

小惑星の空間分布とサイズ分布

石 田 蕙 一*・三 上 孝 雄*

1. 小惑星は太陽系のおちこぼれ

太陽をめぐる惑星達の軌道は、一枚の円板内にあって運動は皆反時計廻りで、ほぼ円を描き、その大きさは規則的で、ボーデの法則によって表わされた。ただし、その中にひとつだけ空席があった。そこに小惑星が発見されることになる。最初に発見された(第)1(号)セレスは、衝においても7.6等で、直ぐ内側の火星や外側の木星などに比べて、惑星と呼ぶには少々暗過ぎた。一方では、この空席にその後、2パラス(8.6等)、3ジュノー(9.7)、4ベスタ(6.8)、等々と発見が相次ぎ、写真撮影による観測がはじまった1891年以後、更に小惑星の研究が脚光を浴びるようになった1970年以降と、その数は増加の一途をたどっている。

軌道要素の確定した小惑星は、1981年8月1日で2436番を数え、最近は年に数%の割合で増加していて、まだまだ、小惑星のすべてが見えてきたというには、ほど遠い状態である。小惑星の登録される順番としては、ど

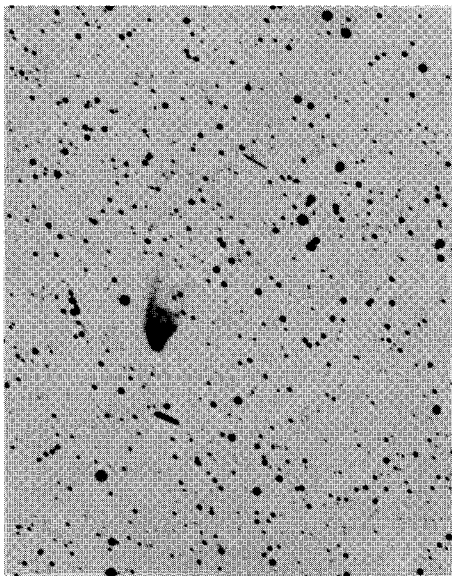


図 1 二つの小惑星が、変光星雲 (R MON) の南と北北東にそれぞれ細長い光跡を描いている。木曾観測所 105 cm シュミット撮影。

ちらかといえば、直径が大きい、地球からの距離が近い、反射率が高い、あるいは特異軌道をもっているなどの理由でたまたま充分な観測が行われて軌道要素が確定したことによる。更に、直径や反射率の測定は、それらの小惑星の中から選び出して行われている。つまり、現在までに知られている小惑星は、必ずしも、すべての小惑星の中から公平な基準で選び出されたとはいえない。

ところで、小惑星は主として、ボーデの法則の空席に分布していることから、実は太陽系ができあがる最終過程で起った攪乱のために、一人前の惑星に成長することのできなかった落ちこぼれではなからうかということが示唆されている(天文月報, 1977年1月号, 林忠四郎, 1979年1~2月, 中沢清)。もしそうなら、小惑星は惑星となるはずだった素材の一部分を私達の前にばらばらのままに見せてくれていることになる。

このようなことから、小惑星の全体像を知ることは太陽系形成の初期の状況を知るために意義のあることと考えられる。太陽系における小惑星の空間密度分布、直径の大きさの頻度分布、表面の反射率や色、スペクトルなどの性質、といったことについて全体的知識を得るには、選択基準のはっきりした資料に照らして推理を進めることが必要である。

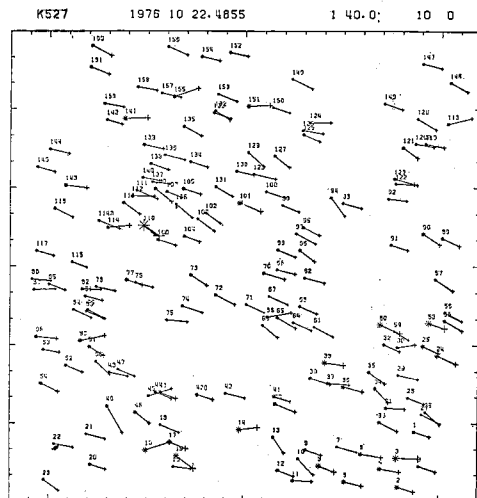


図 2 黄道帯のうお座付近が対日点になっている頃に検出された小惑星とその移動ベクトル。写野は $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ 。(香西・古川)

