

平山族と衝突実験

中村 昭子

〈神戸大学大学院理学研究科 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: amnakamu@kobe-u.ac.jp



天体衝突の結果としての平山族は、小スケールの室内衝突破壊実験で得られた知見が天体スケールに外挿できるかどうかの情報をもたらしうる貴重な手がかりであった。1990年代以降、衝突実験の結果は小天体衝突の数値シミュレーションの検証に用いられるようになり、その後、平山族の再現は数値シミュレーションで行われるようになった。一方、小惑星探査や望遠鏡観測により、衝突実験にもとづく解釈がより直接的に適用できる成果が収集されるようになった。

1. 衝突実験にとっての平山族

平山族が爆発起源なのか衝突起源なのか、これを判別しようとする一連の実験研究が1930年代に行われたことが、1997年の天文月報の記事「理研での小惑星衝突実験と鈴木清太郎」¹⁾に紹介されている。爆発実験で得られた破片の大きさ分布と小惑星の大きさ分布が比較され、破片の自転の様子、特に向きが調べられた。他方、石ころ球などを最大高さ6 mから鉄の厚板に落とす衝突実験が行われ、破片の質量や速度が測定されるとともに破片形状が観察された。また、球同士の衝突破壊実験も行われたとのことである。小惑星が爆発起源か衝突起源かの決着はつかなかったとあるが、80余年前の小惑星の破壊に関する実験で破片の各種特性の測定が行われていたことがわかる。

1970年代には、小惑星衝突ではなく微惑星形成などの太陽系初期の固体衝突への興味から、氷、岩石、土塊の1-50 m/sの低速度での衝突による跳ね返りや破壊に関する平面への自由落下衝突実験が行われた²⁾。このような低速度衝突の研究は、太陽系初期の固体衝突やリング粒子の衝突の素過程を明らかにする目的で、現在も実験と数値シミュレーションの両面から進められている。

一方で、小惑星帯での典型的な衝突速度は数km/sである。二段式軽ガス銃を用いてそのような速度まで加速した固体弾丸を岩石などの標的に衝突させて太陽系内での高速度固体衝突を模擬する実験研究は、1960年代以降、NASAのAmes Vertical Gun Range (AVGR)を拠点の1つとして行われてきた。日本でも、1970年代から二段式軽ガス銃を用いた高速度衝突破壊実験が行われている³⁾。1982年の天文月報には、「衝突実験屋のみた小惑星の構造」⁴⁾という記事で、平山族を作った衝突がどのような規模であったかの推定方法と結果が紹介されている。記事の中で、平山族のメンバー⁵⁾(のサイズの大きいものは、自己重力で再集積した「破片の積重ね構造」(ラブルパイル構造)をもつと予測されていた。当時、小スケールの室内衝突破壊実験で得られた知見が、大スケールに外挿できるかという観点で、実験結果と小惑星族との比較は重要だと認識されていた⁶⁾。

平山族発見75周年記念として、1993年11月29日から12月3日にかけて、宇宙科学研究所で国際研究集會が開催された。ちょうど、初めての小惑星探査となる木星探査機GalileoによるGaspraのフライバイ探査が1991年に、次いで、平山族の一つ、コロニス族のメンバーのIdaのフライバイ

イ探査が1993年に行われたという時期であった。さらに次のステップとして、フライバイより進んだ小惑星探査が現実味を帯びてきた時期であった。次章では以降の四半世紀の間に、小惑星衝突破壊に関する衝突実験研究に対してインパクトがあった、いくつかの取り組みや進展について紹介する。

