophysical Year) がスタートした。その目的は、オーロラ・夜天光、電離層物理、太陽活動、重力、気象、海洋学、地震などの観測研究だが、南極大陸の調査研究もIGYの主要な研究テーマだった。日本も南緯69度東経39度の東オングル島に昭和基地を建設した。

ノルウェーのアムンゼンや英国のスコットによる南極大陸の探検からIGYまでの約半世紀間に、南極で蒐集された隕石の数はわずかに過ぎない。

1969年に、昭和基地から約300 km離れたやまと山脈の麓で日本の南極観測隊員が8個の隕石を発見した。地上では、石質隕石 (コンドライト) は通常の岩石と見かけがよく似ていて区別が難しいが、雪原上では簡単に識別できる。しかも、南極の氷河は流動しているため、山脈の麓のような地形では、遠方で氷河内に取り込まれた落下隕石も、流れに乗って氷河の表面に湧き上がったり集積したりする傾向があることが後に判明した。

6.2 南極隕石学の誕生

この1969年の隕石発見が契機になって、1974年から日本は組織的な隕石の探索を南極で開始する (図4)。その後、米国隊が参加したり、日米共同のチームも結成され、隕石の搜索は南極観測の重要な研究テーマとなった。その結果、やまと山脈付近で1974-1980年の期間に日本隊が発見した隕石だけで3600個に達した³⁸⁾。また、南極大陸で全ての国の観測隊が回収した隕石は1985年末で実に7500個に及ぶ。この数は、南極以外の全世界で古代から1970年代までに記録されたり回収された隕石の総数が約2400個だったことを考えれば、南極隕石がいかに画期的な成果だったかがよく理解できるだろう。

そして、この大量の新たな隕石の出現と国際協力による研究活動が、「南極隕石学」 (Antarctic meteoritics) と呼ばれた新しい研究分野を誕生させることになった³⁹⁾。南極隕石は他の地上隕石に比べて、地表環境からの汚染や浸食の影響をほとんど受けていないのも大きな特徴である。南極隕石全体の80%以上は普通コンドライトであり、他所の地上隕石の種別割合とほぼ同じだった。一方、化学組成の違いから、月や火星起源の隕石と考えられるものもいくつか見つかっている。

7. 小惑星ハンターによる発見競争

7.1 日本における初期の小惑星発見

麻布にあった東京天文台は1896年に、米国のブラッシャー社から口径20 cmの天体写真儀を購



図4 やまと雪原で1974年に隕石の探索をする観測隊員と雪上車（『南極の科学6, 南極隕石』³⁹⁾。キャタピラーの足元に1個の新しい隕石が写っている。

入した。このブラッシャー天体写真儀は Warner-Swasey 社製の赤道儀望遠鏡に共架して使用されたが（図5）、これはヤーキス天文台の Bruce 赤道儀とは“姉妹赤道儀”であるとして知られている⁴⁰⁾。

このブラッシャー天体写真儀を使って、東京帝国大学の星学科教授だった平山信（1867-1945）が1900年に撮影した一連の写真乾板に新しい小惑星が2個写っていた。これが、日本の小惑星天文学の幕開けと言ってよいだろう。最初の1個は後に（498）Tokioと命名され、他の1個は平山が（727）Nipponiaと名づけた。

1924年に東京天文台が三鷹に移転してからは、及川奥郎（1896-1970）がブラッシャー写真儀による小惑星の掃天観測を4年間行い、80個余りの小惑星を検出、その内8個が新小惑星として確定番号を獲得した。この及川の業績に対して1930年には日本学士院賞が与えられた。また、この頃から、東京天文台では小惑星・彗星の軌道決定を行なう研究者も出てくる。後に東京天文台長になった広瀬秀雄（1909-1981）は戦後間もなく、部下の教育のために軌道決定法のテキストを執筆し、この本は1970年代以降に多くのアマチュア天文家が軌道決定に取り組む典拠となった。