* 東京天文台 Keiichi Ishida and Takao Mikami: Statistical Study of Asteroids

2. 掃天観測で公平なサンプルを

選択基準のはっきりした小惑星の資料を得るという目的で過去2回、計画的な掃天観測が行われた。1つは、カイパー、藤田良雄、ゲーレルス、グロネベルド、ケント、ファン・ピースブロッグ、ファン・ホーテンの連名で発表されたマクドナルド掃天観測 (MDS 1958) である。テキサスのマクドナルド天文台が未だシカゴのヤーキス天文台の姉妹天文台だった頃、口径 25 cm の望遠鏡を据え付けて、対日点を中心に黄道帯 14400 平方度を 1950~1952 の3年間にわたって撮りつけて 2400 枚の乾板から 16 等までの小惑星を約 1600 個検出したものである。

もう1つは、ファン・ホーテン、ファン・ホーテン・グロネベルド、ハーゲット、ゲーレルスの連名で発表されているパロマー・ライデン掃天観測 (PLS 1970) である。パロマー山の口径 122 cm シュミットで、約 216 平方度を撮影して、20 等までの小惑星を約 2000 個検出している。

これら2つの掃天観測は、それぞれ特定の望遠鏡を用いて短期間に一定の方法で観測・検出を行なっているので、限界等級が比較的是っきりしている。両掃天観測では限界等級に大きな差があるのに対して、検出数がほぼ同じになっている。これは撮影した空の面積に数十倍のちがいがあからである。さて、小惑星の数は暗くなる程多くなっている。ある見かけの等級より明るい星の数を積算数ということにして、その見かけの等級の関数として積算数をあらわして積算数関数と呼ぶことにする。MDS と PLS の両掃天観測の小惑星の積算数関数を見ると、観測的に信頼のおける等級の範囲では、1等級毎に数がいずれも約3倍近くになっている。

MDS の限界等級近く 14~16 等では、PLS の小惑星はわずか 12 個であったので MDS と PLS の資料をあわせて、全天における 10 等から 20 等にわたる一貫した積算数関数を知ることができると考えられた。掃天した空の面積を考慮して積算数に適当な倍数をかけて整合性が得られるかどうか調べられた。残念ながら、積算数関数は MDS の限界等級の近く 14~16 等級でたまたま指数勾配が緩やかになっているのか、それとも指数勾配は一定であるにも拘らず PLS (または MDS) の積算数を全天の値に校正する倍数に見積りちがいがあからのか、いずれかということで意見の分れるところとなった。

その点について、木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡を用いて香西・古川等によって行われている小惑星の掃天観測 (KSS) は答を出したようである。この掃天観測では、約 2000 平方度の面積に、19 等までの小惑星を約 2600 個検出して、いわば MDS と PLS の接ぎ目

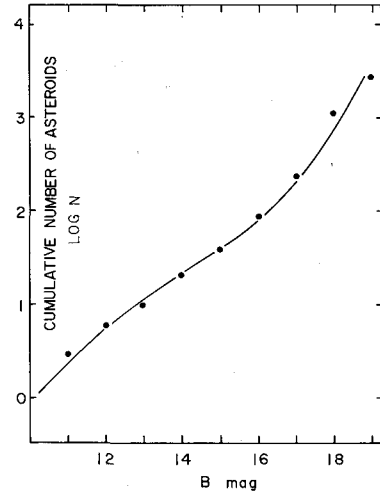


図3 小惑星の積算数関数。横軸に見かけの等級をとり、縦軸にそれより明るい小惑星の数の対数をあらわしてある。木曾シュミット掃天による値を黒丸で、モデル計算の結果を実線で示した。

のあたりの等級の積算数関数の指数勾配を明らかにすることになった。木曾シュミット掃天観測による積算数関数を対数グラフにして見ると、なるほど 14~16 等のあたりで指数勾配が緩くなっていることがわかった。つまり、14 等から 15 等になるところで積算数は約2倍になっているに過ぎないが、16 等から 17 等になるところでは約3倍の急勾配になって、明らかに指数勾配が変わっている (図3)。

