

微小小惑星の観測統計 10 年

中 村 士

〈帝京平成大学 〒170-0013 東京都豊島区東池袋 2-51-4〉

e-mail: tsukonk@yahoo.co.jp

吉 田 二 美

〈国立天文台 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: fumi.yoshida@nao.ac.jp

すばる望遠鏡の広視野 CCD カメラを使用した微小小惑星（直径 1 km 以下）のサーベイ観測で明らかになった統計的特性について概要を紹介する。この研究を始めた初期の動機と、新たな解析法を模索した試行錯誤の過程に重点をおいて述べた。得られた主な新知見は次のとおり：①小惑星帯の微小小惑星の数は、直径 5–10 km 以上の小惑星のサイズ分布から外挿した値より大幅に少なかった。木星の L4 トロヤ群小惑星でも同様な傾向が見られた。②木星のトロヤ群小惑星の総質量は小惑星帯全体の約 10–20% しかない。L4/L5 トロヤ群小惑星の数比は直径が小さくなるほど非対称性が強くなる。③小惑星の自転周期 vs 直径の図で、従来は空白域とされた小惑星帯小惑星と地球接近小惑星との中間の領域に約 70 個の小惑星を発見した。④そのうち、約半数が周期 2.2 時間以下の高速自転小惑星で、それらの形は他の小惑星に比べて球形の度合いが際立って強い傾向がある。

1. はじめに

微小な小惑星が度重なる衝突によって作られた天体であることは、今ではほぼ確立された事実である。その証拠を初めて力学的に見つけたのが、平山清次による族の発見だった（1918 年）。現在では小惑星の衝突進化にとどまらず、初期の惑星・小天体の形成における素過程を解明するうえでも微小小惑星の統計的研究は重要な貢献をする期待されている。そうした太陽系天体の衝突進化のさまざまな手がかりを担っているのが微小小惑星なのである。

第 1 著者 (TN) が大学院生の頃、名古屋大学の早川幸男先生がたしか『自然』という雑誌に次のようなことを書かれていたのを記憶している。一つの研究テーマというものは、始めてから一段落するのに 10 年はかかる、だから、研究者は生涯で

3–4 個のテーマしかこなせないものだと。当時はそんなに時間がかかるものかといふかったが、この小稿で紹介するテーマも、振り返ればやはり 10 年かかってしまった。私たちの研究テーマであるすばる望遠鏡による微小小惑星の統計的研究に関して、当初の目標がほぼ達成でき、発表した論文数が 10 編になったのを機会に、この研究を始めたいきさつ、失敗談と得られた新知見、今後の展望などを、論文にはあまり書けない・書かないことを中心に紹介してみたい。

2. 計画と挫折

(1) 定点観測案

TN が小惑星に興味をもつようになったのは、平山清次による名著、『小惑星』¹⁾ を読んだのがきっかけだったように思う。当時、東京天文台の堂平観測所（2000 年閉鎖）に採用され入所した

が、同僚の研究者もなく図書も皆無、計算手段はタイガー社製の機械式手回し計算機のみ、無人島に漂着した気分であつた。TN はかなり極端なアイデア至上主義者で、自分で考えたと思つたアイデアをすでに他の人がやっていたのがわかると、すぐに興味をなくしてしまう。そのためいつも、着手する研究テーマが見つからずに悩む。加えて、個々の天体を深く探求することより、統計的な研究を通じてこそ、その天体の特性を理解したことになるのだという思い込みがあつた。したがって、明るい彗星などが出現すると、観測していくつか論文にまとめてはみたものの、特に面白いと思つたことはない。

堂平観測所には、口径 50 cm のシュミット望遠鏡があつた。これ以小惑星の観測的研究をしたいと考えたが、指導してくれる人も相談する相手もいなかった。観測所には骨董品のごときツェイス社製乾板位置測定器があるので、ブリック式比較装置のような移動天体を見つける手段がなかった。しかしそれでも、50 cm シュミットで今まで他の人がやつたことのない、小惑星の統計的な研究が何かできないのか。思案の末考えたのが空の“定点観測”のアイデアである。視野が広いシュミットカメラの特性を生かして、カメラを黄道附近のある天域に固定して観測し続ければ、そこを高速道路の自動車の流れのように通過する小惑星を次々に検出できるだろう。小惑星は、小さなものほど無数と言ってよいくらい数が多いから、時間さえかければそれらの統計的な特性を知るのに十分なデータが得られるはずだ。天域が常に同じなのだから、小惑星の位置や光度は、その同じ天域にある星に対して相対的に測定しておけば良い、小惑星の精密な赤経・赤緯、等級などは将来改めて決め直せば良いだろうと考えた。

しかし、実際に始めてみると思惑どおりにはいかなかった。都心に近い堂平はなによりも空が明るすぎた。堂平のシュミットは F2 という明るい光学系なので、暗い天体検出のための長い露光時

間がかげられない。空がすぐに飽和し目的の暗い小惑星像は消えてしまうのである。小惑星の等級も、測光標準星とともに写真乾板の縁に“光学くさび”を同時に焼き込んで決めるのが通例だが、写真法ではそもそもわずかな小惑星の色の違いや変光はとても検出できないことをいろいろ試みた末にようやく悟つた。その後も、岡山天体物理観測所の 1.8 m 望遠鏡、木曾観測所の 1.2 m シュミット望遠鏡で似たような観測の実験を行ったが、いずれも目標とするデータは得られそうになかった。

(2) すばる望遠鏡の始動

1996 年末、ハワイに建設中のすばる望遠鏡がいよいよ完成間近となつたため、「第 1 回すばる望遠鏡ファーストライト・シンポジウム」が開催されるという通知を受け取つた。公開予定の観測装置の中で、広視野の CCD モザイクカメラ **Suprime-Cam** が自分らの目的に最も有望そうに見えたので、その仕様を元に堂平観測所で考えたサーベイ計画案がどの程度実現可能かを検討してみた。その結果、**Suprime-Cam** は理想的なカメラであることを確信した²⁾。小惑星は一般にサイズが小さくなるとともに数が急激に増加する。その増加率の控えめな値を採用して外挿してみると、直径 1 km 以下の小惑星が **Suprime-Cam** の 1 視野 (34'×27') に 100 個近く写る計算になつた。