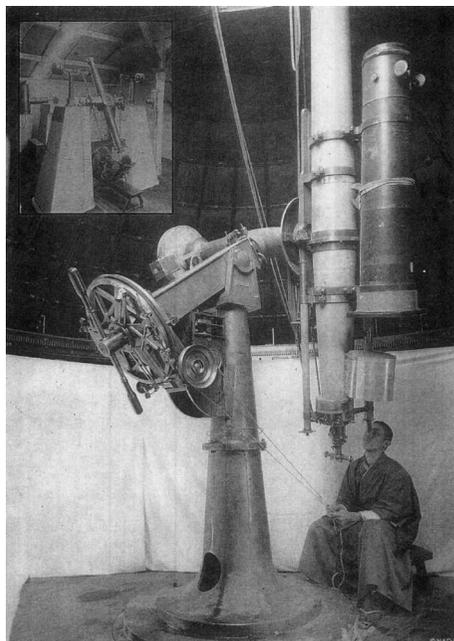


図5 麻布の東京天文台に設置されたブラッシャー天体写真儀（右側の短い円筒、国立天文台）。

7.2 小惑星のサーベイ観測

天の広い範囲を探索して目的天体を多数検出する方法をサーベイ観測と呼ぶ。小惑星の本格的なサーベイ観測の最初は、1950-52年にカイパー（G. Kuiper）が主導して行ったヤーキス・マクドナルド計画だった。写真等級16等までの小惑星1,500個の軌道を求め、それらのサイズ分布も決定した。この観測には、低温度星の専門家だった藤田良雄（1908-2013）がたまたま渡米中で参加している⁴¹⁾。次の大規模な小惑星サーベイ観測は1960年にパロマー天文台の48インチ（1.22 m）シュミット望遠鏡によって実施されたもので、その成果はその後約30年間にわたってサイズ分布などの標準と見なされた。

1974年になって、長野県の東京大学木曾観測所に日本光学が製作した1.05 mのシュミット望遠鏡が完成し稼働を開始した。この望遠鏡は6度×6度の天空を36 cm角の写真乾板でカバーできた。東京天文台の古川麒一郎（1929-2016）と香

西洋樹はこの望遠鏡の広視野を生かして、1976年頃から小惑星のサーベイ観測に取り組み⁴²⁾、検出した小惑星の内90個あまりに確定番号が与えられた。

7.3 アマチュア小惑星ハンターたち

前節までに述べた小惑星の発見は、いわばプロの天文学者によるものだった。1978年3月になって、静岡県の浦田武（1947-2012）が新しい小惑星1978EAを発見し、後に（2090）みずほと命名した——彼のお嬢さんの名にちなむ。

この予期しなかった浦田の発見は、日本のアマチュア天文家の小惑星探索熱に一気に火をつけた。多くの個人やグループの天文家が小惑星サーベイに参加するようになった。その頂点を極めたのが群馬県の小林隆雄である。大手家電メーカーの技術者で、1991-2002年の期間に実に2400個あまりの登録番号を持つ新小惑星を発見した。CCDカメラを搭載した自作望遠鏡を用いて、自動的に空をスキャンし移動天体を検出、1-2夜の観測から予備的な軌道も計算するシステムを自力で開発した。この小林のほかにも、数百個から千個近い数の小惑星を発見したグループがいくつかあり、日本のアマチュア小惑星ハンターたちによる発見総数は4-5000個に達した。国立天文台の磯部瑋三（1942-2006）が1996年に主導して始まったスペースガード協会の活動も⁴³⁾、当初は上記の流れの中で始まったと言えるだろう。

日本で上に述べた大量の新小惑星が発見された背景には、これら小惑星の軌道計算を一手に引き受けて小惑星ハンターたちを統括し鼓舞した中野圭一の役割を忘れることはできない。中野と小惑星ハンターたちの緊密な協力のお蔭で、1990年代から21世紀初頭にかけて、日本人による「小惑星発見レースの黄金時代」が到来したのである。

