

小惑星から微惑星へー太陽系小天体の衝突

中村 昭子

〈宇宙科学研究所 〒229 相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: akiko@planeta.sci.isas.ac.jp

固体天体の直接衝突に関する研究について、これまでの歩みと最近2, 3年の動向を紹介する。衝突の化石（以下に述べるように、クレーターや小惑星の族）についてのデータが収集されると平行して、そのミニチュアの再現が実験室でおこなわれ、経験則がつくられてきた。経験則にあきあたりず、衝突破壊の詳細な物理的過程を明らかにしようというあたらしい挑戦もはじまっている。

1. キーワードは「衝突」

1992年12月には小惑星4179 トータチスが地球へ接近¹⁾、1994年7月にシューメーカー・レビー第9彗星(SL 9)が木星へ衝突²⁾と、このところ太陽系小天体の衝突がちょっとした話題となっている。SL 9のような現象がおこる頻度は1000年に一度、直径1 kmの小惑星が地球に衝突する頻度は100万年に一度である。より大きな小惑星は数が少ないので衝突確率はもっと小さい。われわれが地上で目のあたりにする km 以上の大きさの太陽系天体の衝突現象は、このようにたいへん稀である。けれども、45, 6億年まえに太陽系星雲の中で円盤状の塵の層から微惑星と呼ばれる直径1~10 kmの天体が誕生して以来、そのような天体どうしの直接衝突がさかんに繰り返された結果、惑星や衛星がつくられたと考えられている。

太陽系形成論を背景にした惑星集積過程の研究は、重力多体系専用計算機などをもちいて近年パワフルに進められている³⁾。いっぽう、1960, '70年代には、いろいろな天体表面にきざまれた衝突の記録を解読してそれぞれの天体の集積後の衝突史をさかのぼる研究がおこなわれた。たとえば、月の高地のクレーター密度は海のそれよりずっと多いことが知られている。月の海は高地よりも比較

的最近つくられた地形なのである。場所ごとのクレーター密度とアポロによってもたらされた月の石の絶対年代測定とから、月面に対する衝突頻度の時間変化が調べられ、今から40億年以上前には月に対して、したがって地球に対しても、現在の100~1000倍の頻度で衝突がおこっていたと推定されている⁴⁾。

惑星や衛星の遠隔観測で得られるデータを手がかりに衝突天体の大きさや物性などについての情報を得ようと、このころ、NASAのエイムズ研究所を中心にクレーターをつくる実験がさかんにおこなわれた。現在の固体惑星・衛星、小惑星に対する典型的な衝突速度は数 km/s~数10 km/sである。(衝突速度のめやすは、天体の脱出速度である。したがって、微惑星集積の初期には衝突速度はずっと小さかったと考えられている。)そこで、火薬のエネルギーによる加速装置(図1⁵⁾)をもちいて、金属やガラスの弾丸を速度数 km/sで岩石や砂に打ち込み、できたクレーターの大きさや形、放出物の分布が調べられた。実験室内で実現できない規模については、野外での地下爆発実験によってつくられたクレーターのデータが引用され、図2⁴⁾に示されるようなクレーターの直径と衝突の各種パラメータ(衝突天体の大きさ、衝突速度、密度、衝突される側の密度、強度、表面重力など)との間の経験則がつくられた。

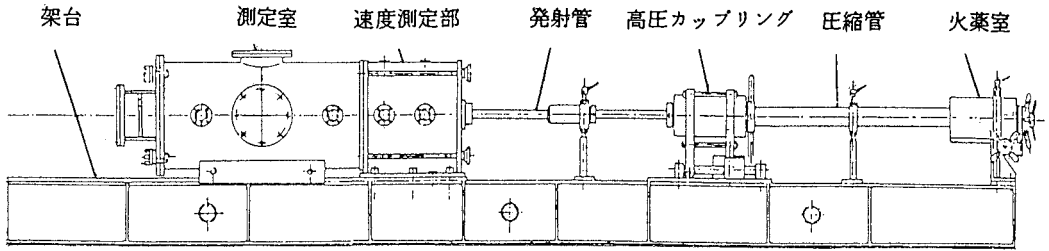


図1 宇宙研の2段階軽ガス銃。火薬の燃焼ガスによって押された圧縮管の中のピストンが、ヘリウムガスを高温・高圧に圧縮する。このヘリウムによって発射管中の弾丸を加速する。弾丸の速度は速度測定部の2本のレーザービームを切る時間間隔により決定される。