当時、パロマー山 1.2 m シュミット望遠鏡による小惑星サーベイ観測が最も暗い小惑星を検出しており、直径 5-10 km までのサイズ分布が求められていた。それが、すばる望遠鏡サーベイでは 1 km 以下 (sub-km) の小惑星が検出できそうだった。従来より 1 桁もサイズの小さい全く未知の世界を垣間見ることができるのだ。

そこで、かなりの自信をもって微小小惑星のサーベイ計画についてこのシンポで報告した。ところが予想に反して全く反応がなく逆に驚いた。シンポでは、遠方のカイパーベルト (KB) 天体などに興味が集中していた。**Suprime-Cam** を使えば

非常に多数の KB 天体が写るはずだから、高校生を動員して撮影画像から探させるのだといった話題が受けていた（この計画がその後実現したのかどうか寡聞にして知らないが）、ガッカリして後ろの席に座っていると、活動銀河の研究で現在では世界的リーダーになっている旧知の T 氏が離れた席からにじり寄ってきて、耳元で囁いた一自分は実行可能ないい計画だと思うよ、この T 氏の言葉が唯一の慰めだった。

(3) 最初の結果

この頃から、大学院生だった第 2 著者 (FY) がすばる望遠鏡による微小小惑星の観測に興味を抱いて、TN と共同研究をすることになった。やがて 2000 年中頃から Suprime-Cam の試験観測が始まった（このときは Suprime-Cam は 8 個の CCD チップしか実装しておらず、視野は $27' \times 27'$ だった）。関係者に参加希望を打診しておいたところ、観測の前日になって 30 分だけ時間をもらえると知らせを受けた。30 分でいったい何ができるのか、考えている余裕はない、10 分間隔で 5 分露光の画像を 2 枚だけ撮影してもらった。しかも撮影された天域は月と天の川を避けるために、衝の位置から 41 度も離れていた。こんなに衝から離れた位置での短時間の観測では移動天体が検出できる見込みは低かったがほかに選択肢はなかった。

シュミット望遠鏡で移動天体の検出を試みた人の多くは、2 枚の写真乾板のポジとネガを重ねることをまず考える。理屈の上ではこの方法はうまくいきそうだが、実際にやってみると、ポジネガ法では空の輝度の揺らぎが強調されるために暗い小惑星の大部分は揺らぎに埋もれて見つからないことに気づく。そのため TN もこの方法は最初から念頭になかった。ところが、FY は写真乾板による観測など一度も経験がなかったから、CCD 画像のポジ・ネガ重ね合せをやってみた結果、 $V=19-24$ 等の小惑星を 27 個検出することができた。FY はこのときのことを次のように振り返る。最初は画像をブリンクして探そうとしたが、目が

チカチカして集中して画像を見ることができなかった。そこで、2 枚の画像を差し引きすることを思いついた。画像の差し引きは IRAF ソフトによる解析の初歩で、これしか知らなかったのである。明らかに背景の恒星と移動速度の違う小惑星をいくつも見つけたときはとてもうれしかった。

とはいえ、測光標準星はもちろん観測できなかったし、軌道を推定する方法もまだ確立していなかったから、移動天体の見かけの運動速度だけを頼りに、距離やカラーと分類型、反射能などの多くを仮定してどうにかサイズ分布を求めた。

小惑星のサイズ分布を特徴づける量は、サイズ分布の傾き (b) である。 b は、直径 D (km) より大きい小惑星の累積度数を N とすると、

$$\log N = C - b \log D$$

によって定義され、 $\log N$ 対 $\log D$ の平面上で傾き $-b$ の直線になる (C : 定数)。パロマーサーベイでは $b=1.75$ だったが、われわれの結果は $b=1.0 \pm 0.3$ になった。予想外に小さな値で、しかも用いた小惑星数はわずか 30 個足らずだったから内心結果に自信はなかった。しかしレフェリーは好意的で、若干の修正だけでこの sub-km 小惑星に関する最初の論文は何とか日の目を見た³⁾。得られた b の値はデータ数が小さかったために誤差範囲はかなり大きい、基本的に正しい値だったことが後の本格的なサーベイ観測の結果から判明した。つまり、直径 1 km 程度以下の微小小惑星の数は、パロマーサーベイからの予測に比べて大幅に少なかったのである。

3. 固定観念との闘い

順調だったのは上記の最初の論文だけで、その後はイバラの道だった。すばる望遠鏡の共同利用観測の公募が 2000 年後半からスタートした。私たちも Suprime-Cam を用いた微小小惑星の検出というテーマで意気込んで応募したが、見事に落ちた。わずか 1-2 夜の観測から、数百個の sub-km

小惑星の空間分布、サイズ分布、分類型の元になるカラー分布、光度変化のデータまで得られる、極めて効率の良い画期的観測という自信がわれわれにはあったが、観測レフェリーたちはそうは受け取らなかった。曰く、「テーマが散漫である」、「目的が明確でない」、etc.

特に FY は、すばる望遠鏡による微小小惑星の観測を学位論文のテーマにする予定だったから、公募に落ちたことは私たちにとって想定外の事態だった。しかし、太陽系天体の別なサーベイ観測で観測時間を得た W 氏の好意で彼らの画像データを使わせてくれることになったので、FY は幸いにも学位論文用のデータを入手することができ、感謝に堪えない。また、次回の応募では前回の失敗を教訓に、観測テーマを微小小惑星のサイズ分布決定に絞り、やっとすばる望遠鏡の観測時間を1夜だけもらうことができた。

一方、観測データの解析結果を何とかまとめた論文は、投稿するたびにレフェリーから大幅改訂を要求された。投稿する雑誌を替えた末に3回も改訂を要求され、投稿から出版まで2年以上かかった場合もある。

その主な原因は、すばる望遠鏡による微小小惑星の撮像観測のようなデータは解析方法が確立されておらず、伝統的な小惑星観測の整約手法では扱えなかったためである。例えば上に述べた、小惑星のサイズ分布は、数百-1,000個程度の多数データから求めるもの、といういわば固定観念があった。既知の方法と違うやり方で解析した論文を投稿しても、固定観念にとらわれたレフェリーは結果を信用しないから、全面改訂を要求されたり、門前払いを食わされたりする。他方、固定観念はもちろんわれわれ自身の側にもあった。そのため、伝統的な考えを捨てて新たなアプローチを探すのに随分回り道をした。したがって、微小小惑星の観測統計の研究は、少し大げさに表現すれば、“固定観念との闘い”だったと言ってもよい。