ところが2010年前後から状況が一変する。1990年代頃から、米国の大天文台などが地球に衝突する危険性のある小惑星を組織的に自動探索する専用望遠鏡システムを本格的に稼働させ始め

た。その最初はSpacewatch望遠鏡で、今までにMBAは10万個以上、NEAだけでも1万個以上（1984-2017年）を検出した。また、LINEARはさらに多くの小天体を発見し、Pan-STARRS、NEAT、LONEOSもそれぞれ数万個の数に達している⁴⁴⁾。そのために、小惑星の軌道を一括して計算・同定しているIAUの小惑星センターは、これら大規模な専用望遠鏡のデータをアマチュアのデータより優先的に処理するように方針を改めた。その結果、日本の小惑星ハンターたちは急速に探索の意欲を失い、彼らの観測活動も壊滅的な打撃をこうむることになったのは実に不運なことだった。

8. 近年の小惑星研究から

今世紀に入った頃から国内外の小惑星研究は、天文学に加えて、惑星科学、地球物理、地質鉱物学、生命の起源、工学分野など、非常に多岐の分野にまたがるようになった。そのため、筆者の能力ではとても全体は把握できないので、ここでは2つほどの事例を紹介するだけに留める。

8.1 小惑星表面の宇宙風化

北村による上述の先駆的な業績に示されたように、小惑星の分光測光データや反射スペクトルはその構成物質の地質・鉱物学的特性を反映していると従来から考えられていた。中でも、近赤外領域に見られる吸収バンドが鉱物種を判別するのにもっとも有用であることも次第に分かってきた。

小惑星反射スペクトルの情報が蓄積されるにつれて、一つの大きな謎が浮上してくる。それは、地上でもっとも多く回収される普通コンドライトの反射スペクトル特性を示す天体が、なぜかMBAにはわずかししか見つからないという疑問である。この問題は「小惑星・隕石パラドックス」として広く知られるようになった。やがてこれに対して、「宇宙風化」で説明できるとする仮説が提案された。それは、小惑星の表面は太陽風や微小隕石の衝突に長期間さらされた結果、光学的な反射

特性が普通コンドライトのものから大幅に変化したと考えるのである。この効果は微視的には、金属鉄のナノメートルサイズの微粒子が小惑星レゴリスの表面に沈着するのが原因と推定された。

この宇宙風化の過程を実験室で初めて再現してみせたのが、当時東京大学にいた佐々木晶のグループだった。太陽風を模擬した強いレーザー光を小惑星に見立てた隕石状サンプルの表面に照射して、実際にナノメートルサイズの鉄粒子が表面に生成されることを証明した。また、その反射スペクトルも MBA の間に普遍的に見られる S 型小惑星のものによく似ていたのである⁴⁵⁾。

8.2 微小小惑星の統計分布とその意義

小惑星の大部分は、より大きな天体が高速で繰り返し相互衝突した結果生まれた破片であるという認識が一般化してくると、特に微小小惑星のサイズ分布、空間分布に関心が向くようになった。

この頃の理論的考察からは、直径が約 1 km 以下の小惑星の多くは単体の岩石に近い構造を持ち、それより大きい小惑星は衝突破片同士が自己重力によって再集積したいわゆる“ラブルパイル (rubble pile)”構造であろう、と予想された^{46), 47)}。特に、上記 2 つのサイズ領域に対して、サイズ分布がどう異なるかが興味の焦点でいろいろ議論された。さらに、微小 MBA を調べることは、NEA の供給源を知るという意味でも重要だった。しかし、その当時利用できたサイズ vs. 数の分布は、パロマー山の 48 インチシュミット望遠鏡による 30 年以上前の結果が唯一で、直径 5 km 程度以上の範囲に限られていた。

1990 年代から、口径 8 m を超える大反射望遠鏡がついに出現した。その最初はハワイ島の 10 m ケック望遠鏡で、現在では口径 8 m 以上の望遠鏡は世界で 9 台を数える。それらのほとんどは、宇宙論研究の目的で遠方の銀河やクエーサーを主に分光観測するように設計製作されたため、非常に狭い天域しか撮影できなかった。唯一の例外は日本が 1999 年に完成させた 8.2 m すばる望