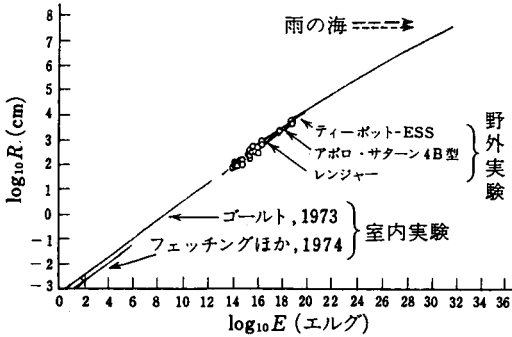


図2 クレーター半径と衝突エネルギーの関係の一例。クレーターサイズが大きくなると重力が効くのでクレーターが成長しにくくなる。

2. 衝突で「壊れる」

ガリレオ探査機によって写真が撮られた小惑星951 ガスプラや243 アイダは球からはずれたいびつな形をしている。これら小惑星は軌道の確定しているものでも5000個以上あり、おもに火星と木星の軌道間のドーナツ状領域に分布し、そこでの相対速度は5 km/s 余りである。小惑星帯は衝突破壊の天然の実験室といわれることもある。大きさのあまり変わらない天体どうしがある程度の速度で衝突すれば、両天体ともばらばらにこわれてしまうだろう。ガスプラやアイダは、そのようにしてより大きな天体が壊れてできた“かけら”だと考えられている。

クレーター形成から天体全体の破壊へと転じるのは、はたしてどのような衝突条件においてだろうか。天体表面にみられる最大クレーターの直径

は、天体直径のおおよそ3分の1かそれより小さいといわれている⁴⁾。したがって、それより大きなクレーターをつくるような衝突がおこると、天体全体が壊れると考えることができる。そのぎりぎりの衝突エネルギーは、仮にクレーターの直径が図2に示されるように衝突エネルギーのおおよそ1/2乗に比例するならば、天体の体積で決まることになる。実験的にも、クレーター形成から全体の破壊へと転じるときの衝突のエネルギーを全質量で割った量がこわれやすさの一つの指標を与えて着目されてきた。この量に密度をかけると圧力と同じ次元、すなわち、圧縮強度や引っ張り強度とおなじ次元をもつ。

エイムズ研究所で一連のクレーター実験を率いていたD.E. Gaultらは、テクタイトと呼ばれるガラス質の数cmサイズの固体粒子の衝突寿命を推定しようとした。そこで、それまでの半無限の標的のかわりに直径数cmのガラスの衝突破壊実験をおこなった。衝突速度と弾丸の大きさをかえてみた結果、このガラスはおおよそ 10^7 ergs/gよりはげしい衝突において「壊れる」—最大破片の質量が全質量の半分以下になる—ことがわかった。

A. Fujiwaraらは、小衛星や小惑星の衝突破壊を調べるといふあたらしい見地からサイズ数cmの玄武岩を破壊し、'70年代後半に最初の実験結果を発表した。以後、国内外のいくつかのグループによって、物質や衝突速度などのパラメータを変え「壊れる」条件・破片のサイズ分布・破片の速度などを求める実験がおこなわれた。図3⁶⁾は、こ