(1) 固定観念 1—小惑星の空間分布決定には楕円軌道要素が必要

すばる望遠鏡で微小小惑星の観測データを得る具体的見通しが立った頃、その観測計画をコーネル大学で開催された Asteroids Comets Meteors 1999 という会議で報告したことがある。わずか一晩の小惑星の観測からサイズ分布が正しく求まるはずはないという批判を何人も研究者から受けた。その昔、彗星の集団力学的研究で TN のライバル的存在だったウルグアイの T 氏などは、昼休みに会ったとき“ナンセンス”と言いつつ放った。

サイズ分布の決定にどの程度の精度で軌道を推定しなければならないのかの定量的評価はまだ行っていなかったものの、それまでの天体力学的経験から、数百個の小惑星が観測できれば、われわれの目的に必要なサイズ分布は得られると直感的に感じていたから、会議での批判には戸惑った。会議が終わった後、バッファローまでレンタカーでナイアガラ瀑布の見物に行ったが、車を運転している間、自分の直感に対する不安がしだいに募ってきて、ナイアガラでは壮大な滝の景色をほとんどうわの空で眺めていた。

(2) Bowell 軌道

帰国してから早速、実際に近い観測条件を模擬したシミュレーションでサイズ分布決定精度の検証を始めた。観測条件の点でも、軌道推定に用いる数式が簡単になるという意味でも、観測する空は黄道附近の衝の位置が最適である。円軌道を仮定すると、軌道半径と軌道傾斜角 (I) とが計算できる。黄道上の衝の点から 15-20 度の範囲で有効な、小惑星の見かけの運動ベクトルと軌道半長径 (a) の関係を導いたところ、 a に関する 3 次式を得た⁴⁾。ところがその直後、ローウェル天文台の Bowell がすでに 1990 年に、黄道上の衝の点に厳密に小惑星が位置する場合の表式を、ある会議の集録に発表していることにたまたま気がついた。これは簡単な a の 2 次式で、検討してみると衝の点から 5 度程度の範囲なら十分使い物になること

がわかった。以後はこの **Bowell** 軌道を使うようになった（ただし、衝からもっと離れた観測では上記の 3 次式を使う必要がある）。

なお、少し後に、江戸時代天文学史で著名な渡辺敏夫先生が、1953 年という早い時期に、表の形ではあるがここで述べたのと本質的に同じ方法を大学の紀要に発表していることを知った⁵⁾。ご遺族の依頼で渡辺先生の蔵書・資料を整理していて、廃棄と書かれた論文別刷の束の中に偶然見つけたのである。この当時、新たに発見された小惑星を追跡観測するために、円軌道近似で位置を予測するのが普通だったが、その計算を簡略化する目的で表による方法を渡辺先生は考案されたのであろう。

新小惑星の位置観測では、6 個の楕円軌道要素を求めるために 3 夜の観測を行うという伝統が従来からある。しかし、そうして得られた軌道要素がどの程度の誤差を含むかは今まであまり問題にされなかったように思う。

図 1 は、4-5 日以内の観測から求められた初期の軌道離心率 (e) と、確定軌道が得られた後の e の差 (Δe) を数十個の新発見の小惑星について描いた図である⁴⁾。一方、ほとんどの既知の小惑星帯小惑星の e は 0.15 ± 0.1 の範囲に分布する。よって、両者の比較から、初期に計算された e の値の大半はほとんど意味がないことがわかる。言

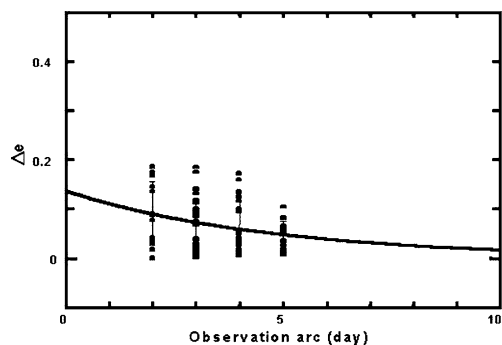


図 1 小惑星の離心率における初期軌道誤差⁴⁾ (佐藤裕介原図, 2001 年). 横軸が観測期間 (日), 縦軸は離心率 (e) の誤差を示す。

い換えれば、小惑星のサイズ分布など統計的な目的には円軌道の仮定で十分で、3 日間かけて楕円軌道を決めるよりも円軌道で妥協してデータ数を 3 倍にするほうが賢明ということになる。

ちなみに、**Bowell** 軌道を用いた個々の小惑星の a の平均誤差 (Δa) は $0.1-0.15$ AU だった。後にカナダのグループが、小惑星が近日点にいると仮定して (近日点軌道, **Väisälä** 軌道) 同様なサイズ分布を求めた¹⁶⁾。その平均の Δa は $0.15-0.2$ AU だったから、円軌道近似のほうが一般的により正しい値を与えるようである。

以上、**Bowell** 軌道とすばる望遠鏡の実際的な観測条件を模擬した広範なシミュレーションの結果、われわれのサーベイ観測では、サイズ分布の傾き (b) は $0.05-0.1$ の誤差範囲で決定できることがわかった。この値は、1,000 個程度のデータから実際に求まる b の観測誤差と同程度であった⁴⁾。

なお、サイズ分布に示される直径の下限はサーベイ観測の限界等級で決まり、もちろん限界等級が深いに越したことはない。私たちの限界等級は 90% の数の天体が検出される限界の等級と定義している。それに対して、他の大部分のサーベイ観測では 50% 検出を限界等級としており、同じ口径の望遠鏡を使用している、一見後者のほうが限界等級が深い印象を与える。しかし、50% 限界等級とは、半数が“存在するのかどうかも定かではない”データに基づいてサイズ分布を求めているわけだから、その限界等級は一種の誇大宣伝という気もする。

4. 空間分布とカラー分布

小惑星の中には、 I の値が 60 度にも達する高軌道傾斜角小惑星の存在が今では数十個知られていて、その力学的起源の解明は古在メカニズムなどに関連して重要な研究テーマの一つである。こうした天体は黄緯が高い天域で探すもの、という固定観念があるようだ。しかし、すべての小惑星は必ず黄道を横切るから、検出効率が大幅に低下す

表1 小惑星帯中の場所による b の違い⁶⁾.

| 内側 $2.0 < a < 2.6$ AU | 中央 $2.6 < a < 3.0$ AU | 外側 $3.0 < a < 3.5$ AU |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $1.4-1.5 \pm 0.04$ | 1.2 ± 0.03 | 1.0 ± 0.03 |

