

やさしい天文学シリーズ  
I. 天体力学 (4)

天体力学の話

古在由秀\*

13. 再び小惑星の族について

前号の最後に小惑星の族のことを書いた。族は、軌道の平均半径、固有離心率、固有軌道面傾斜角の似た値を持つ小惑星から成り立っているのだが、この固有離心率、固有傾斜角を求めるにあたっては、離心率や傾斜角が小さい——その二乗が木星の質量 (1000 分の 1) ほど——という仮定のもとに、微分方程式を線型化している。この仮定の正しくないことは、前号の小惑星の族の表をみれば明らかである。固有離心率や固有傾斜角の平均値が 0.30, 35° というような族もあるのだから。

これらがそんなに小さくない場合については、最近、アメリカの J.G. ウィリアムスや湯浅学氏の求めたくわしい長い式があるが、ここでは筆者が 1962 年に発表した論文にしたがってその様子を調べてみよう。そのために、軌道の長半径があまり変化しないもの、すなわち公転周期が木星のそれと特別な関係のない小惑星にかぎって話を進めることにしよう。そして短周期の変動を無視して考えることにする。また、小惑星に主として大きな作用を及ぼす木星や土星の軌道は円で、木星と土星は同じ平面上——太陽系の不変面上を——動いているとして問題を簡単にする。

こうすると、 $\sqrt{1-e^2} \cos i$  が一定となる。ここで、 $i$  は木星の軌道面に対する小惑星の軌道面の傾斜角である。この変らない量をあらためて  $H$  とおくことにする。はじめの頃に書いたと思うが、この  $H$  が 1 に近づけば、 $e$  も  $i$  も大きく変りえないし、1 からはなれるに従って、 $e$  も  $i$  も大きく変る可能性がでてくる。この場合の微分方程式は、自由度 1 の正準方程式になり、 $\sqrt{a(1-e^2)}$  と  $\omega$  (近日点引数) のみを変数となり、しかもエネルギー積分が成り立ち、ハミルトニアンは定数となる。すなわち、微分方程式を解かなくても、 $\sqrt{1-e^2}$  が  $\omega$  とともにどう変るかがハミルトニアンから分る。 $H$  は定数であるから、 $\sqrt{1-e^2}$  と  $\cos i$  とは——一対一に対応し、 $\cos i$  も  $\omega$  とともに変化する。しかも、 $\omega$  については対称性があるので、 $\omega$  の 0° から 90° までの範囲での変化を調べればよい。

こうして調べてみると、小惑星では、 $\omega$  が 0°, 180° の時には離心率が最小で傾斜角は最大となり、 $\omega$  が 90°, 270° の時にはこの逆となる。すなわち、近日点や遠日点が木星の軌道面上にある時には、小惑星の軌道は最も丸くなり、遠日点距離も小さくなるので木星との接近がさ

けられるのである。離心率が最も大きくなり、遠日点距離が大きくなるのは、近日点や遠日点が木星の軌道面から最も離れる時で、たとえ遠日点距離が 5 天文単位より大きくなって木星に近づかない。

$H$  が比較的小さい場合、離心率や軌道面傾斜角が近日点引数  $\omega$  とともにどう変るかを、ブラウワーが 28 と名付けた族の小惑星について示したのが図 7 である。この図が縦軸は木星の軌道面に対する傾斜角であり、横軸は離心率である。○印で表わした点は、この族に属する 8 つの小惑星についての現在の値に相当する。またこの図で、左上の×印は  $\omega$  が 0° と 180° での値であり、右下の×印は  $\omega=90^\circ$  と 270° での値である。数字は小惑星の番号である。この図で分る通り、離心率は 0.3 も変化し、傾斜角は 7° も変わる。そこで、ブラウワーは 1508, 1474 という小惑星はこの族に属しているとは考えなかったのだが、その変化を考えると、この 2 つの小惑星は同じ族に属することは明らかである。

族の分類をする場合、軌道の長半径  $a$ ,  $H=\sqrt{1-e^2} \cos i$ ,  $\omega=90^\circ, 270^\circ$  に対する軌道面傾斜角  $i_m$  (木星の軌道面について測ったもので、最小値である) の 3 つをとるとよいと筆者は考える。