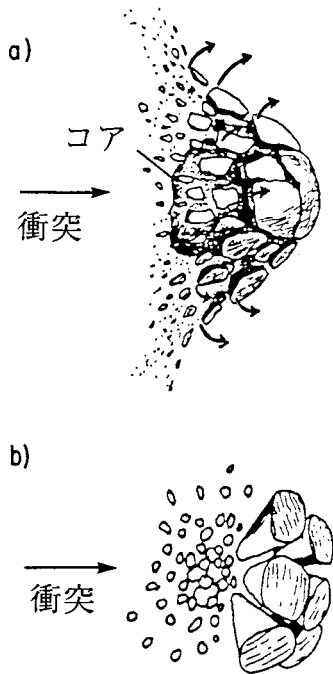


図3 典型的な衝突破壊様式。a) 高速衝突(玄武岩では1km/s以上)でみられるコア型破壊。衝突で発生した圧縮波が衝突点の裏側表面に達して引っ張りの波として反射される。この引っ張り応力によって表面からはがれるように破片ができる。b) 低速衝突や空隙率の大きい物質でみられる, コーン型破壊。

これらの研究であきらかにされた典型的な破壊様式をしめす。実験室スケールではおよそ 10^5 (氷)~ 10^7 ergs/g (岩石)の衝突で「壊れる」ことがわかってきた。具体的には、10 cm と 5 mm の石が速度 5 km/s で衝突すれば大きい方の石の半分の体積が砕け散るのである。実験室の結果を小惑星のような天体にいかに外挿するかは決着のついていない問題であり、従来の次元解析のほか、実験結果を再現する数値シミュレーションを用いて天体の衝突破壊の問題に臨む研究がおこなわれつつある。

3. 小惑星の族と破片の速度

1918年にK. Hirayamaによって発見された小惑星のエオス、テミス、コロニスなどの族(軌道長半径・離心率・軌道傾斜角空間で密集した小惑

星の一群)は、直径100~200 km ぐらいの小惑星が激しい衝突でばらばらに壊れて、それぞれのかげらが互いに少しずつ異なった軌道要素を持つにいたったものであると考えられている。もしそうだとすると破片は互いの中に働く重力をふりきる速度を得る必要がある。ちなみに、前出のアイダはコロニス族に属するとされている。族の条件をたいへんゆるくとした分類では、ガスプラもフロラ族の一員とされている。以下ではある種の隕石の供給源として注目されてきたベスタをとりあげ、破片の速度について詳しく述べることにする。

小惑星は、可視から近赤外にかけての表面反射スペクトルからいくつかのタイプに分類されている。4ベスタは、直径500 km 余りで3番目に大きい小惑星だが、1970年に近赤域のスペクトルが観測され、HED隕石とよばれる熱変成を受けた隕石の母天体候補と目された。ベスタの直径は内部分化、つまり、加熱を受けて層構造をもつのにじゅうぶんな大きさであると考えられた。ベスタと似た反射スペクトルをもつ大きな小惑星が他にないことも、HED隕石母天体説の根拠であった。一方で、ベスタから地上に隕石をもたらすメカニズムが単純ではないため、HED隕石母天体はベスタそのものではなく、ベスタのような天体ですでに観測にかからない大きさに壊れてしまったものという説もあった。

ところが最近、R.P. Binzelらは、軌道要素からベスタ族に分類されている小惑星をふくめて、可視の絶対等級が18等(直径10 km 相当)より暗いおよそ100個の小惑星の反射スペクトルを、キットピーク Michigan-Dartmouth-MIT (MDM) 観測所の2.4 m 望遠鏡で観測した⁷⁾。その結果、もともとベスタ族のメンバーの12個のほかに新しく8個の直径5~10 km の小惑星が同様のスペクトルを示すことを発見した。あらたに見つかった小惑星の軌道長半径は、ベスタのそれ(2.362 AU)から3:1の共鳴帯(2.50 AU)までにまるで道標のようにならぶ。小惑星がいったん3:1の共鳴帯

