

見えてきた微小小惑星

吉 田 二 美

〈国立中央大学 台湾桃園縣中壢市五權里 38 號〉

e-mail: fumiya@astro.ncu.edu.tw

中 村 士

〈国立天文台天文情報公開センター新天体情報室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: tsuko@cc.nao.ac.jp

私達はすばる望遠鏡を使って小惑星帯にある地球接近小惑星サイズの非常に小さい小惑星を観測し、それらのサイズ分布と空間分布を調べました。その結果、私達の調べた小さい小惑星の分布はこれまで知られていた大きな小惑星の分布とは大幅に異なることがわかりました。このことは小惑星帯の構造、力学的進化、物質分布等の研究に大きな足がかりを与えそうです。

1. はじめに

近年のリンカン地球接近小惑星探査プロジェクト (MIT) やスペースウォッチサーベイ (アリゾナ大) で地球軌道付近に約 1000 個の小惑星がいることがわかりました。地球接近小惑星 (地球に接近する軌道をもつ小惑星をこう呼びます。) の研究は、小惑星の地球衝突の可能性の見積もりや小惑星探査のターゲットとして重要で、それらの正確な軌道、大きさ、物質組成などを調べることに今多くの科学者が関心を寄せています。

地球接近小惑星は小惑星帯からやって来ると言われています。小惑星帯の小惑星はかなり長い間安定した軌道にいますが、小惑星帯で起こる小惑星同士の衝突や、Yarkovsky (ヤルコフスキー) 効果と呼ばれる微弱な力が引きがねとなって、おもに木星の重力によって徐々に軌道が変わることがあります。こうして軌道の変えられた小惑星の

一群が小惑星帯を飛び出し、地球付近に運ばれてくるのです。

地球接近小惑星の大部分は 1 km 以下の小さな暗い天体で観測は容易ではありません。地球から観測する場合、それらは一般に望遠鏡で追尾するのが大変なくらい、非常に速い相対速度で地球付近を通り過ぎます。また地球接近小惑星が小惑星帯から放り出される際には様々な方向に送り出されるので、地球付近でそれらの軌道は全天に広がってしまいます。そのため、たまたま地球から観測しやすい位置関係にある 1 個 1 個の地球接近小惑星しか観測することができず、系統的な観測が難しいのです。それでは、地球接近小惑星が飛ばされてくる前に、小惑星帯にいる地球接近小惑星を観測してはどうでしょう。小惑星帯にいる地球接近小惑星の源は望遠鏡の 1 つの観測視野にたくさん捕らえることができます。その理由は、例えば、あなたが都心にいて、立ち並ぶビル群を望遠鏡を使って観察す

るとしましょう。あなたは望遠鏡をいろんな方向に向けなければ全体を見ることはできません。しかし少し都心から離れた所からビル群を観察するとどうでしょう。望遠鏡の1視野に都心のビル群はすっぽりと収まっています。これと同じ原理です。

そういうわけで、私達は小惑星帯に望遠鏡を向け、地球に接近する前の地球接近小惑星の姿を研究することにしました。

2. 膨大な星と銀河の中から微小小惑星を拾う

中小口径の望遠鏡では小惑星帯にある地球接近小惑星サイズ（以下微小小惑星と呼びます）の天体は見えません。例えば小惑星帯にいる直径 500 m の小惑星を見るには約 24 等まで観測可能な大望遠鏡、つまり、すばる望遠鏡が必要です。一度にたくさんの微小小惑星を観測するには広視野がカバーできる CCD カメラ Suprime-Cam が必要です。私達は国立天文台の渡部潤一助教授率いるカイパーベルト天体捜索チームの協力を得て、彼らが取ったデータ（前号の特集「太陽系の果てを探る」参照）に地球接近小惑星サイズの微小小惑星帯小惑星を探しました。ただし私達の検出では観測時に利用可能だった9個の CCD チップすべてを使ったので、全調査面積は前号の特集と比べて 2.97 平方度と、少し広がっています。また小惑星帯小惑星の検出限界は 24.4 等（R-バンド）でした。