図 8 と図 9 とは、横軸には  $a$  をとり、縦軸にはそれぞれ  $H$  と  $i_m$  とをとって、番号のついた 2000 ほどの小惑星の値を表わしている。この図で、族がはっきり表われている。また、2 天文単位あたりと、図の左下から右上にかけてギャップのあることが分るが、これらはいずれも、近日点経度や昇交点経度の動きと、木星や土星のそれとの似た値をもつ場所に相当する。木星の公転周期の 2 倍、3 倍の周期にあたる場所に小惑星の分布のギャップがあるのと同じように、もっと違った周期についても似たようなギャップがあるのである。

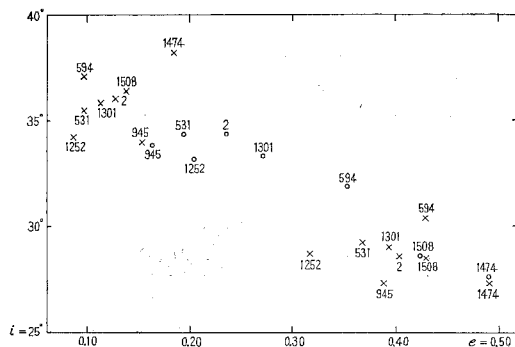


図 7

\* 東京天文台 K. Kozai

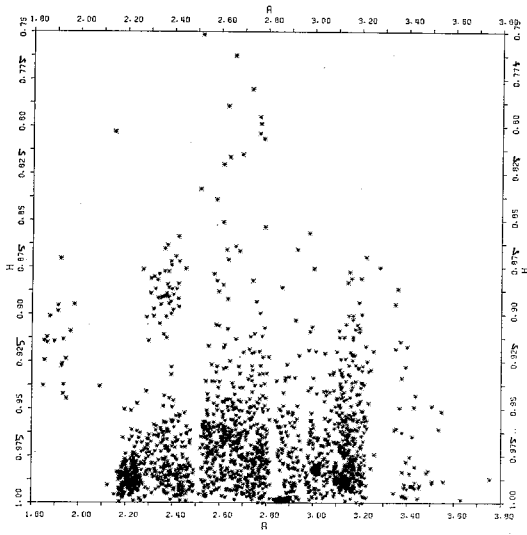


図 8

こうして考えてみると、 $a=2.30$ ,  $i_m=22^\circ$ ,  $H=0.89$  のあたりの族、 $a=2.20$ ,  $i_m=4^\circ$ ,  $H=0.99$  のあたりの族は、一つの小惑星が分かれてできたというより、力学的な関係でのギャップをさけるために集まってきたものと考えた方がよい。これに対し、 $a=3.0$ ,  $i_m=10^\circ$ ,  $H=0.98$  のあたりの族、 $a=2.9$ ,  $i_m=2^\circ$ ,  $H=1.00$  のあたりの族、 $a=3.15$ ,  $i_m=1.5^\circ$ ,  $H=0.98$  のあたりの族は、一つの小惑星の分かれてできたもののように思える。小惑星の族の成因については、まだまだ検討の余地がある。

#### 14. 小惑星と彗星

小惑星の離心率や軌道面傾斜角は、前節でのべたように近日点引数  $\omega$  とともに変化し、 $\omega=0^\circ, 180^\circ$  では離心率は最小に、傾斜角は最大になり、逆に  $\omega=90^\circ, 270^\circ$  では離心率は最大に、傾斜角は最小になる。これは図 7 でも明らかである。 $\omega=0^\circ, 180^\circ$  というのは軌道の長軸が木星の軌道面上にある時で、この時に軌道はもっとも丸くなり、遠日点距離は短くなる。

トロア群、ヒルダ群の小惑星をのぞいて、最小の離心率で計算した遠日点距離が 4.2 天文単位より大きくなる小惑星が 3 つあるが、その他のものは、 $\omega=0^\circ, 180^\circ$  になると離心率は小さくなるので、遠日点距離は短くなり、木星に近づきえない。遠日点距離が 4.2 天文単位より大きくなる 3 つの小惑星のうちの 2 つは、公転周期が木星の 2 倍で、 $\theta$  という角度引数が  $0^\circ$  のまわりを振動しており、近日点のそばでしか木星に近づかないので、実際にはそれほどは木星に接近しない。

