

## 衝突実験屋のみた小惑星の構造

藤原 顕\*

### 1. はじめに

小惑星の内部構造や組成を知るにはどうしたらよいだろうか。物体の内部を知るもっとも単純明快な方法はそれを壊してみることである。これは子供の発想であると同時に物理屋の発想でもある。しかし小天体といえどもこれを壊すには大変なエネルギーが要る。たとえば大きさがたった 20 km 程度にすぎないフォボスを壊すでも必要なエネルギーはざっと  $10^{26}$  erg——これは 1MT 核弾頭にして約 2000 発分に相当する（もっとも将来はこのような大それたことをやって資源を確保しようという話もなくはない）。だがわれわれが手をくさすまでもなく太陽系には壊された天体の集団がある。ここにのべる小惑星のファミリーはその例である。これらが過去にどのような衝突をうけてどのように壊れたか。またこれらはもとの母天体の内部からどのようにまきちらされたかを調べていけば小惑星の内部や組成についての手がかりが得られるだろう。ところで物が壊れるという現象は私達の日常生活でも大変身近な現象である。それだけにこれまで多くの研究がなされてきてはいる。しかしビルを安全に作ったりすることはできても惑星が衝突によって壊れる理屈はまだできあがっていない。このために実験室で小惑星のおもちゃ、要するに石の塊りに高速度弾丸を衝突させて破壊する実験を行って素過程を明らかにしておくことがまず必要である。本稿ではまず実験について述べたのち、ファミリーをつかって小天体の内部を知る方法について述べよう。

### 2. 弾丸を高速に飛ばす方法

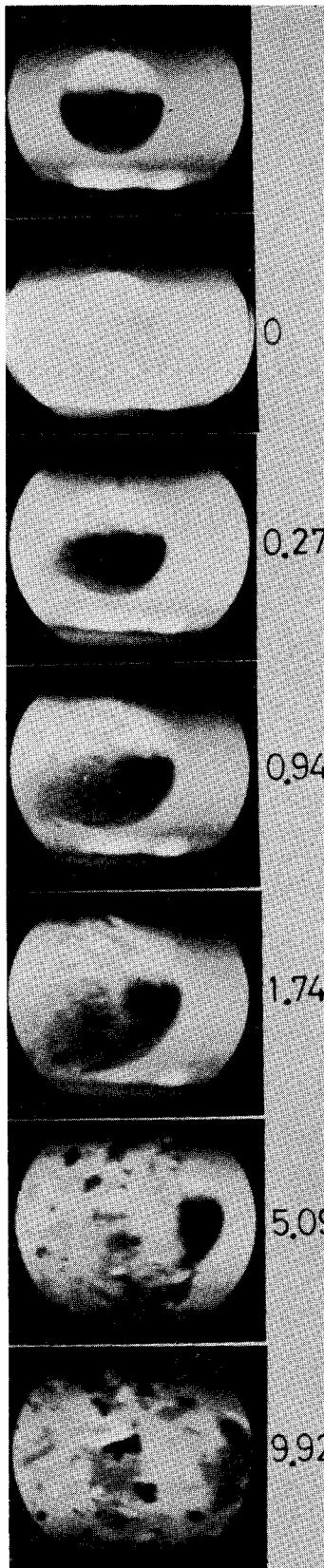
小惑星帯における小惑星同志の平均衝突速度は現在の軌道の広がりから約 5 km/s であるといわれている。この程度の速度ならば 1g 程度の物体を二段式軽ガス銃と呼ばれる特殊な銃を用いて実験室内で飛ばすことができる。このような装置はクレーターの研究など惑星研究だけでなく、衝突瞬間に発生する超高压を利用する物性研究でも活躍している。天文関係の本誌読者にはあるいはなじみがないかも知れないので少し脱線して加速原理にふれておこう。これは要するにピストルやライフル銃と同じようにガスで弾丸を押し出すものである。しかしピストルは数 100 m/s 程度、ライフル銃では約 400 m/s 以

上せいぜい 1 km/s までである。速度を上げるにはガスを高温、高压にすることが必要である。このために火薬でまずピストンを押し、このピストンによって高温、高压に圧縮されたヘリウムガスで弾丸を押し出すという二段がまえの方法がとられる。この方法で原理的に到達できる最高速度は約 10 km/s 程度である。さらに高速度を得るために最近いろいろなアイデアが出され、可能性の検討や開発競争が活発になってきた。ここ数年のうちにもしかすると数 10 km/s 程度まで出せる装置が登場するかも知れない。読者もつれづれに何か奇抜なアイデアを考えてみられてはどうだろうか。さて本題にもどろう。