最近の大型サーベイプロジェクト（例：スローン・デジタル・スカイサーベイやリンカン地球接近小惑星探査プロジェクト等）では小惑星や彗星のような移動天体検出に自動検出プログラムが使われます。これはデータ量が膨大であるためと、地球接近小惑星の正確な軌道を決める追跡観測のために移動天体の検出をほぼリアルタイムで行う必要があるか

らです。これらのデータは短時間露出（1分かそれ以下）なので移動天体は恒星と同じく点像に写ります。自動検出プログラムは単に画像中に時間と共に (x, y) 座標が変化する点を移動天体として検出します。ところが、長時間露出（私達のデータでは7分）の場合は、露出中に移動天体は移動し、それらはもはや点像ではなく、長く伸びた像に写ります。しかも高速で動く近くの天体は長い棒状に、小惑星帯付近の天体は楕円状に、もっと遠くの天体はほぼ点状にと、天体の移動速度によって像形が違います。さらにこれらの天体はあらゆる向きに動きます。そのため移動天体検出プログラムのアルゴリズムはあっという間に複雑で、誤検出も多くなります。試行錯誤の結果、私達は自動検出を止めて、写真乾板の時代にやっていたように人の目で検出することにしました。この方法が（注意深く行いさえすれば）誤検出が最も少なく、確実に移動天体を背景の恒星や銀河の中から拾い出せたのです。私達の工夫は移動天体が写っている同一視野の画像の合成画像を作るというただ一点です。

連続して撮った同一視野の画像をボジ、ネガ、ボジ…と交互に重ねて合成画像を作ります。画像合成の際に各画像のスカイレベルをほぼ同じ値に調整して、出来上がった合成画像の S/N 比が悪くなるのを防ぎます。合成画像上で移動天体は図1のように黒、白、黒…の点として見えます。この3個1組、または11個1組の白黒の点が1個の移動天体です。

この検出方法は移動天体と形の良く似た楕円銀河を一目で区別することができます。Suprime-Cam の画像のように非常に暗い天体まで写っている画像では背景のかかなりの部分が恒星・銀河で埋まっています。移動天体はしばしば恒星・銀河に全体が、あるいは部分的に重なってしまいます。このとき移動天体