2. 小惑星衝突破壊研究の近況

Yarkovsky効果とYORP効果の台頭

ある小惑星族の中の小さなサイズのメンバーと主要な（大きなサイズの）メンバーの軌道要素は、差が大きい傾向がある。この傾向は、1990年代以前は、衝突破壊時の破片のサイズと速度の関係——小さな破片には大きな速度を持つものがある——を反映していると解釈されていた⁷⁾。ところが、1990年代半ばになって、天体表面からの非等方な熱放射が軌道運動を変化させる効果（Yarkovsky効果）の重要性が認識されるようになった。これは、特に小さな天体に対して無視することができず、小惑星の軌道進化計算に考慮されるようになった⁸⁾。

小惑星の自転についても衝突以外の効果が注目されている。小惑星の自転は、衝突破壊時に獲得したもの、または、多数回の小規模衝突の結果であると考えられていた。しかし、太陽光の散乱と熱放射の異方性に因るトルクで自転状態が変化する Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP) 効果が、近年、観測で確かめられるようになった。例えば、NASAのOrigins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer (OSIRIS-REx)の探査対象であるBennuはYORP効果によると考えられる自転の加速が見つかっている天体のひとつである⁹⁾。

興味深いことに、衝突破壊実験で得られた個々の破片が持つ回転運動エネルギー (E_r) と並進運動エネルギー (E_t) の比を、小惑星族メンバーの観測結果と比較したところ、実験で得られたエネ

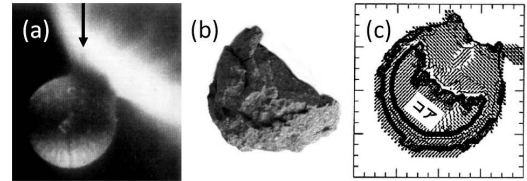


図1 直径6 cm玄武岩の玄武岩球へ直径7 mmの弾丸を衝突させた実験。(a) 衝突後約0.1 msの高速度カメラ画像¹²⁾。矢印は弾丸の衝突軌道を示す。(b) このような衝突で形成される最大破片(コアと呼ばれる)¹⁸⁾。(c) 数値シミュレーションの結果(衝突後40 μ s)¹¹⁾。太い線は破壊が進んだ部分を表す。コアができています。

ルギー比 (E_r/E_t) は小惑星の観測で得られた比よりもはるかに大きいことが示された¹⁰⁾。その原因として、実験室と天体のスケールの違い（物質特性の違い、衝撃波のプロファイルの違い、あるいは他の未知の要因）と、小規模多数回衝突による自転速度の減少とが検討され、後者が有力ではないかと言及されていた。今ならば、まず、Yarkovsky効果とYORP効果の寄与について考察がなされたであろう。

小惑星衝突破壊の数値シミュレーション

1990年代前半に、破壊モデルを組み込んだ衝突破壊の数値シミュレーションコードが開発された。数値シミュレーション¹¹⁾では、図1に示すように、筆者らによる岩石の弾丸衝突破壊実験¹²⁾によって得られた最大破片の大きさ・形状・速度と似た結果が得られた。ついで、破壊後の破片運動を追跡するコードの拡張が行われ、小惑星の衝突破壊による族形成や¹³⁾、小惑星Vesta上の巨大衝突盆地の再現などの数値シミュレーションが行われた。

探査機データや衛星の観測から推定された小惑星の密度が対応する隕石の密度に比して小さく、内部に体積で数割を占める空隙を含むらしいと考えられるようになったため、空隙を含む標的の実験と数値シミュレーションも行われた¹⁴⁾。破壊モデルが組み込まれた数値シミュレーションコードは、現在も複数のグループによって開発が進め