### 3. 衝突破壊のようす

図 1 は京大工学部の塚本明正氏と共同で行った実験によるものである。衝突に同期させて毎秒約 7000 駒で高速度カメラを動かし破壊の状況を撮影したものである。ピンボケ写真だがこれでも本質的なことは充分わかる。実験データの詳細は図の説明を見てほしい。衝突後の様子をざっと見ておこう。衝突の瞬間に入射弾丸とターゲットの双方に強いショックが伝わり物質は高温・高压状態となる。衝突瞬間において写真が露出オーバーになっているのはこのときの発光によるものである。実際に衝突の瞬間をチェンバーののぞき窓から見ていると強く光るのがみえる。圧縮された物質は  $\mu$ s くらいのオーダーで圧力が解放されはね水のように円錐状に高速度で飛び出す。これはプラズマと細かい破片群からなりジェットと呼ばれている。ジェットの速度は入射弾丸の速度をはるかに上まわるものがあることがゴルトによって報告されている。これに続く段階は破壊の段階である。衝撃波がターゲットを横切る時間を考えると衝突第 1 コマ目ですでに波はターゲット中に行きわたっているはずである。衝撃波と自由表面からの反射波との干渉によって亀裂が進み破壊がはじまる。目にみえる大破壊はそれからしばらくたって見られるようになる。このようにターゲットが全体的に壊れるような破壊をカタストロフィック破壊（C破壊）と呼んでいる。もちろんこのような破壊がおこるかどうかは（近似的に）入射弾丸エネルギー  $E$  とターゲットの質量  $M$  との比較できる。玄武岩の場合  $E/M$  が  $10^6 \sim 10^7$  erg/g で C破壊がおこる。  $10^9$  erg/g にもなると完全に粉碎されてしまう。

\* 京大理 Akira Fujiwara: Structure of Asteroids Expected from Impact Experiments



#### 4. 主要破片の速度はおそい

ジェット粒子やその近傍からの細かい破片群を除いた主要破片の速度はどれくらいであろうか (小惑星として観測にかかるものはここでいう主要破片に対応するのだら

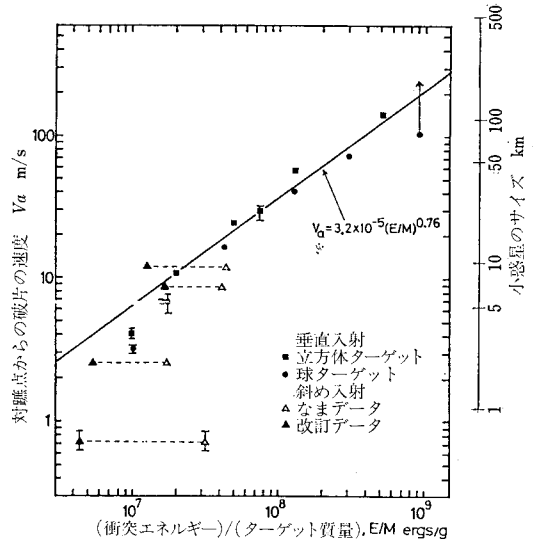


図2 破片の対離点速度. 斜め衝突の「改訂データ」は同じダメージを与える垂直衝突の  $E/M$  でプロットしなおしたものである. たて軸には表示された速度が脱出速度となる天体のサイズも示してある.

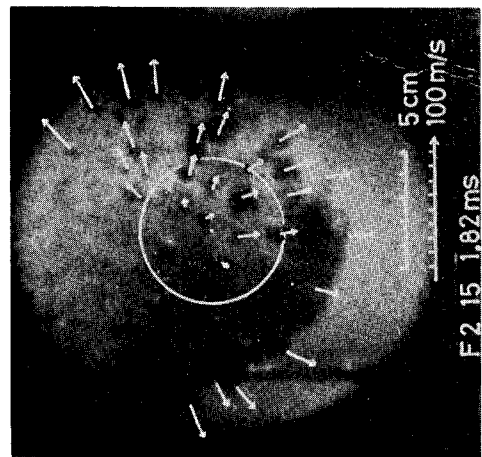


図3 破片の速度ベクトル. もとのターゲット (白い円で示してある) の直径は 6 cm, 図と同じ弾丸が同じ速度で球の中心に向かって衝突する. 衝突後 1.82 ms