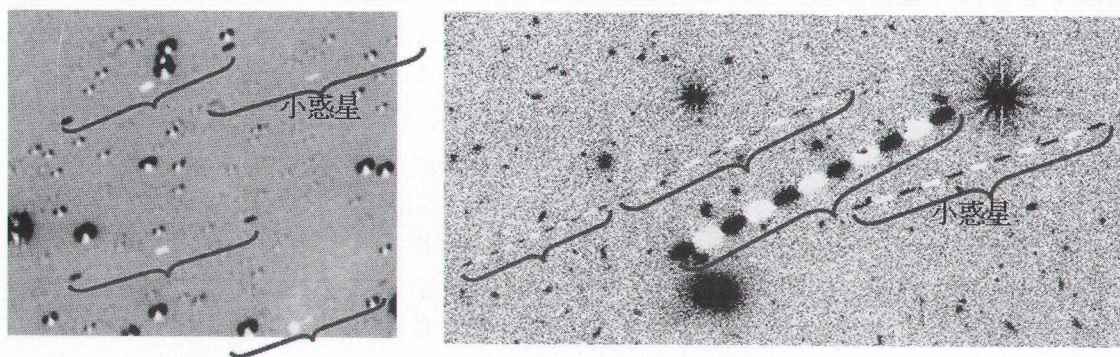


図1 左；1時間間隔で3回撮像した画像の合成画像の一部，右；11枚連続撮像した画像の合成画像一部．どの小惑星も観測期間は約2時間．

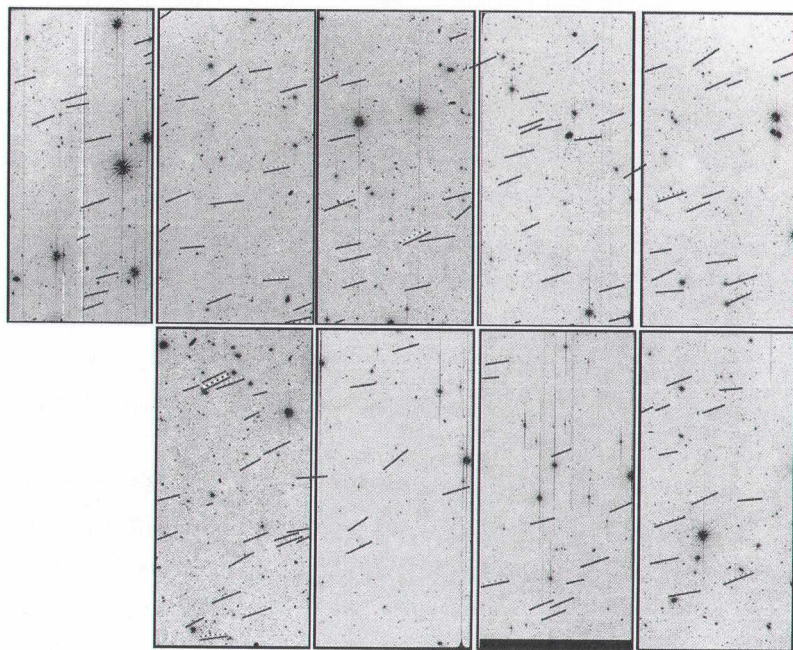


図2 Suprime-Cam の1視野に写った約100個の移動天体．1視野は10個のCCDチップからなるが，左下のCCDチップは壊れているためデータが欠けている．図の上が北，左が東．小惑星は左側から右側へ移動する．黄道は図の左下から右上に通っている．ほとんどの移動天体が黄道に沿って動いているのがわかる．

と恒星・銀河が同じ色ならば区別できませんが，ネガ，ポジで重ねれば，恒星・銀河はすべて黒いイメージであるのに対し，移動天体は白いイメージを含みます．私たちは白いイメージを見るとすぐに，それは移動天体だとわかるのです．図1の左は1時間おきに露出した3枚の画像を合成したものです．望遠鏡のガイドエラーのために，動かないはずの恒星・銀河のイメージがわずかにずれています

が，このずれを重ねる必要はありません．この方が画像の端にただ1個だけ写っている移動天体を見つけるのに好都合だからです．一つ一つの恒星・銀河のイメージは黒白黒の重なったイメージですが，移動天体は白または黒の単色のイメージなので，単色イメージのものはすぐに移動天体だとわかるからです．また白黒で色分けすることにより，撮られた画像の時系列もわかります．合成画像では白