に入ると、木星の摂動を受けて近地球の軌道に入りやすいといわれている。そこで Binzel らは、ベスタとほかの天体の衝突によってじゅうぶんな速度をもってベスタ表層から飛び出した破片の一部が 3:1 の共鳴帯に達して最終的に地上にもたらされ、残りがベスタ付近から 3:1 の共鳴帯までに散らばったと考えた。Binzel らの発見の報告の 2 年前には、近地球軌道の直径 1~4 km の 3 つの小惑星が、やはりベスタや HED 隕石と似たスペクトルを示すことが報告されている。

反射スペクトルが自転とともに変化することから、ベスタ表面には大きなクレーターがあって地殻がはがれた部分があると推測されている。Binzel らの発見の自然な解釈は、ベスタそのものが HED 隕石の母天体だということである。したがって、このクレーターをつくった衝突によって、ベスタの他の部分の層序を保ちつつ数 km サイズの破片をベスタからの脱出速度 350 m/s 以上で放出することは可能かどうかを詰める必要ができた。

他方、A.M. Vickery は、月、火星、水星の大きなクレーター周りの 2 次クレーターをしらべ、クレーターからの放出物（1 個のかたまりとは限らな

いが、以下では破片と呼ぶ）の速度とサイズをみつめた⁹⁾。1 次クレーターから放出されたものの天体からは脱出できなかった破片が、1 次クレーターの周りに 2 次クレーターをつくる。1 次と 2 次クレーターの距離から（放出角度を仮定して）放出速度、つまりは破片が再び天体表面に達して 2 次クレーターをつくったときの速度が導かれる。2 次クレーターをつくった破片の衝突速度さえわかれば、先に述べたクレーターの直径についての経験則から破片のサイズが求められる。たとえば、直径 93 km のコペルニクスクレーターからは、1.5 km の破片が速度 400 m/s 前後で飛び出したと考えられる。ベスタから km サイズの破片を取り出すのも不可能ではなさそうだ。

月のクレーターからは、ある限られた破片サイズと速度についての情報が得られたが、さらに様々な衝突条件における破片の速度がどうなるかを明らかにすることは重要である。例えば、物質面の研究から火星（脱出速度 5 km/s 余り）起源とされるものの、激しい衝撃変成を経験していない SNC 隕石もまた、破片放出のメカニズムに対する疑問を投げかけているからである。

実験室での破片の速度を見てみよう。これまで

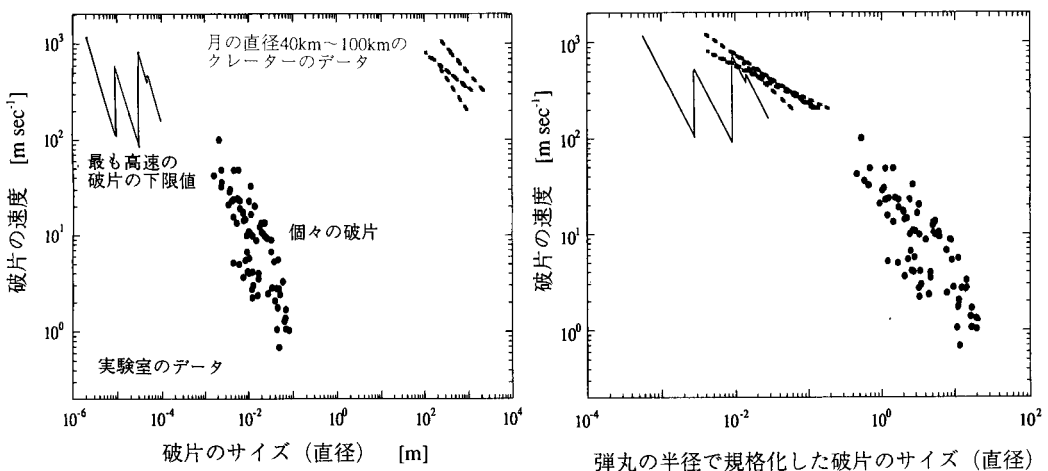


図 4 破片のサイズと速度の玄武岩実験データおよび月クレーターのデータ。右図で、月クレーターをつくった弾丸サイズは衝突速度を月の脱出速度と等しいとして経験則から導いている。この速度を10倍にすると弾丸サイズは数分の1になる。