図1 玄武岩球ターゲットに高速弾丸が水平に左から球の中心に向かって飛んできて衝突する. 弾丸は 0.4g のポリカーボネイト製, 速度 2.7 km/s ターゲットの直径は 8.2 cm. 横の数字は衝突瞬間からの経過時間 (ms 単位)

う)。破片の代表速度として衝突点の対蹠点(ターゲットの中心に関して対称な点)からの破片の速度を調べ、これを  $E/M$  に対してプロットしたものを図2に示す。これから  $E/M$  が  $10^9$  erg/g 近くでも破片の速度は 100 m/s 程度にすぎないことがわかる。ターゲットの形は球でも立方体でも  $E/M$  に対するプロットではあまり変わらない。対蹠点以外からの破壊の速度は対蹠点からの速度の2倍以下であることがわかった。これは破片の速度ベクトルをあらわす図3から明らかである。また球の内部からの破片は表層部からの破片にくらべて低速である。ところで入射弾丸の持っていたエネルギーは衝突後どのように分配されていくのであろうか。ゴルトらが行ったC破壊のおこらないような大ターゲット表面にクレーターをつくる実験で推定したのもも参考にしてエネルギーの分配率を見積った結果、衝突エネルギーの大部分は衝突近傍で失われてしまい残りの約1%程度が主要破片を飛ばす運動エネルギーとなるようである。これは上にのべたようにこの破片の速度があまり速くはないことと対応している。

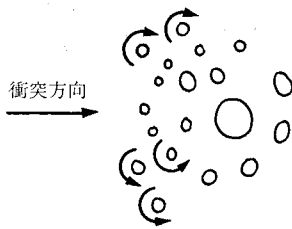
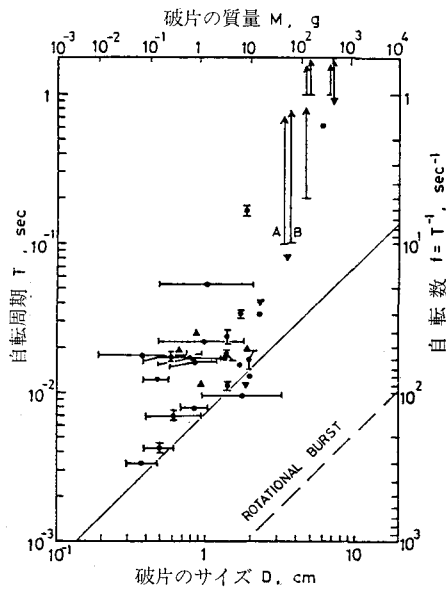


図4 破片の自転周期。斜めの実線はみかけの最小周期を示し、破線は自転による分裂の限界線を示す。

### 5. 高速自転する破片群

データ数は充分ではないが破片の自転の測定結果を図4に示した。かなり高速で自転していることがわかる。高速自転している破片の自転の向きは図に示したようになる傾向があるが、これは図3の速度ベクトルからもみられるように強いシアーの場の中で生じていることを示している。図4には見かけの回転上限をあらわす線と遠心力による分裂をおこす限界線も参考のために示してある。自転エネルギーと並進エネルギーへどのように分配されるかについては興味深いが充分なデータがつかめておらず今後の課題である。

### 6. 小惑星は破片の積み重なったもの?

ここまでで、ちらばった小惑星の性質をみてそれがどのように破壊をしたかを調べていくための基礎的な材料がそろった。実は小惑星に应用するとき、実験室の実験をそのまま外そうできるかどうかについて検討しなければならないが、まだ充分信頼できるスケールング則が見つかっていない。しかし少なくとも天体自身のもつ重力については考えておかねばならない。私達の実験で示したように破片速度はそんなに速くはないのでC破壊で壊れてもよほど激しい破壊でないかぎり一たん飛び出した破片の一部あるいは多くは脱出速度を超えられず重力によって再集積するであろう。図2のたて軸にはその速度が脱出速度となる天体の直径を示しておいた。ファリネラらは過去の小惑星の数が多かったことを考えに入れ平均 5 km/s の速度で衝突し合ったとするとほとんどの小惑星がこれまでにC破壊を一度は経験したと考えている。そして上に示した破片の代表速度と脱出速度との比較によって約 100 km 以上の小惑星の多くは破壊しても完全にバラバラに飛んでしまわずに重力的に破片を再捕獲したものと考えている。これらがほんとうだとすると 100 km 以上の小惑星の多くは破片の積み重なった構造となっているに違いない。その構造は弱いため自己重力によって次第に回転楕円体へあるいは三軸不等のヤコビ楕円体へと形を変えていこうといわれている。