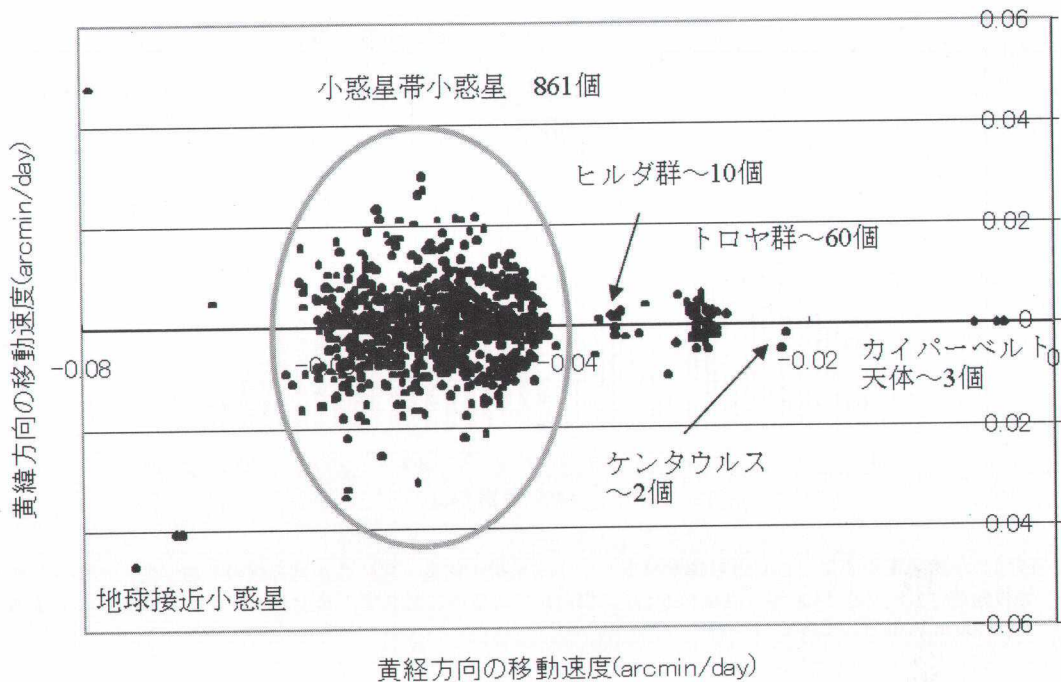


図3 検出された移動天体の移動速度分布と各小惑星グループの検出数。

いイメージは必ず2番目に撮られた画像のイメージです。すべての移動天体が、図上で左手から右手へ（東→西）動いていきますので、合成画像上で画像の時系列が読み取れば、画像の端に写っている移動天体が次の露出で隣の CCD チップに移動したのか、前の露出で同じ CCD チップ上の恒星・銀河と重なっていたために見えないのかを判断できます。ただしここで述べた私達の方法ではほとんど動かない天体の検出はうまくいきません。そのため、図3で示したカイパーベルト天体の発見数が前号の「太陽系の果てを探る」で述べられた数と違っていています。目的の天体に応じて検出方法を変える必要があるのです。

以上のように単純ながらも様々な利点の含まれた合成画像を使って、私達は1,111個の移動天体を発見しました。図2に Suprime-Cam の1視野に写った移動天体を黒いラインで示しました。こんなふうに1視野におよそ

100個！もの移動天体が写ります。100個の小惑星をまとめて観測できるなんて、夢のようではありませんか。既知の小惑星のデータベースで調べたところ、私達の見つけた移動天体のうち、約60個が既知の小惑星、他はすべて新発見の小惑星でした！！

各移動天体の移動速度を測り、それらを黄経・黄緯方向の動きに分けてプロットしたものが図3です。各天体の移動速度によっていくつかのグループに分かれます。小惑星帯小惑星は861個見つかりました。他にヒルダ群、トロヤ群、ケンタウルス、カイパーベルト天体が検出されました。もちろん地球接近小惑星も写っていました。がしかし、それらは速い移動速度のために長い棒状に写るので、ほとんどが背景の恒星・銀河に部分的に重なってしまい、明るさが測定できた地球接近小惑星はほとんどありませんでした。

さて、観測で得られた画像から小惑星の位

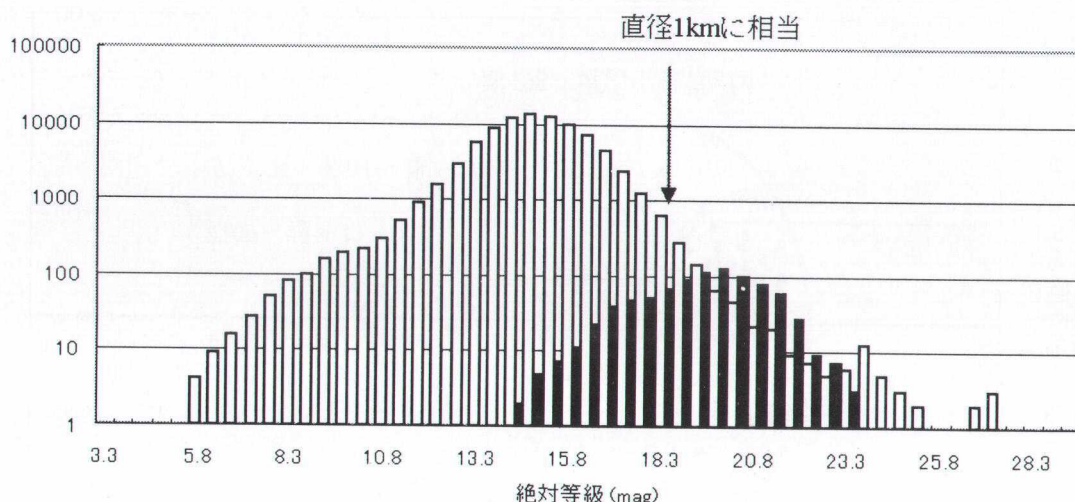


図4 既知の小惑星帯小惑星（白）と私達が検出した小惑星帯小惑星（黒）の絶対等級の分布。既知の小惑星で絶対等級分布のピークが14.8等（直径約5 kmに相当）であるのに対して、私達が検出した小惑星では19.8等（直径約500 mに相当）である。