られており、実験室の衝突破壊データがその検証に用いられている。

ラブルパイル天体の発見

少なからぬ小惑星が、衝突で破壊されたのちに再集積したラブルパイル天体であることは、小惑星探査が行われる以前に衝突実験の結果からも予測されていた⁴⁾。小惑星衝突破壊の数値シミュレーションでも同様に、破壊後にできる大きな天体はラブルパイルだと予測されていた¹³⁾。しかし、はやぶさのイトカワ到着以前にラブルパイルと認定された天体はなく、かたや、イトカワのようなサブキロメートルの天体がラブルパイルであろうという予想を見聞きした記憶もない。少なくとも筆者の頭にはラブルパイルは全くなかった。むしろ、微小重力ゆえにイトカワ上のクレーターからの放出物のほとんどが重力圏を脱出することが予想され、そのためにイトカワ表面がどれほど起伏に富むかが悩ましい問題であった（でこぼこの度合いによっては、はやぶさによるイトカワ試料の採取が困難になる）。はやぶさの観測により、天体自体の小さな密度と、現在の大きさの天体上では形成されそうにない大きな岩塊の存在が明らかとなり、イトカワは衝突再集積で形成された、すなわちラブルパイルと認定された初めての天体となった¹⁵⁾。はやぶさ2とOSIRIS-RExが昨年到着して以降「その場」観測を行っている直径約1キロメートルと0.5キロメートルの小惑星リュウグウとBennuも、いずれもラブルパイル天体と認定された^{16), 17)}。

実験室の模擬物と小惑星の岩塊・火球・小惑星

天文月報の記事「衝突実験屋のみた小惑星の構造」⁴⁾には、「破壊現象は身近であるが、(中略)、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、このために小惑星のおもちゃ(石の塊)に弾丸を衝突させて破壊する実験を行う」とある。実験室の石の塊は小惑星とは何桁もサイズスケールが異なるおもちゃであり、実験で用いられていた比較的均質な石の塊は、現実の小惑星の

複雑な内部構造や組成を単純化したおもちゃでもある。

はやぶさ以前のIda探査やEros探査でも、小惑星表面の岩塊の画像が取得されてはいたが、はやぶさ搭載のカメラによって撮られた岩塊には、表面のテクスチャーを観察できるものもあり、それらは、平たい面を持ったもの、凹凸の面を持つもの、層構造を持つように見えるものなど、さまざまでありながら、実験室の均質な石の破片の形状と似ていた¹⁸⁾。実験の破片形状は、かつては小惑星形状そのものと比較されたが、今や小惑星上の岩塊や回収試料の形状と比較されて、それらの来歴が議論されるようになった¹⁹⁾。

小惑星衝突における衝撃波の伝播や破壊の進行は、小惑星内部の構造や組成に依存する。ゆえに、小惑星のかけらである隕石を用いた衝突破壊実験も数は限られるが行われている。石の塊は大きいほど壊れやすい(強度が小さい)ことが知られているため、大きさの異なる隕石の静的破壊実験も着手されている。ところで、隕石は地球大気のフィルターで選別されたあとの小惑星物質である。すなわち、地球大気突入時に粉々に砕けた物質の元の塊は地上では入手できない。そのような

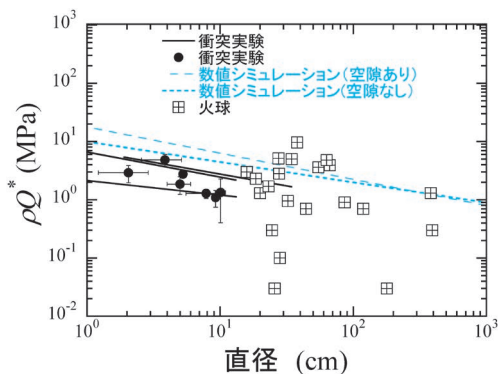


図2 衝突実験と数値シミュレーションから求めた小惑星模擬物の衝突破壊強度と火球の強度。実験は正面衝突の結果であり、数値シミュレーションは、斜め衝突(表面の法線方向から斜め45°の衝突)の結果である。文献20の図を改変。