### 7. 平山ファミリー母天体の復元

平山ファミリーの中には衝突を受けて破壊して散らばったと考えられているものがある。テミス、エオス、コロニス族はその例で、これらの族に含まれる小惑星の物理的性質をしらべることによって壊れる前にあった母天体の内部を知ることができる。これらの各族に含まれている小惑星を寄せ集めて母天体を復元してみるとその直径はテミス 360 km, エオス 220 km, コロニス 110 km くらいとなる。まずこれらの母天体がどの程度の衝突を

受けたかを知る方法を簡単に述べておく。ファミリー中の小惑星の現在の軌道長半径のちればりは衝突後に互いの重力圏をふり切ったあとにもっている破片小惑星の運動エネルギーを与える。これに重力エネルギーを加えると衝突直後の主要破片の運動エネルギーが推定できる。この主要破片への入射弾丸からのエネルギー転換率を私達の実験から1~10%と見積ると入射弾丸のエネルギーがわかる。その結果これらのファミリーの母天体はいずれも  $E/M$  が  $10^8 \sim 10^{10}$  erg/g のはげしい衝突を受けたと推定される。これらの衝突によって出た破片群は互いの重力で集積しあった後、今日のような姿になったものであろう。したがってファミリーのメンバー（のサイズの大きいもの）は前述した破片の積重ね構造をもつ代表的なものであろう。

8. 母天体の内部組成

つぎにこれらのファミリー母天体の内部の組成について知るためには族のメンバーの反射スペクトルを調べればよいだろう。小惑星の反射スペクトルが可視から近赤外域にかけて観測が盛んに行われ、それらがいくつかのスペクトルタイプに分類されているのは周知のとおりである。セレスやベスタなどの大きな小惑星に対してはフーリエ分光も行われその組成についての議論も微細になりつつある。たとえばセレスの表層にはごく薄い  $H_2O$  の霜があるなどということもわかるほどになってきた。しかしこれらのスペクトルが反映している物質はごく表層部のものにすぎないことは明らかである。内部のバルクな部分まで同じものででき上っているという確実な保証はない。多少とも内部の物質を反映しているかも知れないという望みをいだかせる点をしいてあげれば次のようなものだろう。① 十分大きな小惑星は先に述べたように一たん壊れた破片をまき上げた後にそれらを集めた構造をしているために表面から中心部に向かってある程度の範囲でまざり合っている可能性がある。② 小惑星の自転周期とスペクトルタイプの間統計的に有意な相関が見出されていることなどである。問題があるかも知れないがここでは一応表面のスペクトルが内部の物質を何らかの形で反映していると考えて議論を先に進めよう。同一ファミリーに属している小惑星のスペクトルが互によく似ているということはハンセンやグラディによって指摘された。しかし類似しているとはいえ、観測誤差を考慮に入れても多少の差がみうけられる。この違いはもとの母天体の中での組成の違いを表わしているであろう。そこでファミリーのメンバーの1つ1つがもとの母天体のどの部分から出たものか、少なくとも中心部にあったものか、外層部にあったものかを区別することができないかを考えてみる。この判別に使えそうな物