置と明るさを測った後は、この2つの情報から、太陽から小惑星までの距離と小惑星の絶対等級（小惑星を地球を基点に太陽とちょうど反対側、太陽から1 AUの距離においた時の明るさ）が計算できます。さらに小惑星の表面反射率がわかれば、絶対等級を大きさに直すことができます。これらの小惑星の大きさはどれくらいでしょうか？ せっかくすばる望遠鏡を使ったのですから、ごくごく小さい小惑星まで見えていなければ意味がありません。小惑星帯で地球接近小惑星サイズの小惑星はちゃんと見えているのでしょうか？ 図4はこれまでに知られている小惑星帯小惑星と私達が見つけた小惑星の明るさの分布を比べたものです。直径1 kmの矢印より右側が私達が地球接近小惑星サイズと言っている小惑星です。私達のデータの861個中約80%が1 kmより小さい小惑星でした（図4の縦軸が対数表示になっていることに注意してください）。すばる望遠鏡は私達の目指した微小小惑星をちゃんと捕らえていました。

私達が見つけた小惑星の中で最も明るいものは13.2等、最も暗い小惑星は23.0等でした。これらの明るさを大きさに直すと約10 kmから約100 mサイズの小惑星に相当します。

3. 小惑星帯の中での微小小惑星のふるまい

小惑星帯の中で私達の検出した微小小惑星がどのようにふるまうのか、それらのサイズ分布と空間分布の観点から調べてみました。

(1) サイズ分布から調べる

現在観測される小惑星はもっと大きな微小惑星が壊れてできたという考え方が普通です。そのため小惑星のサイズ分布は、太陽系における天体の衝突進化を反映すると考えられ、隕石や地球接近小惑星の数の見積もりや内惑星のクレーター形成率などのための基礎データとなります。さらに、小惑星の衝突破壊・集積過程や小惑星帯の初期質

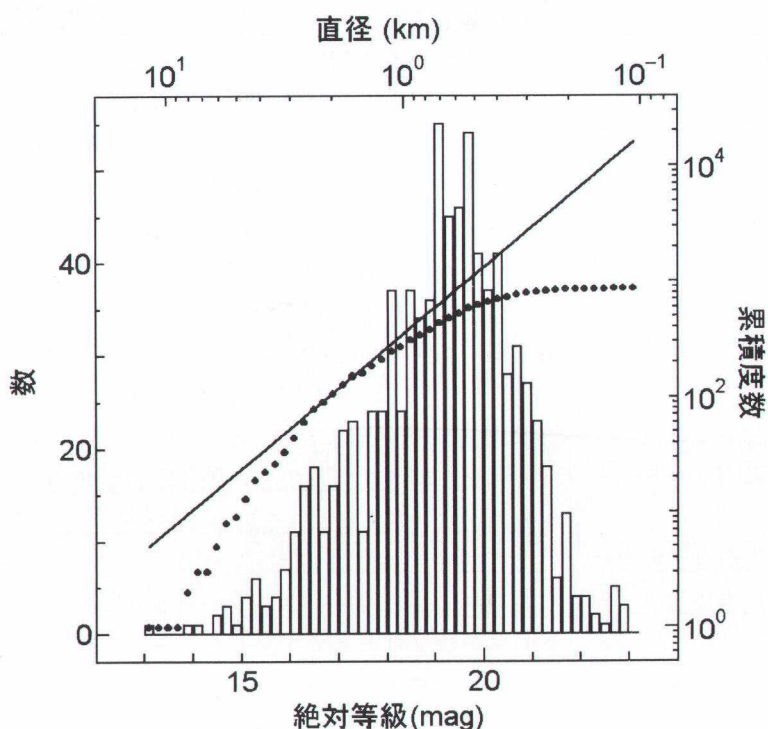


図5 検出された861個の小惑星帯小惑星のサイズ分布（絶対等級分布）。棒グラフはある絶対等級をもつ小惑星の数，黒点はある絶対等級より明るい小惑星の数を足し合わせた累積度数を表す。実線はパロマー・ライデンサーベイとスペースウォッチ・サーベイで得られたサイズ分布のべき指数（ ~ 1.75 ）と比較するために描いた。