遠鏡であり、Suprime-Cam と呼ばれた写野 30 × 30 分をカバーする主焦点 mosaic-CCD カメラを備えていた。

ところで、小天体のサイズ vs 数分布とは、天体の直径を D 、 D 以上の大きさを持つ天体の総数 (例えば、1 平方度当たり) を N とした時、 $\log D$ と $\log N(>D)$ との関係を言う。実際の小惑星では、 $\log N(>D) = a - b \log D$ と書いた場合、かなり広い D の範囲で b は定数に近くなり、 b を分布の傾き (slope) と呼ぶことが多い。分布の全体像と衝突進化は主にこの b の値で特徴づけられる。小惑星では、数日の観測から小惑星の暫定軌道を決め、それに従って絶対等級 H (つまり D) を計算してサイズ vs. 数分布を求めるのが普通だった。

しかし筆者は 20 年以上前から、分布の傾き b だけが主な関心事なら、個々の軌道を求めなくとも 1 晩の多数の小惑星の運動学的情報から b はある程度決められるという感触を抱いていた。そこで、Suprime-Cam を用いて検出できる小惑星の数を試算してみたところ、控えめな予測でも 1 回の露光で直径が 1 km 以下 (sub-km) の MBA が約 100 個検出できそうなことが分かった⁴⁸⁾ —— この sub-km というサイズ領域は、当時はまだ誰も見たことのない Terra Incognita (未知の大地) だった。

8.3 すばる望遠鏡によるサブ km 小惑星の探査

その後、吉田二美、Budi Dermawan という共同研究者と一緒に、2001-2 年に数夜のすばる望遠鏡の観測時間をもらうことができた。それらのデータから、微小な MBA とトロヤ群小惑星のサイズ分布、空間分布、色分布などに関する 10 篇の論文が生まれた。その概要は既に『天文月報』で紹介したので⁴⁹⁾、以下ではそこで余り触れなかった点を記してみよう^{50), 51)}。

まず、直径 5 km 以上の MBA に関する従来のサイズ分布の傾き (b) が 1.8 ± 0.1 だったのに対して、0.3- 数 km の MBA については平均 $1.2 \pm$

0.05 という値が求まった。この予想外に小さな値は、以後に行なわれた暫定軌道を決めるやり方や他所での観測結果でも確認された。このことは、微小小惑星の総数は単純な衝突過程から予測される値から大幅に減少していることを意味しており、明らかに説明が必要である。

その原因として私たちは、sub-km の MBA の多くは大きなラブルパイル小惑星の間隙に取り込まれているか、または、ヤルコフスキー (Yarkovsky) 効果と呼ばれる非重力的な作用によって、選択的に小惑星帯から放出されたと理解した。しかし、正直に言えば、これらの解釈は理論家の論文などを参考にした単なる作文に過ぎない。本来なら衝突進化のモデル計算も行ない観測結果と比較・議論すべきだったが、遺憾ながら力量不足でそこまではできなかった。

私たちが得た MBA の空間分布、色分布、変光分布や、トロヤ群小惑星のサイズ分布についても同じことが言えるかもしれない。ただし、キチンとしたモデルを作らざるを得ない問題もあった。次に述べるトロヤ群小惑星の総数がその一つの例だ。

周知のようにトロヤ群小惑星は、円制限3体問題の L4 および L5 と呼ばれる2つの秤動点の周りに密集している。そして、L4 群と L5 群の総数はなぜか有意な差があるという指摘がかなり以前からあった。すばる望遠鏡が検出できる微小トロヤ群小惑星に対してこの L4 と L5 群の総数と比を調べることは、トロヤ群の起源と進化に関連して大いに興味の湧く問題である。このテーマに取り組もうとすると、観測されたトロヤ群小惑星の数を数えるだけでは済まない。