高黄緯の天域であえて探す必要はない（高軌道傾斜角の小惑星だけに限って言えば、高黄緯の天域を直接見たほうが、そこでの滞在時間が黄道附近より長い分だけ若干検出率は上がるけれども）、事実、私たちのサーベイでも検出された全体の小惑星約 3,000 個のうち、 $I=30-40$ 度のものが約 10 個あった。

(1) サイズ分布の場所による違い

すばる望遠鏡によるサーベイ観測で検出された直径 (D) が $0.3 \text{ km} < D < 1.5 \text{ km}$ の小惑星では、 b の値が小惑星帯 (2-3.5 AU) の場所によってかなり異なることが明らかになった。その値を表 1 に示す^{6), 7)}。

すでに述べたように、パロマーサーベイの b に比べて sub-km 小惑星の値がかなり小さいのは、これら微小小惑星の数が衝突によって生成されたはずの破片の数より大幅に減少していることを意味する。減少の原因は二つ考えられる。一つは、非球形の小惑星は表面からの非等方的な熱放射によって軌道半径が長期的に変化し、やがて小惑星帯から取り除かれるためである (Yarkovsky 効果)。しかし、この時間スケールは sub-km サイズの場合、衝突の時間スケールより数倍-10 倍程度長い¹³⁾ので、微小小惑星の数を減らす効果はそれほど大きくないと考えられる。

もう一つの原因は、小惑星の内部構造に関係している。Sub-km サイズより大きい小惑星の大部分は、たび重なる衝突の結果、衝突破片が自己重力で緩く集積した rubble pile の状態にあると想像される。衝突で生成された微小な衝突破片はより大きな破片の隙間に主に集積し、全体として一つの小惑星を形成しているため、数が減っていると解釈するのである。実際、小惑星帯の内側に多い

S 型小惑星に比べて、外側で豊富な C 型小惑星は平均密度が小さく（例えば、探査機 NEAR が測定した小惑星 Mathilde は 1.3 g/cm^3 ）、隙間が S 型よりかなり多いことを示唆している。室内実験でも、衝突後の破片は放出されるより天体内部に“吸収”されやすい傾向を示した。したがって、表 1 で見たような、小惑星帯の外側ほど b 値が小さい傾向（つまり、小さい小惑星ほど減少の割合が大きい）は、上に述べた内部構造の違いで説明できるのかもしれない。

(2) カラー分布

私たちのサーベイ観測では、B バンドと R バンドのフィルターを使って、S 型と C 型の空間分布の違いを調べる試みも行った⁸⁾。S 型や C 型などの分類型は上記バンドの観測だけではもちろん確定できないから、ここでは近似的に S-like, C-like という言葉を使用するが、それらの分布が大局的には S 型、C 型の分布を反映していることはおそらく疑いない。

小惑星帯内の sub-km 小惑星では、 $a=2.5$ AU より内側では S-like と C-like がほぼ同じ比率であったのに対して、それより外側では C-like 小惑星が 8 割以上を占めることがわかった⁸⁾。すなわち、分類型の分布では、より大きな小惑星の分布と基本的には変わらなかったが、この結果は微小小惑星を直接観測して得られた新知見として意味がある。

5. トロヤ群小惑星

トロヤ群小惑星とは、木星とほぼ同じ軌道上にあり、木星の前後で離角 60 度付近 (L4, L5 ラグランジュ点) を中心に分布する特異小惑星のことである。すばる望遠鏡によるサーベイ観測の主目的は小惑星帯小惑星だったので、トロヤ群小惑星は当初全く考慮していなかったし、観測天域が L4, L5 点からかなり離れていたから統計ができるほどの天体数が写るとも考えなかった。しかし、2 夜の観測を解析してみたら予想外に面白い

結果が得られた。

(1) サイズ分布

私たちが観測できたトロヤ群小惑星のサイズ範囲は $0.7 \text{ km} < D < 13 \text{ km}$ で、L4 天体が 51 個、L5 天体が 62 個検出された。観測天域は L4 点の前方 32 度と L5 点の後方 22 度だった。これらの観測からサイズ分布の傾きを求めたところ、L4, L5 共に、上記のサイズ範囲全体では $b = 2.1 - 2.2 \pm 0.1$ という値が得られた。ところが少し詳しく見ると L4 の場合、 $D > 5 \text{ km}$ では $b = 2.4 \pm 0.1$ 、 $1 \text{ km} < D < 5 \text{ km}$ では $b = 1.3 \pm 0.1$ という、傾きの折れ曲りが見られた⁹⁾¹⁰⁾。実はこのような、サイズ範囲による b の折れ曲りは小惑星帯の小惑星にも見られ、サイズ分布を一定の傾き b で表現することは単なる近似に過ぎないことを示唆している。しかし、広いサイズ範囲にわたって b がいかに変化するかはいまだ理論的には解明されていない。

トロヤ群小惑星の起源に関して、L4 天体と L5 天体の総数が大きく異なるという問題がある。L4 のほうが多いのである。軌道が確定したトロヤ群小惑星のうち、 $D > 30 \text{ km}$ では L4 群と L5 群の数は $58 : 42$ 、 $D > 10 \text{ km}$ では約 $60 : 40$ だった。純粋に天体力学的立場では L4 点と L5 点周りの運動は何ら違いがないから、両者の総数の差は起源を異にするか、トロヤ群形成後の進化に何か非重力的な効果が作用しているかだろう。

(2) 総数の推定

トロヤ群小惑星は L4, L5 点の前後で黄経 30-40 度の範囲に広がって存在しており、黄緯の方向にも数十度にわたって分布している。したがって、L4・L5 小惑星の全数を観測だけから推定することは数回の狭い範囲のサーベイ的な観測では不可能である。例えば、すばる望遠鏡は他の 8-10 m クラス望遠鏡に比べて、圧倒的に視野の広い *Suprime-Cam* カメラを有することが大きな特徴であるが、それでもわれわれのサーベイ観測では 1 夜にせいぜい 3-4 平方度の天域をカバーできたに過ぎない。そのため、既知の明るいトロヤ群小惑星