こうして、3つの掃天観測によって、小惑星の積算数

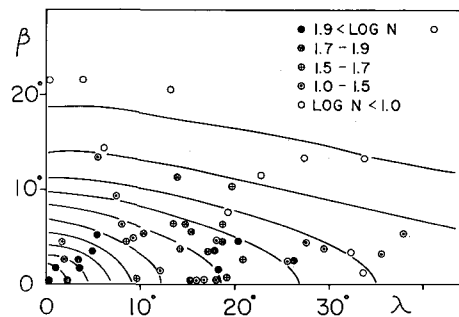


図4 地球上における小惑星の見かけの数分布を、モデル計算で、19等までの積算数関数として求めた。原点を対日点として、黄道座標がとってある。log Nは、6°×6°の観測視野で検出された小惑星の数。曲線は、モデル計算による log N を等高線であらわしたもので、対日点の近くに向かって、1.0, 1.3, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.85, 1.9, 1.95, 2.0 に対応している。

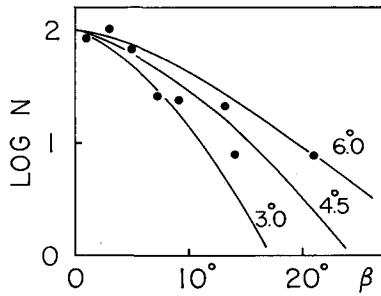


図5 天球上の対日点付近で、黄緯に沿った小惑星の数分布。黒丸は木曾シュミット掃天、実線はモデル計算。

関数の指数勾配は、10~14等で急勾配、14~16等で緩くなって、16~20等で再び急になっていることがわかったのである。木曾シュミット掃天観測 (KSS) から積算数関数と共に、天球上における対日点に対する数密度分布 (図4) も得られた。我々が直接に観測から知ることのできる限られた数の小惑星に関する空間密度分布 (図6等)、直径の大きさの頻度分布 (図11)、表面の反射率などの知識が正しく小惑星の全体像をあらわしているならば、それらを用いた計算によって見かけの等級の積算数関数や天球上の対日点に対する見かけの分布を再現できる筈である。

3. 小惑星の空間分布

小惑星の軌道の半長径は、2.2 AU から 3.3 AU の間に圧倒的に多く分布しているのでそこは小惑星帯と呼ばれる (図6 下)。その小惑星帯の中では、木星の公転周期との間に尽数関係 (1/3, 2/5, 3/7, 等) にある軌道をさける傾向がある。小惑星帯の両端もまた尽数関係 (1/4) と (1/2) に対応している。小惑星の軌道の天体力学的解説は、天文月報 1978年1~4月 (古在由秀: やさしい天文学シリーズ) によっている。しかし、実際にある日ある時に小惑星帯を眺めたとしたら、もっと内側にも外側にも小惑星はぼんやりと拡って分布している。軌道の形が円ではなく離心率 e が平均 0.15 位の楕円だからである (図7)。そのことを考慮して日心距離に対する小惑星の分布を百分率で描いて見ると図6上のように日心距離 2.6 AU を中心に滑めらかな曲線分布が得られる。中心に対して数が半分になる 2.1 AU と 3.2 AU は小惑星帯の両端によく一致している。

小惑星の見かけの明るさは、地球と小惑星の距離 Δ と小惑星の日心距離 r によって変わる。対日点の方向で、小惑星帯の内端と外端で 2.3 等の差がでる。対日点から離れると、 Δ が大きくなることと、反射の位相角が大きくなるために、みかけ上暗くなる。 Δ の差による影響