もう一つの小惑星はシンシナティとよばれるもので、 $a=3.41$  天文単位で、現在の値は  $e=0.322$ ,  $i=40.1^\circ$  である。この離心率は 0.318 と 0.559 の間、傾斜角は  $40.2^\circ, 29.2^\circ$  の間で変化しているが、離心率の最小、傾斜

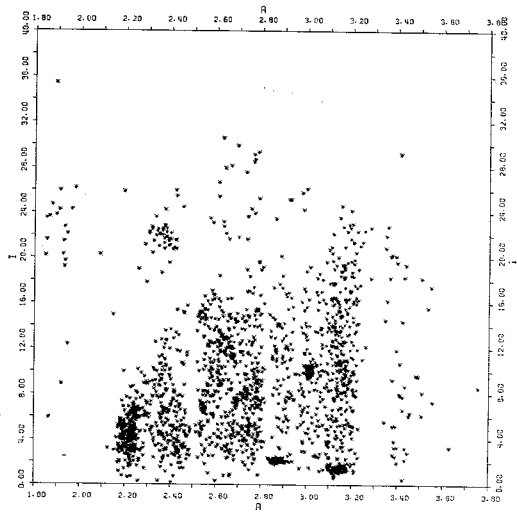


図 9

角の最大も  $\omega=0^\circ, 180^\circ$  の時でなく、 $\omega=90^\circ, 270^\circ$  の時におこる。この小惑星では近日点引数が  $0^\circ$  や  $180^\circ$  になることがなく、 $90^\circ$  のまわりを  $69^\circ$  と  $111^\circ$  の間で振動することになる。軌道面傾斜角はいつも大きいし、軌道の長軸はいつも木星の軌道面と傾いているので、遠日点距離は大きくても、木星に非常に近づくことはない。

このように、 $\omega$  が  $0^\circ$  や  $180^\circ$  にならない小惑星はあと 3 つある。そのうちの 2 つは、 $a$  が 1.8 天文単位のあたりの火星に近いものであるが、これは火星に大接近はしないようなしくみになっている。

もう一つの小惑星は例外的なヒルダとよばれるもので、軌道の長半径は 5.82 天文単位、離心率は 0.6565、軌道面傾斜角は  $42.3^\circ$  ある。すなわち、遠日点距離は 9.6 天文単位と土星の軌道半径に近く、近日点距離は 2 天文単位となっているので、軌道は木星のと交わり、したがって木星に大接近する可能性は大きい。現在の近日点引数は  $60^\circ$  であるが、これは現在へり続けている。しかし、近日点引数は  $48^\circ$  より小さくならず、ここまでへると逆にふえ出す。そして  $90^\circ$  になると、離心率は 0.811 に、軌道面傾斜角は  $17.2^\circ$  になる。この時には、近日点距離は一天文単位となり、彗星の軌道に似てくる。予言をすれば、ヒルダ自身も、その頃に彗星の形をしてくるだろう。ヒルダは現在は小惑星として分類されているが、これは間違いであったような気がしてならない。

一般的に云っても、ヒルダの軌道の変動の様子は、彗星のそれに似ている。軌道の長半径が木星のより大きな周期彗星の、半分以上は、近日点引数が  $90^\circ$  か  $270^\circ$  のまわりで振動している。しかし、その軌道は近日点や遠日点以外の点でも、木星や土星に接近することがあるので、大惑星に大接近する可能性はあり、現実にかなり

——天文単位以内——に木星に近づいている。

一方、軌道の長半径が木星より小さいものについては、 $\omega$ が振動しているものはない。もともとは、振動をする可能性の強い条件にあるのだが。したがって、彗星は木星に大接近をとげることになる。