の全体的な空間分布の形状が微小トロヤ群にも適用できると仮定して、全数は計算で求めるしかないのである。

Jewitt ら (2000) はハワイ大の 2.2 m 望遠鏡を使って、約 20 平方度のサーベイ観測 (検出されたサイズは $4 \text{ km} < D < 40 \text{ km}$) を行い、L4 点周りのトロヤ群小惑星の面密度分布をガウス分布と見なして、 $D > 2 \text{ km}$ のトロヤ群小惑星の総数を約 1.6×10^5 個と推定した。この数は同じサイズ領域での小惑星帯小惑星の総数にほぼ匹敵する。しかし問題は、面密度をガウス分布と仮定した点にあった。個々のトロヤ群小惑星の L4, L5 周りの運動が、木星が位置する方向と逆の後方に長く尾を引くおたまじゃくしのような形の軌道であることは昔から広く知られている。とすれば、それらの分布関数をガウス分布のような対称形分布で近似するのは不適當であろう。

実際、既知のトロヤ群小惑星の軌道要素をもとに、約 1 万個の仮想小惑星を生成し、数値積分によるシミュレーションを行ってみると、それらの L4 点周りの分布は図 2 のようになった¹¹⁾。明らかに非対称な分布で、木星の反対側に尾を引いている。私たちはこの分布を Maxwell-Gauss 分布として近似し、トロヤ群小惑星の総数を計算し直した結果、Jewitt ら (2000) の見積もりは 3-4 倍ほど過大評価になっていたことがわかったのである。

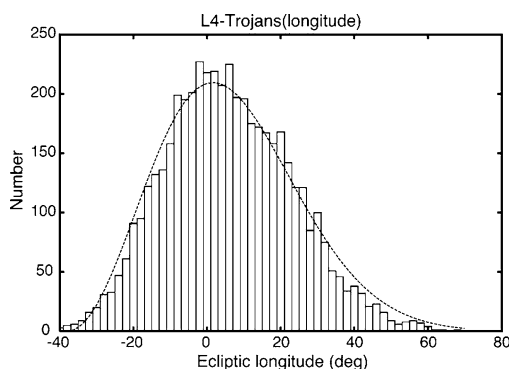


図2 L4 トロヤ群小惑星の非対称分布¹¹⁾。横軸は黄経で 0 度が L4 点の位置、-60 度の位置に木星がある。

表2 トロヤ群小惑星の数比 (L4:L5).

| $D > 30 \text{ km}$ | $D > 10 \text{ km}$ | $D > 2 \text{ km}$ |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| 58 : 42 | ~60 : 40 | 65 : 35 |

このことは、トロヤ群小惑星の総質量は小惑星帯小惑星のせいぜい10-20%に過ぎないことを意味する。なお、トロヤ群小惑星のアルベド（反射能）観測に関するJewittらの最近の論文（2009）では、われわれの非対称分布の論文を引用しているにもかかわらず、分布形は相変わらずガウス分布を使って総数を計算している。

新しいMaxwell-Gauss型の分布に基づき、すばる望遠鏡サーベイで検出されたL4, L5トロヤ群の $D > 2 \text{ km}$ の総数を算出したところ、表2の右端のような数比になった（比較のため、より大きなトロヤ群小惑星の値も示してある）。

表から、サイズが小さくなるほど両者の数の比が大きくなる傾向があるように見える。もしこれが本当なら、L4・L5天体における総数の違いの原因は始原的なものではなく、むしろその後の衝突進化によって生じたと考えるほうが妥当なのではなからうか。

6. 変光観測

すばる望遠鏡ファーストライト・シンポのために、検出可能な天体数を試算してみても一番興奮したテーマは、変光観測である。従来、小惑星の変光は1晩中1個の小惑星をずっと測光して1本の変光曲線を描くという、望遠鏡運用の面では最も非効率的な観測だった。それが、Suprime-Camを用いる観測では数十~100個の小惑星の変光曲線が1夜にして得られるのだ。しかもそれらは皆、太陽位相角などの観測条件が全く同じだから、小惑星の自転や形状を統計的に比較するうえでは理想的な観測データなのである。

すばる望遠鏡の第1回共同利用観測の公募が不採択になった頃、旧知のインドネシアの研究者から彼の大学院生B. Dermawan君(BD)を委託され

た。初めは言葉の問題から適切な研究テーマが定まらなかったが、BDはまもなくプログラミングで優れた才能を発揮し始め、後には変光観測の整約とその解析プログラムの大部分は彼が作った。

BDに最初に取り組んでもらったテーマは、シュワールバルリエの昔から、太陽のごく近傍を巡ると想像された未知惑星バルカンを、SOHO太陽観測衛星（地球のL1点に位置する）が撮影したコロナグラフ画像から探すことだった。今の時代、われわれももはやバルカンが見つかるとはもちろん考えておらず、逆に存在しないことをSOHO画像から定量的に証明するのが目的だった。BDはSOHOの数カ月間のアーカイブ画像を、連日肉眼で非常に忍耐強く調べ上げる作業に取り組んだ。その結果、SOHOカメラの限界等級の範囲内で、公転周期70-80日以下の天体は存在しないことがほぼ確実になった。この結論を論文にまとめようとしていた矢先、図書室で何気なく新着の天文雑誌を見ると、われわれと全く同じテーマの論文が掲載されているではないか。しかもこの論文の著者らは、われわれのようなアーカイブ画像の解析ではなく、バルカンの探査にSOHO衛星の観測時間を十分過ぎるほどもらっていて、われわれと同じ結論に達していた。悔しながら私たちは黙って撤退する外なかった。しかしSOHOで経験したこの移動天体の眼視による確認法は、微小小惑星の検出と確認でも大いに役立った。

(1) 高速自転小惑星

小惑星の変光観測は実に簡単で、一晩中ある天域に望遠鏡を固定して撮像を続けるだけである。われわれの観測では2分露光+2分読出しのサイクルを繰り返した。8時間あまりの観測時間で127個の小惑星を検出、そのうち、限界等級（検出率90%で $R \sim 24.6$ ）に近いため、変光曲線が描けない天体を除き、さらに、8時間の観測では自転周期の決定誤差が大きいとされる自転周期(P_r)が $P_r > 10.5 \text{ h}$ のものを除外して、直径が $0.1 \text{ km} < D < 2.2 \text{ km}$ の範囲にある68個の小惑星の変光曲