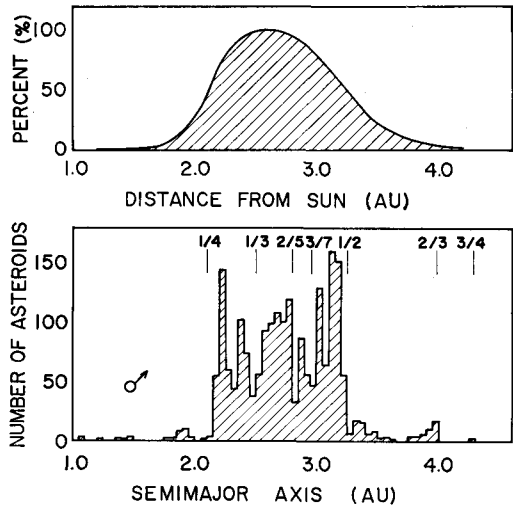


図6 軌道半長径のひん度分布(下)と、小惑星の日心距離に対する存在確率分布(上)。上図は図7のような軌道離心率を考慮して得られた。

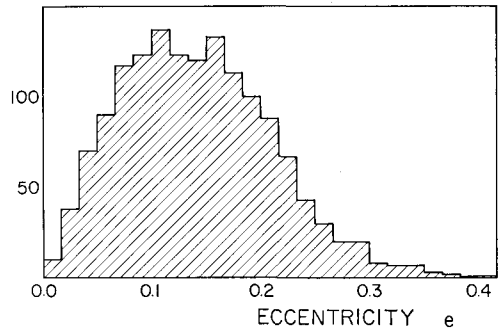


図7 小惑星の軌道離心率 e のひん度分布。

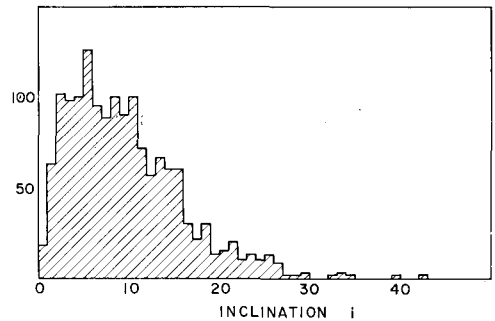


図8 小惑星の軌道傾斜角 i のひん度分布。

は、対日点からの黄経で 40° 離れても 0.2 等に過ぎないが、反射の位相角による効果は 0.5 等をこえる程度になる。

小惑星の軌道面はおおよそ黄道面に一致しているが、かなりのばらつきがある。軌道面傾斜角 i での平均は 10° 位で、 1° 以上 16° 以下の小惑星が多い (図8)。

これも、実際に観測すると、日心黄緯の分散 4.5° 位のガウス分布に近い空間分布を示すことになる(図5)。

小惑星の空間分布に関連して、見かけの等級の積算数関数をモデル計算する時に考えに入れなければならない事柄に、反射率がある。1970年頃までは、小惑星の表面の反射率は、月(7%)や水星(6%)と同じ位であろうと仮定されていた。1974年以後になって反射率は予想に反して、図9のように3.5%と16%にひん度の中心があって、月や水星のような反射率を示すものは極めて少いと推定されるに至った。反射率は、標準的なUBV測光系のBとV及び赤外の波長 $10\mu\text{m}$ と $20\mu\text{m}$ の広帯域測光値から推定される。BとVの値は表面からの反射光を、 $10\mu\text{m}$ と $20\mu\text{m}$ の放射は小惑星そのものの熱放射を測定しているの、両者の和が小惑星の表面で受けとめられた太陽光による。このことから、反射率と直径を観測精度10~20%で求めることができる。といっても、小惑星の形や自転周期や熱伝導率などの假定値によっては、同じ観測資料から求められた反射率に2倍もの差がでることもある。

こうして反射率が測定された小惑星は195ある。その他、偏光観測が108、スペクトル観測が277、UBV測光が690の小惑星について行われて、TRIAD(1979)のファイルに入っている。TRIADというのは、Tucson Revised Index of Asteroid Dataの略称で、アリゾナ大学のツェルナーが中心になって世話をしているデータベースである。勿論、日々更新追加されている。それらの性質は、実験室における鉱物や隕石の分光測光観測の結果と比較されて、小惑星の分類に用いられた。分類が実行された小惑星は752を数え、C, S, M, E, R, Uの6種に分けられたが、確実性のある分類をすることのできた小惑星はその中で200位に過ぎない。反射率とスペ