理的パラメータとしては小惑星の ① サイズ, ② 速度, ③ 自転周期, ④ 形状 等が考えられる。これらのパラメータについて私達の実験結果から言えそうなことを記す。まず一般に母天体の中心部から出たものほど破片は大きく、外層部および衝突点に近い破片ほど小さい。また中心部から外層部、衝突地点に近いほど破片の相対速度は大きくなるだろう（図3参照）。また破片の自転速度は衝突点に近いほど速くなる傾向がある。破片の形は大きなものほど前記の積重なり構造となる傾向があるため形は楕円体となるであろう。残念ながらファミリー小惑星について ③, ④ はデータが多くないので補助的に利用できるにとどまる。したがって ①, ② が主要パラメータとなる。図5にはエオス族に属する小惑星を色指数ダイアグラム上に表わしたものである。円の大きさが小惑星の大きさを表わし、斜め線の傾斜角で最大小惑星（これが母天体の中心部にあったと考える）に対する相対速度をあらわした。したがって傾斜角の小さい線で大きな円であらわされる小惑星は母天体の中心部から、逆に傾斜角が大きく小さい円であらわされる小惑星は外層部あるいは衝突点に近いところからきたと考えるわけである。必ずしも十分明白というわけではないが、ダイアグラム上で外層部成分が左下から右上にかけてみられ、かつ中央部の大きいものとは分離しているようである。つまり中央部の物質と外層部の物質は組成的に差があること、また外層部の物質の中でも場所によって組成に違いがあることを示している。また最大小惑星が分布のほぼ中央にあるのは先に述べたように破片の集積効果によって平均的な色になっているようにも見える。いずれに

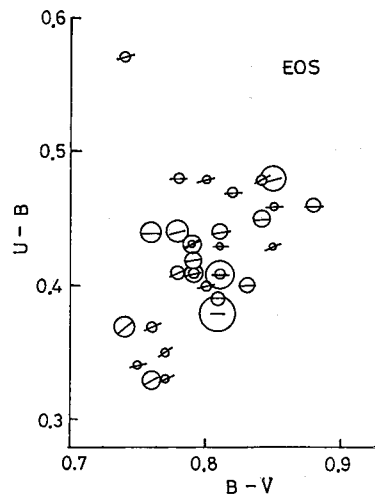


図5 エオス族の色指数ダイアグラム。円の大きさは小惑星の大きさを、斜線の水平からの傾斜角は最大小惑星に対する相対速度の大きさをあらわす。

しても母天体がタマネギ構造のように層構造をしていたというような単純なものとは考えにくい。

## 8. おわりに

同じようなことを他の族についても現在検討中である。しかし残念なことに色指数の誤差が現在のところかなり大きいし、そもそもそれらのデータの数が少ない。自転のデータは大変重要であるが数えるほどしかない。小惑星のデータは最近急速に増えつつあるようだが、小

惑星の数はとにかく多い。現在、新しいデータによって新しいテーマ、疑問が多く生じ、ある意味では楽しい時期と言えるが、一歩進んでこれらの問題を解決しようとするとデータ不足というかべにぶつかる。ファミリーの問題は小惑星の内部構造や組成についての手がかりを与え、衝突の力学を調べるよいサンプルともなり、小天体の衝突による進化過程の研究の諸問題を集約して持っている。族の系統的な観測および研究の重要性を特に強調したいと思う。

## お知らせ

### 東京大学理学部天文学教室助教授公募

下記により公募いたします。

1. 公募人員 助教授 1名
2. 専門分野 天文学
3. 着任時期 決定後なるべく早い時期

4. 提出書類 履歴書、研究論文リスト、推薦書(他薦の場合)
5. 締切期日 1982年11月30日(必着)
6. 宛先 (〒113) 東京都文京区弥生 2-11-16  
東京大学理学部天文学教室主任  
堀 源一郎

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価380円(〒70) '82-12月号・11月5日発売!

## 12月のおもな内容

- ★年末の12月30日、今年2回目の皆既月食。宵から始まって最高の条件の月食です。藤井旭さんのガイドで。
- ★来年はどんな天文現象が見られるのでしょうか? 好条件の木星がかくされる星食もあり、夏のペルセ群もこれまた好条件。1983年の天文現象をまとめて紹介。
- ★東京天文台に新しく建設された西独カールツァイス製の子午環を吉沢正則さんが、くわしく解説。
- ★この夏ギリシアで開かれた天文学会の様子を大脇直明に語ってもらいました。
- ★ほかに、12月30日の月食撮影ガイド、マイコン教室、テレスコープ、私の愛機、流星群・彗星ガイド…など

# 創刊35年 他の追隨を許さない! 天文年鑑 1983

予定価480円★11月中旬発売

B6判のハンディサイズ、  
星空への便利な案内書。

毎年、毎年 爆発的に売れています

1月から12月までの空の案内のほかに、

惑星、小惑星、流星、彗星、  
新星、変光星の一年間の予報、  
天体観測に最低限必要なデータ、  
前年の天文界トピックス  
などを満載した 観測必備書

誠文堂新光社 〒101 東京都千代田区神田錦町1-5  
振替東京7 6294 電話03(292)1221