量を推測するための手がかりともなります。このような観点から小惑星のサイズ分布はこれまでに何度か調べられてきました。ヤーキス・マクドナルドサーベイ¹⁾、パロマー・ライデンサーベイ²⁾、スペースウォッチサーベイ³⁾、スローン・デジタル・スカイサーベイ⁴⁾などがあげられます。これらのサーベイでは中小口径の望遠鏡が使われたため、直径およそ1 kmより大きい小惑星しか検出できませんでした。小惑星のサイズ分布は累積度数（ある大きさより大きい小惑星の数を足し合わせた数）の形で表した時に、簡単なべき乗分布と良く一致することが経験的に知られています。そのため小惑星のサイズ分布は、ふつうべき乗分布のべき指数の値で議論されます。例えばパロマー・ライデンサーベイではそのべき指数は約1.8でした。ある大きさの小惑星に対してそれより小さい小惑星の数が多い

ほどこのべき指数の値は大きくなります。

図5は私達が見つけた861個の小惑星帯小惑星のサイズ分布（絶対等級分布）です。絶対等級に対応する直径は上辺に示しました。棒グラフがある大きさ（または絶対等級）をもつ小惑星の数，黒点がある大きさより明るい小惑星の累積度数を表します。実線はパロマー・ライデンサーベイとスペースウォッチ・サーベイが数kmより大きい小惑星帯小惑星に対して求めた累積サイズ分布です。この直線の傾きが急なほど累積サイズ分布のべき指数が大きいということです。私達が検出した直径0.5 km～1 kmの小惑星では累積サイズ分布のべき指数は約1.2になり、パロマー・ライデンサーベイの結果と比べてずいぶん低い値になりました。具体的には、例えば、パロマー・ライデンサーベイでも私達のデータでも直径が1 kmより大きい小惑星が100個

あったとしましょう。パロマー・ライデンサーベイの結果から予想される一桁小さい直径0.1 km までの小惑星の数は約 6,300 個ですが、私達の結果では約 1,580 個しかないということになります。つまり私達の観測結果は小惑星帯では地球接近小惑星サイズの小惑星が予想より大幅に少ないことを示しているのです。

微小小惑星の数が少ないとはどういうわけでしょうか？ 小惑星は天体が衝突で壊れた破片です。そう、微小小惑星が少ないと言うことは、つまり、小さい衝突破片の数がこれまでの衝突理論で予想された数ほど多くないということなのです。このことを説明できそうな3つの理論があります。

(1) 大きい小惑星は小さい衝突破片が自己重力により結合した「rubble piles (破片集積体)」構造である。

つまり、衝突で生じた微小小惑星（小さい衝突破片）は大きな小惑星の表面に瓦礫の山のように積み重なった状態にいるので、見えないのだというわけです。最近の衝突理論や数値実験は半径数百 m 以上の小惑星では、衝突時に破片を散乱させるエネルギーより、いくつもの破片に分割するエネルギーの方が小さいことを示しています（逆にごく小さい小惑星は物質強度が強いため、それ以上細かく壊れにくいのです。）。このことは数百 m より大きい小惑星の多くは単体の小惑星ではなく、rubble piles であることを予想します⁵⁾。実際に、探査機による探査やレーダーによる観測で小惑星 Mathilde や Kleopatra が非常に低密度な小惑星であることがわかりました。このことは破片が緩く集積している小惑星の姿を示す証拠とされています。