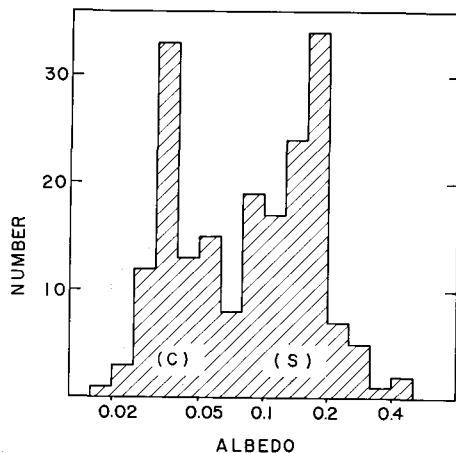


図9 小惑星のアルベドのひん度分布(モリソンとレボフスキー1979)。

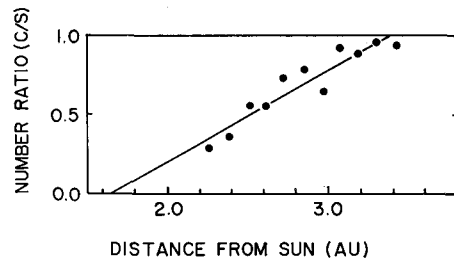


図10 C型とS型の小惑星の数の比は、日心距離と共に一様に増加している(ツェルナーとパウエル1977)。モデル計算には実線を用いた。

クトルについて高い精度の値があれば、高い確度の分類ができるが、その他の性質(偏光観測など)がわかった時、Uに移されたものもある。Uは分類不能組である。全体の90%位はCかSに分類されている。

反射率の低いのはCで、高いのはSとMが殆んどを占める。C型小惑星は炭素質コンドライトなど始原的鉱物に対応していると考えられている。S型小惑星の性質は鉄隕石やケイ酸塩鉱物を含んでいると考えられ、より多くの熱処理の過程を経た鉱物から成っているらしい。さて、CとSの数比は一見するとSの方が多いのではないかと思われるが、反射率の違いで見かけの等級に約1.5等の差がついてしまっていること、軌道半長径が大きくなると一方的にC型小惑星の比率が高くなること(図10参照)を補正すると、小惑星帯の中では75%がC型、15%がS型、その他10%となる。

4. 小惑星のサイズ分布

スペックル干渉法によって、2パラス($673 \pm 55 \text{ km}$)と4ベスタ($550 \pm 23 \text{ km}$)のサイズが測定された。星の掩蔽を複数の地点で観測して、2パラス($538 \pm 12 \text{ km}$)ほか4つの小惑星のサイズが測定された。しかし、このような直接的方法による測定は、未だ数多くの小惑星に実行するには至っていない。殆んどは、明るさと反射率から計算するという間接的方法によっている。反射率の求め方には、上記の測光的方法他に、偏光度と反射率の逆相関関係を利用して求めるものなどがある。TRIADのデータベースで反射率などを用いてサイズを推定できる小惑星は、数百個である。見かけの明るさでは16等位までのものが含まれていて、反射率の高いS型は小惑星帯の内側付近ではサイズ10km位までのものを含んでいるが、反射率の低いC型は小惑星帯の外側になるとサイズ60km止りとなる。見かけの明るさによる数の不完全さを補正して、小惑星のサイズのひん度分布を求める(図11)。

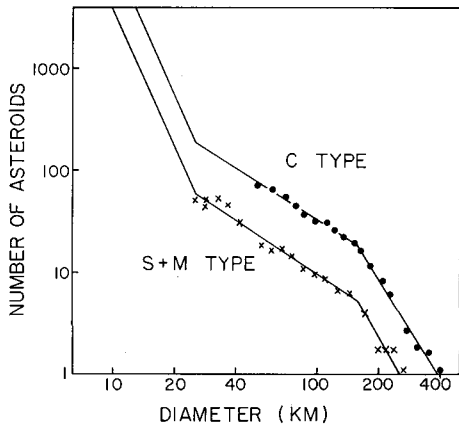


図 11 小惑星のサイズ分布 (ツェルナーとパウエル 1977). モデル計算には実線を用いた.