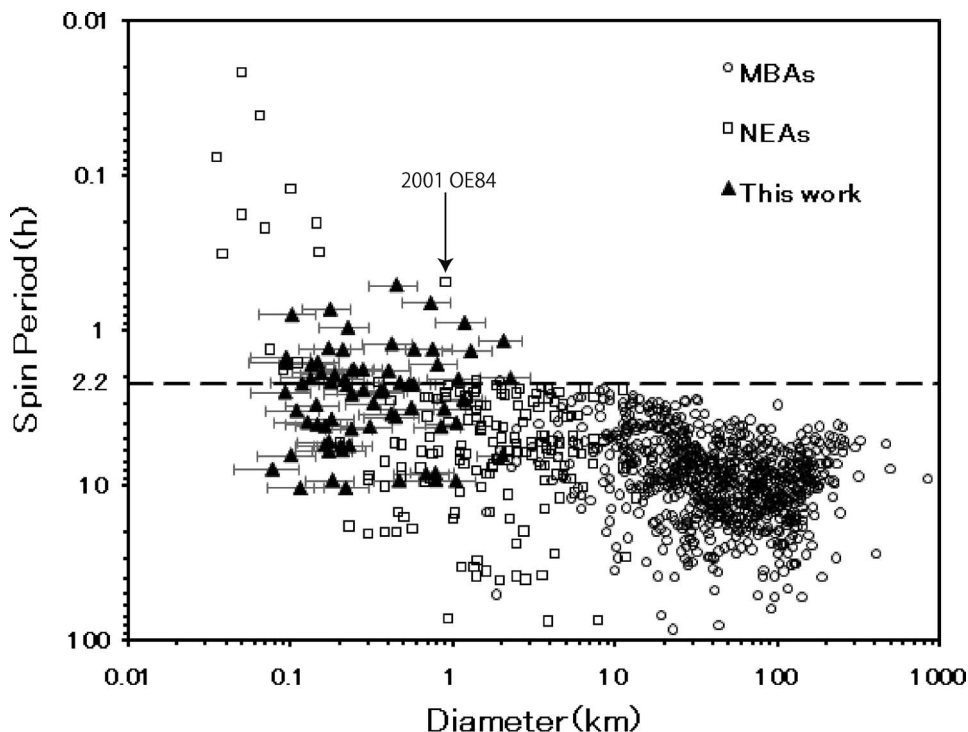


図3 小惑星の直径と自転周期の関係。○：小惑星帯小惑星，□：地球接近小惑星，▲：すばるで検出された小惑星¹²⁾。横軸は直径，縦軸が自転周期を表す。

線を得た。

微小小惑星の変光観測で私たちが認識不足だったのは、小惑星が高い頻度で恒星や遠方の銀河と重なったり接近したりすることだった。この時間はもちろん測光はできない。その結果、割に連続的に測光できた場合でも30-40測点、20-30点程度しか測点がない小惑星も少なくなかった。

この観測の主目的は高速自転小惑星 (fast-rotators; FR) ($P_r < 2.2$ h) の検出だった。地球接近小惑星 (Near-Earth asteroids; NEA) の中には自転周期がわずか数分の物も見つかっているが、図3に示すように、小惑星帯小惑星で、直径数 km 以上の小惑星では $P_r < 2.2$ h の FR は1個も知られていなかった。その理由は次のように説明されていた。

旧来の理論と実験では、 $D < 1$ km の小惑星は単体の岩石状 (monolith) であるのに対して、およそ

$D > 1$ km 以上の小惑星の内部構造は、たび重なる衝突の結果、4節に述べた rubble pile の状態にあると解釈されてきた。Rubble pile 中の破片同士は自己重力で集積しているので、引張り強度はほぼゼロに近い。そのため、小惑星表面での自転による遠心力と自己重力の釣り合いを計算してみると、安定形状を保てる限界の自転周期はサイズには無関係に平均密度だけで決まることがわかる。その限界周期が2.2 hなのである。

もし、すばる望遠鏡サーベイで検出された sub-km サイズの小惑星が monolith に近ければ FR が見つかるだろうし、rubble pile であれば2.2 h がやはり限界周期になるだろう。いずれにしても、全く未知のサイズ領域にある小惑星の内部構造特性がこの観測から“集団の性質”として明らかになると期待された。その後、2006年に発表されたはやぶさ探査機による小惑星イトカワの撮像では、

この天体が sub-km の大きさだったにもかかわらず rubble pile だったので、他の sub-km 小惑星も rubble pile である可能性が高まっていた。

(2) 固定観念 2—測点の少ない変光曲線は無価値
すばるによる sub-km 小惑星の変光観測データを整約する主要プログラムを BD が作成して解析し、自転周期と形状に関する論文をまとめた（このテーマが彼の学位論文となった）。この論文がある雑誌に投稿したところ、レフェリーはチェコの P 氏と NASA の H 氏だった。二人は小惑星の変光曲線を解析する標準法を確立した、いわばこの分野の権威である。彼らの方法では、多くの観測協力者のデータを集めて滑らかな変光曲線を作り、それから自転周期や高次のフーリエ係数を同時に解いて求める。

われわれはまず、生の変光曲線データを全部提出することを要求され、査読を受ける弱者の立場から不本意ながら従った。そして、彼らのプログラムによって再解析された結果、私たちが求めた自転周期の大部分は誤った意味のない数値だと決めつけられたのである。H 氏からはわざわざ、“だめデータ”の見本として彼らのデータベースに登録してやるという、レフェリー報告とは別に個人的メールまできた。小惑星変光研究の権威と目される二人に価値のないデータと宣告されれば BD でなくとも意気阻喪してやる気をなくしたのも無理はない。われわれ全員がすっかり落ち込んだ気分になり、暫くはどうして良いか判断がつかなかった。

しかし冷静になって考えてみると、彼らの主張はどうも納得がいかない。すでに述べたように、われわれの観測データの多くは滑らかで連続的な変光曲線が描けるほど測点が多くなかったため、まず周期解析 (periodogram) で主要周期だけを先に求め、それに基づき変光曲線のフーリエ係数を計算した。この方法は、少し以前まではごく一般的な変光曲線の解析方法だったのである。また、得られる自転周期の信頼性を高めるために、周期

解析では実績のある、全く独立な二つのアルゴリズムを用いてコーディングし、両者のパワースペクトルの最大値が一致した周期だけを採用した。したがって、その大半が間違った値だとは到底考えられなかった。