(2) 小さい小惑星は Yarkovsky 効果によりカーウッドギャップに送り込まれ、小惑星帯から取り除かれた。

Yarkovsky 効果と言うのは、小惑星が吸収

した太陽放射を再放出する際にすべての方向に等しくエネルギーを放出するのではなく、小惑星表面の温度ムラのために非等方に放出することが原因で生じる効果のことです。非常に微弱な効果ですが、長期間にわたって少しずつ、小惑星を太陽方向に向かって落したり、反対側へ退けたりするように働きます。どちらに動くかは小惑星の自転の向きによります。この効果は平均半径が 10 ~ 100m の小さい小惑星に特に有効なので⁶⁾、微小小惑星だけを小惑星帯から取り除くことができます。

(3) 衝突時に生じた小さい破片が母天体の脱出速度を超える大きな放出速度を獲得し、小惑星帯から投げ出される。

これは小惑星を小惑星帯から取り除く最も単純なプロセスです。しかし多くの衝突理論と実験が、衝突で獲得された速度だけで母天体の脱出速度を超える高速度破片が生じるのは難しいことを示しています。

私達の「微小小惑星が少ない」という結果から上記3理論のどれが正しいかを示すことはできません。どれか一つが正しいのではなくて、いくつかのプロセスが交じり合っているかもしれないし、小惑星帯の異なる領域で異なるメカニズムが作用するのかもしれません。例えば Yarkovsky 効果は太陽で暖められやすい小惑星帯の内側で良く効きそうに思われます。現時点で言えることは、私達の結果は上記いずれの理論とも矛盾しないということです。

(2) 空間分布から調べる

地球接近小惑星が小惑星帯から飛び出すにはまずカーウッドギャップと呼ばれる領域に入り込まなければなりません。木星の公転周期の簡単な分数で表される公転周期をもつ小惑星の軌道は、木星の重量によ

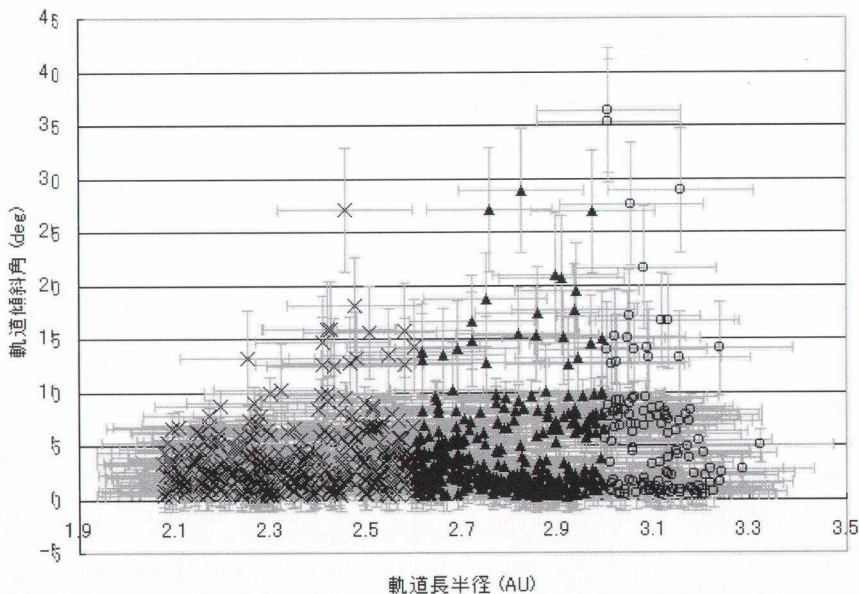


図6 私達が検出した小惑星の軌道長半径と軌道傾斜角の分布。

る影響を規則的に受けます。例えば、木星が1公転する間にちょうど2公転するような小惑星は2公転に1回の割合で、木星の重力の影響を強く受けます。このような軌道を持つ小惑星は少しずつ楕円形の軌道に変えられ、小惑星帯から外れてしまうのです。ですから、木星の公転周期の簡単な整数比で表される公転周期をもつ小惑星はほとんど存在しません。ケプラーの第3法則から公転周期は小惑星の軌道長半径と関係しています。小惑星の軌道長半径の分布を描いたときに存在しない小惑星の領域がギャップとして見え、このギャップは発見したダニエル・カークウッドにちなんでカークウッドギャップと呼ばれます。カークウッドギャップは小惑星を小惑星帯から飛ばすカタパルトのようなものののです。