トロヤ群の各天体は L4 と L5 を中心に“おたまじゃくし軌道” (tadpole) を描くものが大部分である。その天球上の範囲は、黄経・黄緯ともに 50–60 度という広い天域に広がっている。従って、どんなに広視野の CCD を使用しても、同一の観測条件の元で、トロヤ群小惑星の数を観測か

ら全て数えるのは不可能である。

そのため、観測された個数から総数を算定するには、L4, L5 周りのトロヤ群小惑星の面密度分布を正しく表わす、しかるべきモデル分布がどうしても必要になる。従来は L4, L5 中心の等方的ガウス分布で近似していたが⁵²⁾、おたまじゃくし軌道のために、実際には明らかな非対称分布になる⁴⁹⁾。そこで、気体分子運動論の速度分布を参考にして、黄経方向の分布はマックスウェル分布を採用した。その結果、Jewitt らがガウス分布として求めた総数⁵²⁾ は実は 3–4 倍過大評価だったことが判明した⁵³⁾。また、L4 と L5 の総数の比も、サイズが小さくなるにつれてより大きくなる傾向があることが分かった。

9. まとめと議論

以上、本稿では、日本の小惑星研究史について、天文単位の改良をめざした 1930 年代の小惑星エロスの位置観測から始まって、2000 年初頭の小惑星・隕石パラドックスの解決や、すばる望遠鏡による sub-km 小惑星の観測まで、筆者の見聞と経験も交えて概観してみた。それらの中で、北村による小惑星・隕石の測光分光観測、鈴木清太郎の破壊・衝突実験、無謀とも見えた初期の小惑星サンプル回収計画の検討などが、特に先見性とオリジナリティを備えた研究だったと言えよう。

一方、近年の動向を見ていると、研究費と人員の大部分が大型施設や大プロジェクトに集中して、上述の如き先駆的な中小の研究には関心が薄い印象を受ける。しかし長期的な観点からは、オリジナリティこそが将来の研究分野を開拓する原動力ではないだろうか。その意味で筆者は、改めて平山の歴史的業績と北村、鈴木らの仕事から学びたい気がしている。

参考文献

- 1) 吉田省子, 2019, 天文月報, 112, 601
- 2) Nakamura, T. & Orchiston, W., ed. 2017, The Emer-