のところ、重心系でみた破片の速度は直径1 cmのものでおよそ10 m/sであり、より小さな破片は大きな速度でとばされることが示されている⁹⁾。A. J. Gratzらは、SNC隕石の問題にたいして、衝突実験で作られた小さな破片を回収し衝撃変成の程度をしらべた結果、高い衝撃圧にさらされずに100 m/s以上の速度をもつものがあるという報告をしている。

図4に、2次クレーターと実験室のデータをしめす。破片のサイズは何桁も異なるが、それぞれの破片をつくった“弾丸”の大きさを規格化すると、速度は同じ領域に収まるように見え、そのような規格化を説明するようなモデルも提案されている¹⁰⁾。

4. 破片のサイズ分布

星間減光を説明するダストのサイズ分布としておなじみのMRN分布では、微分サイズスペクトルのべき指数の値は-3.3~-3.6である。また、現在の小惑星帯の直径10~1000 kmの天体のサイズ分布は-3~-3.5のべき指数をもつといわれている。同様の分布は、月などの天体表面のクレーターにもみられ、クレーターをつくった天体のサイズ分布をほぼそのまま表わしていると考えられている。先に述べたクレーター直径と衝突エネルギーの関係式に、月に衝突する天体のとりうる速度をあてはめた結果である。

衝突破片もサイズが小さいものほど数が急激に増すことが知られている。衝突破壊実験による破片の質量分布は、図5に示すように細かい破片領域では、実験条件によらず互いによく似たべき乗則で書けて、

$$N(\geq m)dm \propto m^{-\gamma}dm,$$

$\gamma \cong 2/3$ (岩石) である。H₂O氷についてはやや大きな値、 $\gamma = 0.9 \sim 1.0$ が得られている。微分サイズスペクトルに直すと、べき指数は岩石でやはりおよそ-3、氷で-4となる。サイズ分布の類似に魅了された研究者たちによる、この指数をめぐる議

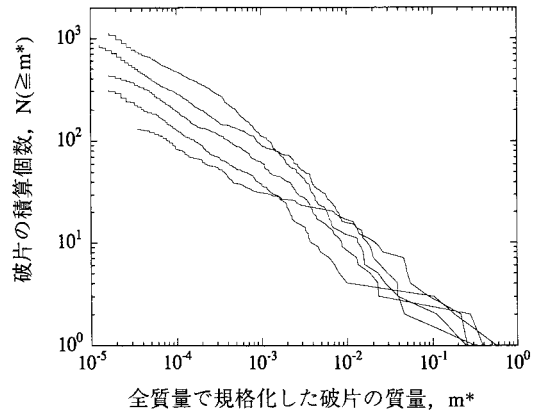


図5 破片の質量分布の例。この例ではほとんどの室内実験と同様、全質量 ≅ 標的質量である。

論は絶えない¹¹⁾。

一方、大きい破片領域のサイズ分布は衝突条件を反映しやすい。したがって、破壊のモデルをつくるにあたってはこれを再現することが望まれるし、小惑星の族内の現在のサイズ分布からその族ができたときの衝突条件を読みとろうという試みもなされている。例えば、W. Benz と E. Asphaug は SPH による3次元数値シミュレーションをおこない、大きなクラックの成長を陽に追って実験室でみられるギザギザの破片をつくってみせた¹²⁾。彼らは、Grady-Kipp モデルと呼ばれる、クラック（亀裂）の活性化と成長のモデルを採用している。Grady-Kipp モデルでは、ある歪より小さな歪で成長を始めるクラックの種の空間密度が歪のべき乗（べきの値と比例定数は物質によってちがう）で与えられる。いったん活性化されたクラックは音速の何分の1かの速さで成長し、クラックの占める空間密度が増すにつれ応力を伝えるにくくなる、ということで破壊の効果が入れられている。