脆い小惑星物質がどの程度の強度を持っていたかが、火球のデータとして明らかになってきた。火球が大気圏で壊れた高度から、その時の大気との相対速度と大気密度を推定し、火球が地球大気から受ける圧力（動圧）を火球の破壊強度（圧力の次元を持つ）と見なす。一方、衝突実験と数値シミュレーションからは衝突破壊に必要な単位質量あたりのエネルギー（ Q^* ）に標的密度（ ρ ）をかけて圧力の次元とした衝突破壊強度（ ρQ^* ）が求まる。これを比較した図2²⁰⁾からは、火球が幅広い強度を持つことがわかる。

小惑星衝突の過程と実験や数値シミュレーションの比較も可能になった。地上観測により、小惑星への衝突が起こってまもない時期の塵（破片カレゴリスカ）放出の画像が得られ、衝突条件（弾丸となった天体の衝突方向やサイズ）が議論されるようになった²¹⁾。はやぶさ2では、衝突装置（SCI: Small Carry-on Impactor）により2 kgの銅弾丸を2 km/sで衝突させてリュウグウ表面にクレーターを作ることに成功し、分離カメラ（DCAM3: Deployable CAMera 3）から放出物を観測し、はやぶさ2搭載機器によるクレーター画像等の情報が得られた。この実験により、リュウグウ表層物質の強度などの手がかりが収集されたようである²²⁾。小惑星に対するさらに大掛かりな衝突実験として2022年にNASAなどによりDouble Asteroid Redirection Test (DART) ミッションが計画されている²³⁾。

25年前と比べて、小惑星も小惑星衝突もはるかに身近で具体的にになった。

参考文献

- 1) 横尾広光, 1997, 天文月報, 90, 273
- 2) Hartmann, W. K., 1978, Icarus, 33, 50
- 3) 中村昭子, 1994, 天文月報, 87, 329
- 4) 藤原顕, 1982, 天文月報, 75, 300
- 5) 伊藤孝士, 2019, 天文月報, 本号
- 6) Fujiwara, A., 1982, Icarus, 52, 434
- 7) Zappala, V., et al., 2002, in Asteroids III, eds. Bottke, W. F., et al. (Arizona Press)

- 8) Bottke, W. F., et al., Ibid
- 9) Hergenrother, C. W., et al., 2019, Nat. Commun., 10, id. 1291
- 10) Fujiwara, A., 1987, Icarus, 70, 536
- 11) Benz, W., & Asphaug, E., 1994, Icarus, 107, 98
- 12) Nakamura, A., & Fujiwara A., 1991, Icarus, 92, 132
- 13) Michel, P., et al., 2001, Science, 294, 1696
- 14) Jutzi, M., et al., 2009, Icarus, 201, 802
- 15) Fujiwara, A., et al., 2006, Science, 312, 1330
- 16) Watanabe, S., et al., 2019, Science, 364, 268
- 17) Laretta, D. S., et al., 2019, Nature, 568, 55
- 18) Nakamura, A., et al., 2008, Earth, Planet. Space, 60, 7
- 19) Tsuchiyama, A., et al., 2011, Science, 333, 1125
- 20) Collins, G., et al., 2019, in Shock Phenomena in Granular and Porous Materials, eds. Vogler, T. & Frenzenberg, A. (Springer) in press
- 21) Ishiguro, M., et al., 2011, ApJ, 741, L24
- 22) Arakawa, M., et al., 2019, 日本地球惑星科学連合2019年大会, PPS03-03
- 23) <https://www.nasa.gov/planetarydefense/dart> (2019年6月21日閲覧)

Hirayama Families and Impact Experiments

Akiko M. NAKAMURA

Graduate School of Science, Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan

Abstract: Hirayama families as results of asteroid collisions were valuable clues which can provide information on whether the findings obtained in a small-scale laboratory impact disruption experiment can be extrapolated to the planetary scale. Since the 1990s, the results of impact experiments have been used to verify numerical simulations of small body collisions, and thereafter, the reproduction of the Hirayama families has been performed by numerical simulations. On the other hand, asteroid explorations and telescope observations have yielded results that can be interpreted directly based on impact experiments.