一般的にいえば、彗星の離心率は大きく、近日点引数とともにあまり大きくは変化しないが、軌道面傾斜角はむしろ小さく、しかも大きく変化している。彗星の場合には $\sqrt{1-e^2}$ が $\cos i$ よりも小さく、大部分の小惑星ではこの大小関係が逆になる。彗星の場合、このようなものだけが近日点距離が小さくなり、彗星として輝きうるのだといえる。いずれにしても、彗星の軌道も変わってきているので、離心率が大きくなってやっとな輝きだすものもあるのだと考えてよからう。

また、軌道長半径が小さく、地球に近づいて発見された小惑星のなかには、軌道の性質としては彗星に近く、彗星のなれのはてといわれているものもある。彗星の軌道が小さくなり、核だけがのこって小惑星として発見されたのだと考えられる。

最近の小惑星の物理観測もすすみ、偏光の測定、赤外線による温度の測定、反射率の測定などがいろいろな位相についてなされ、これらと地上の隕石での測定と比較して、小惑星の物理的性質による分類もかなりの数の小惑星についてなされてきた。この分類と族との関係など、小惑星についての研究はこれから更に進歩していくであろう。

彗星についても、その起源など、多くの問題がのこされている。

## 15. 終りに

この稿を書きはじめた時には、4回も書けば、天体力学のかかなり多くの部分がカバー出来るのではないかと期待していた。ところが、書きはじめてみると、かなりはしょって書いたのだが、天体力学一般というよりは、太陽系の力学をカバーするのがやっとなということになってしまった。太陽系の力学といっても、筆者のみた、あるいは筆者の興味のある太陽系の力学ということになってしまった。まだまだ書かなければいけないことが沢山ある。

ここでは主として、太陽系内の天体の運動の大局的な性質についてのべてきたが、今でも天体暦のための天体のより精密な予報のための研究を行っている人達も少ない。何億年、何千万年でのスケールでの運動の性質を知るといふより、何千年、何百年の間で惑星がどう動くかの理論式を導き、これと実際の観測とをくらべてみる。理論式と観測とがよくあうよう、初期値や他の惑星の質量を決め直す。

このような過程をへて、天王星の運動をよりよく表わせるよう、海王星の存在が予言され、その軌道が求めら

れ、その位置が予報されて海王星が発見されたのいうのは有名な話である。

また、どういふ風に初期値や惑星の質量を決めても、水星の近日点の動きがよく合わなかったのがあったが、その近日点の動きも、アインシュタインの一般相対性理論によって説明された。

また、地球の自転速度の変動も、もともとは月や太陽の動きから分ってきたのである。我々は、地球の自転速度は不変なものと考え、これで一律な時系がえられると長い間考えていた。実際、今世紀前半までは、恒星の子午線通過の時刻の測定は、天文台の時計の補正のために使われていた。

このような、地球の自転にもとづく時計で時刻を定義すると、月や太陽の動きに見かけ上永年加速の項が現われる。また、大昔の日食のおこった時刻も場所も、現在の理論で計算したものと違ふことが分つてきて、地球の自転速度がおそくなってきていることが分つたのであり、その変動の率については、現在でもまだ議論が行なわれてきている。

観測の精度も向上してきている。とくに惑星についてはレーダの観測ができるようになり、月についてはレーザによる測距が可能になって、精度の向上もいちじるしく、相対精度も $10^{-8}$ から $10^{-9}$ となつて、運動の理論の再検討も行なわれるようになったし、月のレーザ測距のデータから、地球の慣性質量と重力質量が $10^{-11}$ の範囲でひとしいことも明らかになった。

また、惑星に近づくと人工天体の動きを精密に測ることによって、惑星の質量もそれまでよりははるかに精度よく求められてきた。

電子計算機の発達により、惑星と恒星、衛星と恒星との食などの予報ものがさずに行けるようになり、これらにより、より精度のよい惑星や衛星の位置が測られるようになり、また、思いがけず、天王星のまわりの環の発見へともつながった。このような観測のチャンスは、これからますます増えてこよう。事実、天王星に環があることが分つてみると、この環が恒星をかくすことはかなりあることが明らかになり、その予報はすでに何年分か計算されている。

3体問題の研究も進められている。衝突の問題、周期解の発見、その安定性の研究など、多くの論文が発表されている。また、制限3体問題について、周期解の性質や衝突の問題の研究のために行われた正則化は、球状星団の運動学的性質を調べる研究にもその応用例を見出している。