このようにして、ツェルナーとパウエル (1977) が求めたサイズ分布を両対数グラフに描いて見ると、どうも一本の直線ではなく途中で折れ曲っているようである。いまサイズ分布を、

$$N(\log D) = C \cdot D^{-\alpha} \quad (1)$$

と表わすと、 $\alpha=3$ の場合に質量は $d \log D$ に対して等分配されることになる。図 11 によると、直径 160 km 以上では $\alpha=3.4$ 、それ以下では $\alpha=1.3$ となっている。このようすは C 型小惑星のグループと S 型を主とする反射率の高いグループでほぼ同じになっている。しかし、このようなサイズ分布を求めるに当たって大きな統計的補正をほどこしていることを忘れてはならない。その補正は直径 100 km 以上の小惑星の数については 5% という小さい量だが、30 km 位になると 2 倍以上の補正がしてある。まして、ここで得られたサイズ分布の指数勾配 $\alpha=1.3$ が、そのまま 10 km, 1 km という小さいサイズの小惑星にまで伸びているという保証はない。

サイズが 200 km の小惑星が 10 等であったとすれば、20 km で 15 等、2 km で 20 等である。空間分布とサイズ分布がわかれば、反射率その他を用いて、見かけの等級の積算数関数 (図 3) や天球上の小惑星の数分布 (図 4 と 5) を再現することができる。結論として、直径が 25 km 以下の小惑星は再び急激に数が増えはじめていられる。さもないと、パロマー・ライデン掃天 (PLS) および木曾シュミット (KSS) で得られた 16~20 等の積算数関数の急な指数勾配が再現できない。小惑星のサイズ分布は一樣な指数勾配を持つ単純なものではなく、図 11 に実線で示したように、サイズ 25~160 km で指数勾配が緩やかになる複雑な形をしていると思われる。

5. 小惑星の成因について

太陽系の惑星は、固体微粒子の集合体として芽生えて次第に周囲の固体微粒子を掃き集めて成長して行った。固体微粒子を考慮した太陽系起源論には、20 世紀はじめのチェムバレンとモオルトンの微惑星説、1944 年の O. J. シュミット、1950 年以後のカイパー、1964 年以後のアルフベンなどの歴史がある。太陽系の円板面に沈殿する固体微粒子の層の質量密度が重力不安定の限界値に達して急に微惑星に分裂するという機構が導入されたのは、1969 年以降でサフロノフ、林 忠一郎、ゴールドライクとウァード、などによる。

太陽系の固体微粒子層で生れた無数の微惑星は相互に衝突して破壊・分裂・合併などを繰り返しながら、次第に大きい少数の (といっても数万個の) 原始惑星に統合されていった。ところがその時、ひと足先に合併・統合が進んでいた木星帯から、原始木星の摂動によって地球質量位になった微惑星が小惑星帯へ向って落下して来るようになった。これで、小惑星帯における合併・統合の動きに邪魔が入ってしまった、とデービス達 (1979) は考えている。その結果、小惑星帯では運動がかき乱されて、軌道の離心率や傾斜角が大きくなり、小惑星の相対速度は平均 ~5 km/sec になった。

現在では、直径 0.1 km 以上の小惑星に衝突の確率はあまりない、とファン・フランデルン達 (1979) は計算している。小惑星のサイズの最小を 0.1 km とすると、小惑星帯の質量の 86% は 160 km 以上のサイズの小惑星に、9% は 25~160 km, 5% が 25 km 以下の小惑星になっていると考えられる。

固体の微惑星が相互に衝突して、くっつき、こわれ、こすりとり、はねかえり、などが起ったときに、どのようなサイズ分布になるかということについて、実験室における衝突破壊実験、計算機による数値実験、あるいは解析的研究が行われている。衝突の相対速度、微惑星相互の衝突に対する力学的性質、こわれた破片の脱出速度、質量比、などによって、最終的にすべての質量が 1 個の惑星に集まるか、すべては細かい破片になるか、あるいはその中間として例えば半分の質量は 1 個の最大質量の小惑星に集まり残りの半分の質量はある中間質量以下で指数勾配 α を示す準定常的サイズ分布に至るかということになる。それらのサイズ分布を式 (1) で表わすと、“くっつき”と“こわれ”の双方が競合して働いている場合は $\alpha \approx 3$ 、“こわれ”優勢の場合は $\alpha \approx 3.5$ 、“くっつき”優勢の場合は $\alpha \approx 2$ となる場合の他、“くっつき”の性質によっては $\alpha=2 \sim 4$ の結果が得られている。このことは指数勾配 α の値から直ちに、小惑星のサイズ分布がどのようにしてできたか速断できないことを示して