そこで、軌道推定のおこなったのと同様に、現実の観測を模擬したデータを多数作り、正しい自転周期がどれほどの精度で再現できるかを調べるシミュレーションを実行するしかないと決断した。種々の自転周期に対して、すばる観測の測光誤差、測点数、などを考慮した仮想データを 100 セットずつ作り、上記の独立な 2 種のプログラムで解析した。その結果、自転周期が約 7 h 以下なら、わずか 10 点という少ない不等間隔のデータでも、その 95% は 0.1 h 以下の周期誤差で決定できることが判明した¹²⁾。逆に言えば、われわれのような測点の少ないデータに対してはレフェリーたちの標準解析法は無効であり、彼らはおそらく固定観念のためにそのことを認識していなかったことも示されたわけである。

このシミュレーションの結果を強調してまとめ直した論文を別な雑誌に改めて投稿した。黙っていれば前記の二人に論文が再度送られる可能性が高かったから、上に述べた理由を編集者に説明して、二人をレフェリーとして忌避した。幸いにしてレフェリーは別人に決まり、また大幅な改訂を要求されはしたが、最終的に何とか受理・出版されることになったのである。BD が学位論文を提出してからすでに 6 年が経過していた。

(3) 高速自転小惑星の形状特性

ここでは、上記の変光曲線の解析によって明らかになった新知見を簡単に紹介する。直接的な成果の一つは、図 3 に見るように、小惑星帯小惑星の領域と地球接近小惑星の領域との間が従来は空白地帯と考えられていたが、sub-km のすばる小惑星 (▲) によって満たされたことである¹²⁾。さらに重要な点は、すばるで見つけた直径が 0.1 km < D < 2.2 km の範囲にある 68 個の小惑星のうち、

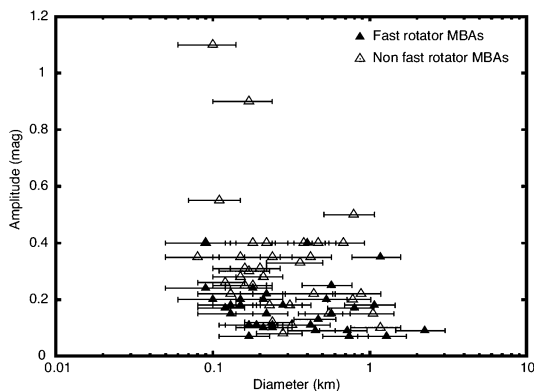


図4 高速自転小惑星 (▲) と非高速自転小惑星 (△) の変光振幅の違い¹²⁾. 横軸は直径 (km), 縦軸は振幅 (等級). ▲の方が全体として振幅が小さい(丸い)ことがわかる.

FR 小惑星が実に 49% を占めていたことである。しかもこれらの天体で最も興味深い点は、より大きな小惑星帯小惑星や地球接近小惑星に比べて、変光振幅から推定される形状が非常に球形に近かったことである(図4)。その“丸さ”の度合の平均値は際立っていて、信頼係数 99% で区間推定しても、大きな小惑星帯小惑星や地球接近小惑星の形状範囲とは全然重ならなかった¹³⁾。

このことは、小惑星帯の sub-km 天体の多くが rubble pile であることを強く示唆する。高速自転に対して rubble pile が最も安定でいられる形状は球形だからである。ただし、図3からわかるとおり、 $P_r = 0.6 \text{ h} \sim 2.2 \text{ h}$ の FR もかなりの数が存在し、それらの内部は単体の岩石ではないにしても、ある程度の引張り強度をもった状態にあることが想像される。

以上、振り返れば、わずか 1-2 晩のすばる観測データを 10 年近くもひねくり回していたことになる。それは、従来の伝統的方法では扱えないデータだったために、新たな手法を探す試行錯誤にこれほど時間がかかってしまったのが最大の理由であるが、われわれのデータにはそれだけ豊富な新情報が含まれていたということもできる。昨今のような変化が速い世の中、10 年もデータを寝

かせておけば通常は“腐って”しまう、つまりそれを超える観測結果が現れて発表する価値がなくなってしまうものだ。しかし、幸か不幸かそうならず済んだのは、われわれのサーベイ観測案が多少なりともオリジナリティをもっていたためだろうと密かに自負している。また、意地の悪い論文レフェリーには随分悩まされたが、結果的には彼らのコメントは何らかの意味で論文を良くするのに必ず役立った。論文というものは、著者だけでなくレフェリーとともに作り上げるものだとつくづく実感している。

7. 次のステップに向けて

Sub-km の小惑星帯小惑星の自転・形状特性の解明で、すばる望遠鏡による微小小惑星のサーベイ観測研究は一段落した。今後なすべきことは、得られた新知見を説明できるモデルなどを構築することであろう。そうした次のステップについて簡単に述べてこの拙稿を終わりたい。

(1) 微小小惑星の内部構造推定

図3から、小惑星帯小惑星中の sub-km の天体には、古典的な rubble pile と monolith 的小惑星との中間の状態にある天体が多数存在することが見てとれる。これは従来、monolith か rubble pile かという単純な dichotomy 的な見方に変更を迫る知見と言えよう。それらの内部がどのような構造をもつかの手がかりが今までの観測材料から何か得られないだろうか。例えば、内部応力が計算できれば、もう少し具体的な構造が推定できると期待している。

(2) 微小小惑星の低分散スペクトル観測

微小な小惑星は一般に、最近の衝突によって生じたとみなせるから、その表面は“宇宙風化”によってあまり変性していない比較的フレッシュな状態と想定される。従来の分類型である C 型、S 型などは大きな、つまり表面の古い天体の分光観測で決められた。このことから、微小小惑星では、既存の分光分類型にはあてはまらない新しいタイ

プが見つかる可能性が高い。

数年前、FYはSuprime-Cam用のグリズムフィルタとその観測データ解析方法の開発グループのメンバーである国立天文台のY氏から、太陽系小天体の観測でグリズムフィルタを使って面白い研究テーマがあるかと聞かれた。これまで述べてきたように、すばる望遠鏡で検出される小惑星の大部分はsub-kmサイズの小惑星である。そのような微小小惑星のスペクトルなど今まで観測されたことはないから、グリズムなら面白いデータセットが得られるに違いないとすぐに思った。最初に考えついたテーマは、地球上で一番多く確認されている普通コンドライトという隕石の反射スペクトルに似ているQ型小惑星を小惑星帯で探そうというものである。