筆者が天体力学を自分の研究テーマとしてえらんでから25年以上もたってしまった。学生の頃は、セミナーなどで読む論文を探すのに苦勞するほど、天体力学の新

らしい論文というのはとても少なく、その当時使われはじめた電子計算機の出現で、天体力学のやることは全部計算機でできてしまうのではないかといわれたこともある。ところが、今になって、天体力学の論文の数は、論文を読み切れないほど多くなってきてしまい、電子計算機の出現によって、問題はすべて解けるどころか、更に新しい問題をも生みだしてしまった。

はじめに述べたように、3体問題が解けないので今に天体力学という学問があるのだということもあるが、今では、三体問題や、惑星などの多体問題の解法のための天体力学から脱皮し、天体力学を使って太陽系の力学

的性質の解明といった方向にあゆみは始めている。

何百とある彗星の軌道を数値積分で求めただけでは、ここで述べたような彗星の運動の性質は明らかにされない。天体力学の知識を使って、はじめて小惑星と彗星との運動の違いも明らかになるのである。

同じ天体力学者といっても、実はやっていることにそれぞれかなりの違いがある。それぞれの立場から明らかにされた事実をもちよってシンポジウムをひらき、太陽系の天体の運動の性質を調べようというのが、今回東京でひらかれる IAU シンポジウム No. 81 の「太陽系力学」の大きな目的である。

### 学会だより

#### 会費納入のお願い

4月になり会計年度が改まりますので新年度会費の納入をお願いします。会費は通常会員3,500円、特別会員10,000円です。納入には今月号に同封の振込用紙を利用して三菱銀行三鷹支店日本天文学会普通預金口座(222-4434400)、または郵便振替口座社団法人日本天文学会(東京6-13595)宛振りこみか、あるいは現金書留を御利用下さい。会の円滑な運営のため、できるだけ早く御納入下さるようお願いいたします。

#### 日本証券奨学財団の昭和53年度研究調査助成募集

この助成金の趣旨は、学術文化の研究調査を奨励し、社会の発展、福祉に寄与することとなっており、理学および工学も対象の部門に入っておりますが、原則として研究者の年齢は55才以下としています。昭和53年度の助成金総額は3,000万円で400万円以内のものを数件100万円以内の研究調査の助成を十数件予定しています。申請書提出期間は本年3月1日より4月末日までとなっていますので関心のある方は下記宛お問合せ下さい。

〒103 東京都中央区日本橋茅場町1丁目14番地

東京証券会館3階

財団法人 日本証券奨学財団 (Tel: 03-664-7113)

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価280円(〒45円) 78-5月号・4月5日発売!

#### ●5月号のおもな内容

- ★5月5日の夜極大になる「みずがめ座 $\gamma$ 」という流星群があります。特に最近むずかしくなりがちな観測法をやさしく、小中学生にもわかるように流星観測を解説。
- ★昨年(1977年)は彗星発見20個という史上最多記録。それぞれについての特徴、データなどをまじえて紹介。
- ★天体写真を撮る人がふえています。郊外の暗い場所に行けない人のために都会地での撮影法を紹介。
- ★今月の工作レポートは「10cm反射折たたみ式」です。ちょっと背中にかついで、車で運べる機材の作り方。
- ★伊豆の山に行った中央大学の天文同好会を取材しました。どんな風に撮影するのか、写真で紹介。……ほか

# 小型天体望遠鏡教室

選び方と使い方

天文の好きな少年が、学校の先生や父親、天文台の先生との会話を通して、望遠鏡の選び方や正しい使い方を学んでいくという、初心者低学年向けの望遠鏡の本です。天体望遠鏡を買う前の予備知識、店頭で実物を前にしての選び方、具体的な使い方までやさしく書いてあります。レンズ工場の見学や、夏休みでの合宿観測への参加体験記、それに天文台の見学記なども加えて、楽しくおもしろく読める本です。

●富田弘一郎著/B6判・222ページ・900円・発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5  
振替東京7-6294 電話03(292)1211