5. 小惑星、彗星、微惑星

上記のように、衝突破壊実験をシミュレーションで再現して見せようという野心的な研究が行われるようになった。この動きに刺激されて、今ま

での破片の回収と観察を中心とした模型実験とは一線を画す実験が行われるようになった。実験室のスケールすなわち直径 10 cm 程度の石や氷の破壊では、ものごと一衝撃波の伝搬と破壊の進行はまさに瞬く間に終わってしまう。M. Arakawa らは、超高速カメラを手に、氷の中を衝撃波が伝搬しクラックが成長する現場をとらえる実験をはじめた¹³⁾。このカメラでは、最高 2000 万コマ毎秒の速さで 10 コマぐらいの写真が撮れ、先に述べたようなシミュレーションと刻々の対比ができる。今後、シミュレーションと実験が互いに刺激しあって衝突破壊現象の物理過程が（ここでは触れなかったが化学過程も）明らかにされていくと期待される。

さて、微惑星や、微惑星がそのまま生き残たとされる彗星の衝突を論じるには、これらの天体がどのようなものであるかを知らなければならない。冒頭にひきあいにした SL 9 は木星重力で潮汐破壊されたというのがもっぱらの通説だが、そのためにはこの彗星の引っ張り強度が 10^9 dyne/cm² と粉体なみであることが必要である¹⁴⁾。ながらく、われわれは、彗星とは塵がふわりとあつまった天体という印象をもっていたが、幸運にも、その証拠をつかんだ感がある。小惑星的物質に対して得られつつある衝突と破壊にたいする知見が、その素性があきらかにされつつあり遠くない将来直接手にすることができるかと期待される、小惑星・彗星、そして微惑星の衝突現象などへ応用されていくであろう。

参 考 文 献

- 1) 磯部 瑋三, 1994, 天文月報 87, 5
- 2) 渡部 潤一, 1994, 天文月報 87, 1
- 3) 井田 茂, 1992, 天文月報 85, 5
- 4) 水谷 仁, 1980, クレーター科学(東京大学出版会)
- 5) 藤原 顕, 他, 1982, 宇宙研科学衛星シンポジウム, 288
- 6) Fujiwara A. et al., 1989, in Asteroid II, eds. Binzel R. P. et al. (Arizona Press) p. 240
- 7) Binzel R. P., Xu S., 1993, Sci 260, 186

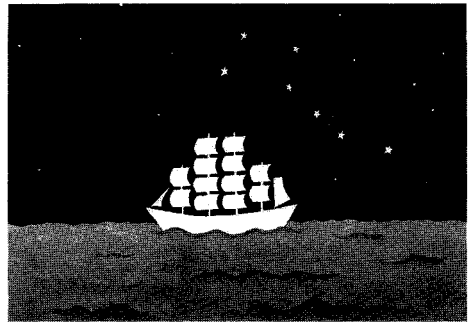
- 8) Vickery A. M. 1986, Icarus 67, 224
- 9) Nakamura A. M., 1993, ISAS Report 651
- 10) Melosh H. J. 1984, Icarus 59, 234
- 11) 例えば, 竹内 均, 水谷 仁, 1968, 科学 38, 622 ; Grady D. E., Kipp M. E., 1985, J. Appl. Phys., 58, 1210
- 12) Benz W., Asphaug E., 1994, Icarus 107, 98
- 13) Arakawa M. et al., 1993, Proc. of the 26 th ISAS Lunar and Planetary Symp., 137
- 14) 水谷 仁, 他, 1993, 宇宙研宇宙空間原子分子過程研究会

From Asteroids towards Planetesimals : Collision among Small Solar System Bodies

Akiko M. NAKAMURA

Institute of Space and Astronautical Science

Abstract: Collisional process among solar system bodies have been decoded from craters on airless planets and satellites, and more recently, from asteroid families by using empirical scaling laws based mostly on small-scale laboratory impact experiments. Physical model for the collisional fragmentation is studied by numerical simulations and neat experiments follow the simulations.



「真理の大洋へ」

小北純子 (和歌山県)