地球近傍にはS型小惑星についてQ型小惑星が多い。しかし小惑星帯ではQ型小惑星はごくわずかしか見つかっていない。宇宙風化の研究によれば、Q型小惑星の表面が宇宙空間の放射などにさらされることで100万年の時間スケールでS型へと変質するとされている。つまり、現在のQ型小惑星はS型小惑星が壊れて、その内部の宇宙空間にさらされていなかった部分が露出した小惑星と考えられる。Binzelら¹⁴⁾によれば、直径5km以下の地球接近小惑星でQ型の割合が増加するらしい。一般にQ型はS型より小さいのである。S型が壊れてQ型になるのならこのサイズの違いは自然に理解できる。問題はQ型小惑星がどの場所で作られるのかということである。地球近傍では小惑星同士の衝突はそれほど頻繁ではないので、作られるとしたら小惑星帯内での衝突がもっともらしい。直径5km以下の小惑星帯小惑星のスペクトルはこれまで観測例がほとんどないから、グリズムフィルタを使って、すばる望遠鏡で微小な小惑星帯小惑星のスペクトルが得られれば、多くのQ型が小惑星帯で見つかるのではないかと考えた。

グリズムで観測可能な波長範囲は4,500–8,600

Åで、S型とQ型を見分ける際に重要な1μmの吸収帯は直接見ることができないが、7,500Åより長い波長域でのスペクトルの傾斜からおおむね判断できる。実際2009年5月にグリズムフィルタを用いてパイロット観測を行ったところ、1夜の観測から37個の小惑星の分類型を決めることができた。このうち7個が小惑星帯内のQ型と判断された。つまり、小惑星帯内でQ型小惑星の生成が行われている可能性があるということである¹⁵⁾。まだ得られたスペクトルの数が少ないので、統計的議論には早すぎるが、2010年6月にも3夜の観測時間をもらってデータが取れたし、2011年にも観測が約束されている。1回の観測で数十個のスペクトルが得られるので、近いうちにすばる小惑星の分光分類カタログをまとめることができるだろう。もし既存の分光分類型にはあてはまらない新しいスペクトルタイプが見つければ、小惑星表面の光学的特性における長期的進化に新たな知見が得られるかもしれない。

(3) 大規模サーベイ計画と超巨大望遠鏡

すばる望遠鏡にHyper Suprime-Cam (HSC)と言うSuprime-Camの約6倍の視野をもつカメラ(現在開発中)で、約2,000平方度の空を5年かけて5バンドでサーベイする計画がある。サーベイ時間のすべてで太陽系小天体検出に適した条件と天域が撮像されるわけではないけれども、相当数の太陽系小天体が見つかることは間違いない。Suprime-Camを使った経験から推測すると、黄道面付近で衝の位置に近ければ、HSCの1視野で600個以上の太陽系小天体の検出が見込まれる。同じ天域を数回に分けて撮像するので、軌道が決められる太陽系小天体も多いだろう。HSCは2012年にファーストライトが予定されているが、HSCサーベイが始まれば、これまででないペースで微小小惑星のデータが蓄積されることになるだろう。軌道決定できていれば、この大規模サーベイで見つかる面白い天体、例えば衛星系をもつ小惑星や彗星活動らしきものが見られる天体、超

楕円軌道をもつような天体などは、次世代の超巨大望遠鏡の良いターゲットになるだろう。

現在、欧米・日本では口径 30–50 m 望遠鏡（例えば、TMT）の実現に向けた計画が進捗している。もしこうした超巨大望遠鏡が微小小惑星の探査に利用できるなら、次に述べるようなもう一つの重要なテーマの研究が可能になるだろう。すばる望遠鏡が sub-km 小惑星の基本特性を明らかにしたように、30–50 m 望遠鏡では直径 100 m 以下 (sub-hectometer) の小惑星に迫ることができる。一方、地表で隕石として採取される天体が大気圏に突入する直前の平均サイズは 10–30 m 位と推定されている。とすれば、30–50 m 望遠鏡では、隕石の大気圏突入前の姿を小惑星帯の中で“直接”観測することが可能になる。これらの天体と、地球接近小惑星および隕石との測光・分光特性を比較すれば、前者が後者に軌道進化する途中での物理的変性の過程が明らかにできるだろう。

微小小惑星の統計的な分光・測光特性に興味をもつ若い研究者/研究者の卵の参加を歓迎したい。

参考文献

- 1) 平山清次, 1935, 『小惑星』(岩波全書)
- 2) 中村 士, 1997, 第 29 回天体力学研究会集録, 274
- 3) Yoshida F., Nakamura T., Fuse T., Komiyama Y., Yagi M., Miyazaki S., Okamura S., Ouchi M., Miyazaki M., 2001, PASJ 53, L13
- 4) Nakamura T., Yoshida F., 2002, PASJ 54, 1079
- 5) 渡辺敏夫, 1953, 東京商船大学紀要, No. 4, Ser. A, 195
- 6) Yoshida F., Nakamura T., Watanabe J., Kinoshita D., Yamamoto N., Fuse T., 2003, PASJ 55, 701
- 7) Yoshida F., Nakamura T., 2004, Advances in Space Research 33, 1543
- 8) Yoshida F., Nakamura T., 2007, Planetary and Space Science 55, 1113
- 9) Yoshida F., Nakamura T., 2005, AJ 130, 2900

- 10) Yoshida F., Nakamura T., 2008, PASJ 60, 297
- 11) Nakamura T., Yoshida F., 2008, PASJ 60, 293
- 12) Dermawan B., Nakamura T., Yoshida F., 2011, PASJ 63, S555–S576
- 13) Nakamura T., Dermawan B., Yoshida F., 2011, PASJ 63, S577–S584
- 14) Binzel R. P., et al., 2004, Icarus 170, 259
- 15) Yoshida F., Yagi M., Komiyama Y., Nakata F., Furusawa H., Ohno T., Okamura S., Nakamura T., 2010, accepted to Advances in Geosciences
- 16) Wiegert P., et al., 2007, AJ 133, 1609

Ten Years of Observational Statistics of Sub-km-Sized Asteroids with Subaru Telescope

Tsuko NAKAMURA

Teikyo-Heisei University, 2-51-4 Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 170-0013, Japan

Fumi YOSHIDA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 1818-8588, Japan

Abstract: Using the wide-field CCD camera of Subaru telescope, we revealed for the first time statistical nature of sub-km-sized main-belt asteroids and Jovian Trojans that had been unexplored before. New findings are reported on the size distributions of those objects, the taxonomic types, L4/L5 population asymmetry of Trojans, and the discovery of fast rotators ($P_r < 2.2$ h). Emphasis is given to the initial motivation of this research, and description of trial-and-error processes in developing new analysis approaches. Future prospects in observations of such faint asteroids are also discussed.