- gence of Astrophysics in Asia, (Springer Nature, Berlin), chapter 4
- 3) 平山清次, 1935, 小惑星 (岩波全書)
 - 4) 吉田二美, 2019, 天文月報, 112, ***
 - 5) 中村士, 岡村定矩, 2011, 宇宙観5000年史, (東京大学出版会), 第15章
 - 6) Spencer Jones, H., 1941, MmRAS, 66(2), 11
 - 7) Hirayama, K., 1918, AJ, 31, 185
 - 8) Kozai, Y., 1979, in Asteroids, ed. Gehrels, T., (University of Arizona Press, Tucson), 334
 - 9) Van Woerkom, A.A.J., & Brouwer, D., 1950, Astronomical Papers American Ephemeris, Vol. 13, Part II.
 - 10) Brouwer, D., 1950, AJ, 55, 162
 - 11) Brouwer, D., 1951, AJ, 56, 9
 - 12) Takenouchi, T., 1950, PASJ, 1, 159
 - 13) Kozai, Y., 1953, PASJ, 4, 172
 - 14) Hori, G., 1966, PASJ, 18, 287
 - 15) Yuasa, M., 1973, PASJ, 25, 399
 - 17) Yoshikawa, M., 1990, Icarus, 87, 78
 - 18) Kozai, Y., 1962, AJ, 67, 591
 - 19) Murray, C., & Dermott, S., 1997, Solar System Dynamics, (Cambridge University Press, Cambridge)
 - 20) 神田茂, 1934, 東京天文台報, 2(6), 107
 - 21) 忽滑谷基ほか, 1972, 東京天文台報, 15, 710
 - 22) Kitamura, M., 1959, PASJ, 11, 79
 - 23) Bowell, E., & Lumme, K., 1979, in Asteroids, ed. Gehrels, T., (University of Arizona Press, Tucson), 132
 - 24) Gehrels, T., ed. 1971, Physical Studies of Minor Planets, (NASA SP-267, Washington)
 - 25) 吉田省子, 2001, 科学史研究, 第40巻 (219), 129
 - 26) Suzuki, S., & Nagashima, H., 1938, Proc of the Physico-Mathematical Society of Japan, 3rd Series, 20, 517
 - 27) 横尾広光, 1997, 天文月報, 90, 273
 - 28) Fujiwara, A., et al., 1977, Icarus, 31, 277
 - 29) Fujiwara, A., et al., 1989, in Asteroids II, ed. Binzel, R.P. et al., (University of Arizona Press, Tucson), 240
 - 30) Kozai, Y., et al., ed. 1994, Seventy-five Years of Hirayama Asteroid Families: The Role of Collisions in the Solar System History, (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco)
 - 31) Koyama, Y., et al., 2001, Review of the Communications Research Laboratory, 47, 145
 - 32) 『国立天文台ニュース』, 2006, No. 151, 5
 - 33) <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experiment/display.action?id=2003-019A-01>
 - 34) Nakamura, T., et al., 2001, Earth Planets Space, 53, 1047
 - 35) Fujiwara, A., et al., 2006, Science 312, 1330
 - 36) Saito, J., et al., 2006, Science 312, 1341
 - 37) Demura, H., et al., 2006, Science, 312, 1347
 - 38) Yanai, K., & Kojima, H., 1986, in Lunar and Planetary Institute Technical Report (Lunar and Planetary Institute, Houston), 86-01
 - 39) 国立極地研究所編, 1987, 南極の科学6, 南極隕石 (古今書院)
 - 40) King, H.C., 1979, The History of the Telescope, (Dover, New York)
 - 41) Kuiper, G.P., et al., 1958, ApJS, 3, 289
 - 42) 香西洋樹, 1979, 第1回太陽系科学シンポジウム集録, 22
 - 43) 西山広太ほか, 2017, 天文月報, 110巻, 84-130
 - 44) <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/MPDiscSites.html>
 - 45) Sasaki, S., et al., 2001, Nature 410, 555
 - 46) 例えば, Chapman, C.R., 1978, in Asteroids: An Exploration Assessment, ed. Morrison, R. & Wells, W. C., (NASA Conference Publication 2053, Washington), 145
 - 47) Weidenschilling, S.J., 1981, Icarus, 46, 124
 - 48) 中村士, 1997, 第29回天体力学研究会集録, 274
 - 49) 中村士, 吉田二美, 2011, 天文月報, 104, 238
 - 50) Yoshida, F., & Nakamura, T., 2005, AJ, 130, 2900
 - 51) Dermawan, B., et al., 2011, PASJ, 63, S555
 - 52) Jewitt, D. C., et al., 2000, AJ, 120, 1140
 - 53) Nakamura, T. & Yoshida, F., 2008, PASJ, 60, 293

History of Japanese Asteroid Studies —A Hundred Years since Discovery of Hirayama Families

Tsuko NAKAMURA

Institute for Oriental Studies, Daito-Bunka University, 2-19-10 Tokumaru, Itabashi-ku, Tokyo 175-0083

Abstract: This paper reviews the studies relating to asteroids conducted by the Japanese during the past hundred years since Kiyotsugu Hirayama's monumental paper on the discovery of asteroid families in 1918. Secular perturbation theory adopted by Hirayama was further developed in the dynamics of asteroids from the 1950s and flourished as the Kozai mechanism. Spectro-photometric observations of asteroids and meteorites begun by Masatoshi Kitamura in 1953 was really a pioneering work in the physical studies of asteroids. Similarly, catastrophic impact experiments initiated by Seitaro Suzuki before WWII and Akira Fujiwara in the 1970s opened up a new research window in planetary sciences. The author considers that these activities of the past, combined with tradition nurtured by Hirayama's achievements, led Japan to the first successful sample return mission by Hayabusa spacecraft from asteroid Itokawa.