大きな小惑星では太陽から2.5, 2.8, 3.0 AU付近に大きなカークウッドギャップがあることが知られています。では私達が検出した微小小惑星ではどうでしょうか。図6に私

達が検出した小惑星の軌道長半径と軌道傾斜角（黄道面に対する小惑星の軌道の傾き）の分布を示しました。小惑星の観測期間が短くて軌道誤差が大きいためかカークウッドギャップは見えません。その代わり、大きな小惑星でギャップになっている2.5, 2.8, 3.0 AU付近に軌道傾斜角の大きい小惑星がいくつか見られました。カークウッドギャップに入った小惑星の軌道離心率や軌道傾斜角は増大する傾向があるので、図6の2.5, 2.8, 3.0 AU付近の軌道傾斜角の大きい小惑星は小惑星帯の外へまさに飛ばされようとしている小惑星かもしれません。

4. さて次は…

以上の結果は黄道面付近のわずかな平方度という非常に狭い領域の観測に基づいたものです。私達の得た結論を小惑星帯全体に適用するには、別の日に別の視野で同様の観測を行って今回の結果を再確認する必要があるで

しょう。しかし今のところ、私達の結果と他の小惑星サーベイの結果から、微小小惑星（直径0.5～1 km）の数がこれまでの予想より少ないということはかなりの精度で言えます^{7), 8)}。

またここでは触れませんでしたでしたが、私達は検出した小惑星帯小惑星を小惑星帯の内側、中央、外側に分け、各領域別にサイズ分布を調べてみました。そうすると、どうも小惑星帯の内側ではべき指数が高く、外側では低そのようなのです。

小惑星帯では場所によって異なるタイプの小惑星が存在することがこれまでに知られています。すなわち、内側にはS-typeと呼ばれる石質隕石に似た小惑星が、外側にはC-typeと呼ばれる炭素質コンドライトに似た小惑星が多く存在します。異なる物質間での衝突結果が異なるサイズ分布をもたらしても不思議はありません。小惑星帯の内側と外側のサイズ分布の違いは、S-type小惑星とC-type小惑星で衝突破壊メカニズムが異なることを反映するのかもしれませんが。これを確認するにはS-, C-type小惑星を区別してそれぞれサイズ分布を求める必要があります。それは多色測光観測で可能です。S-, C-type小惑星のカラーは $(V-R)=0.45$ 、または $(B-V)=0.75$ を境にはっきり分かれるからです。私達はこの観測をすでに実施し、現在データ解析中です。結果はまもなく報告できと思っています。

参考文献

- 1) Kuiper G. P., Fujita Y., Gehrels I., Groeneveld J. K., Van Biesbroeck G., Van Houten C. J., 1958, ApJS, 3, 289.
- 2) Van Houten C. J., Van Houten G. I., Herget P., Gehrels T., 1970, A&AS 2, 339
- 3) Jedicke R., Metcalfe T. S., 1998, Icarus, 131, 245
- 4) Ivezić Z., and 31 colleagues (for THE SDSS COLLABORATION) 2001, AJ, 122, 2749
- 5) Melosh H. J., Ryan E. V., 1997, Icaurs, 129, 562
- 6) Farinella P., Vokrouhlicky D., 1999, Science, 283, 1507
- 7) Yoshida F., Nakamura T., Fuse T., Komiyama Y., Yagi M., Miyazaki S., Okamura S., Ouchi M., Miyazaki M., 2001, PASJ, 53, L13
- 8) Yoshida F., Nakamura T., Watanabe J., Kinoshita D., Yamamoto N., Fuse T., 2002, PASJ submitted.

Very Small Main-Belt Asteroids

Fumi YOSHIDA

Graduate Institute of Astronomy, National Central University, Chung Li 320, Taiwan

Tsuko NAKAMURA

National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

Abstract: We observed many small main-belt asteroids by the SUBARU telescope and then examined their size and spatial distributions. We found that the distributions are quite different between small main-belt asteroids and large ones. Our result seems to give a substantial progress on the researches of the structure of the main-belt, dynamical evolutions of asteroids, and the material distribution in the main-belt region.