いる。

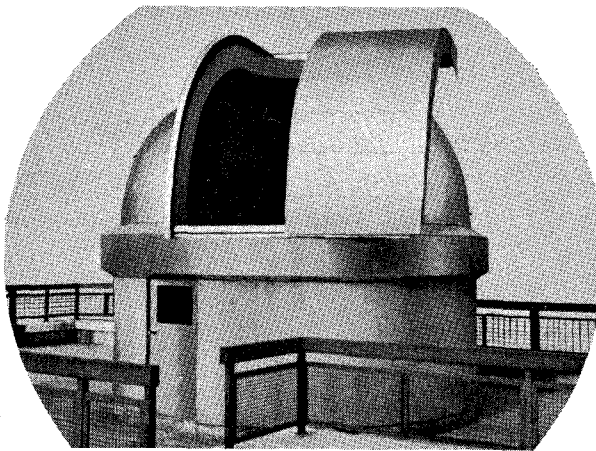
小惑星のサイズ分布と自転の関係は、成因について興味ある示唆を与えると思われる。直径の大きい (>175 km の 34 個) の小惑星の自転周期は平均 7.1 時間、直径の小さい (100 個) の小惑星の自転周期は平均 9.6 時間であるが、ぼらつきはもっと大きい (テデスコとザッパラ 1979)。自転周期は光度変化から求めたものである。自転軸の向きは、3 種の方法でしらべられて、系統的偏りは見つかっていない。

小惑星の表面の形状などについては今のところ、火星の衛星からの類推が重要である。フォボス (13.5×10.5×9.0 km) とダイモス (7.5×6.0×5.0 km) は、パイキングから送られてきた写真によれば、じゃがいものような形状の上に大小のあばたがいっぱい。おどろいたことに、月の表面と同様の泥でおおわれているらしい。そしてその深さは 100~200 m もあり (ベベルカ 1978), 10 m 位の岩の破片が泥の中から顔を出している。脱出速度がわずかに 10~15 m/sec のこのような天体でも丸裸かではないのである。ハウセン等のモデル (1979) では、1 セレス (直径 1014 km), 2 パラス (589), 3 ジュノー (247), 4 ベスタ (530) などの大きい小惑星には、深さ

1 km 以上の泥が積もることになっているが、直径 10 km などという小さい小惑星には 1 mm と積もらないことになっている。きっと、小惑星の衝突現象というのは、極めて非弾性的な衝突として取扱うべきなのであろう。

それに関連して、小惑星に衛星があるという話は面白い。小惑星が恒星を掩蔽する際に、その前後においても何物かによって恒星がかくされたという観測で、多分小惑星の中にはいくつもの衛星にとりまかれているものがあるということが考えられる。今までに知られているのは、2 パラス、6 ヘーベ、18 メルポメネ、129 アンチゴネ、433 エロス、532 ヘルキュリナなどについての話である。また変光曲線の型から接触連星あるいは食や影の効果と思われる食連星らしいものがある。小惑星帯では潮汐半径は小惑星の直径の 100 倍位に達している。小惑星の衝突断面積の見積りにこのあたりからも困難はいってくる。

小惑星のサイズ分布がどのようにして実現したかという過程は未だ明らかではないが、非常に興味ある問題を含んでいることは確かである。そして、このようなことに関する研究が一つの学際的分野として、1970 年以降大きく発展している。



★営業 ASIB 品目★

天体望遠鏡と双眼鏡
各種部品と撮影用品
ドームの設計と施工

アストロ光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町 2-38-15

☎03(985)1321 振替口座東京5-52499番

LN-100S型 (精鋭な追焦点 スーパーミラー)

(D=103mm)
(F=5.8)

ガイディングスコープ
ガイド用マウント (別売)



極軸望遠鏡内蔵

写真は S 型アルミ三脚

★新総合カタログご希望の方は切手300円を同封下さい
★全国有名デパート・光学取扱店でお買い求め下さい