

## 特集「衝突実験」

## 二段式軽ガス銃による研究

中村昭子<sup>1</sup>，門野敏彦<sup>1,2</sup>

1981年11月，京大理学部の物理教室に二段式軽ガス銃が設置された（図1：写真a）．写真右端の人物は，この二段式軽ガス銃の導入および運転に中心的役割を果たしてきた，藤原顕氏である．藤原氏は，1970年代後半より京大工学部航空工学科の二段式軽ガス銃を用いて小天体の衝突破壊模擬実験に着手していた．1982年以降は，この自前の銃を使ってそれ以外の研究分野も開拓してきた．銃は，1992年秋，藤原氏の宇宙科学研究所への移動とともに宇宙研特殊実験棟に移された（図1：写真b）．筆者らは，1980年代末に藤原氏とこの銃とに出会い，いくつかの研究テーマに関わってきた．本稿では，われわれの視点から，この二段式軽ガス銃による主として80年代末からの研究の成果を紹介する．

二段式軽ガス銃では，まず，火薬の燃焼によってピストンが加速され，このピストンによって軽

ガスが圧縮され弾丸が加速される（図2）．ここでは安全のためヘリウムガスが用いられているが，理論的には水素の方が到達速度は大きい．われわれの銃では，発射管を傷つけないように弾丸はプラスチック（主としてナイロン球）である．金属や岩石を弾丸として用いたい場合は，プラスチックの円柱（サボ；sabot）に取り付けたり埋め込んだりする．直径7mm以下の弾丸を数km/sの速度で1日数発撃つことができる．最高速度は約5km/s，1日あたりの最大（成功）射出回数は6回である．

この銃を使ったこれまでの主な研究テーマとしては次のものが挙げられ，それぞれの年間実験（弾

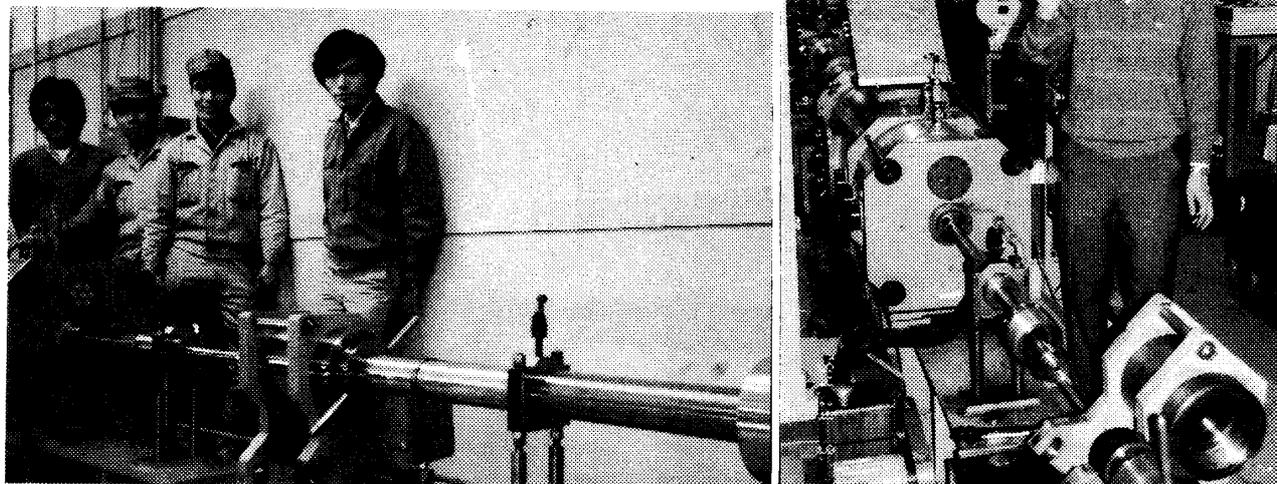


図1．藤原氏と銃．a（左）1981年京大にて，b（右）1994年宇宙研にて．

<sup>1</sup>宇宙科学研究所，<sup>2</sup>京大理学部物理学第二教室

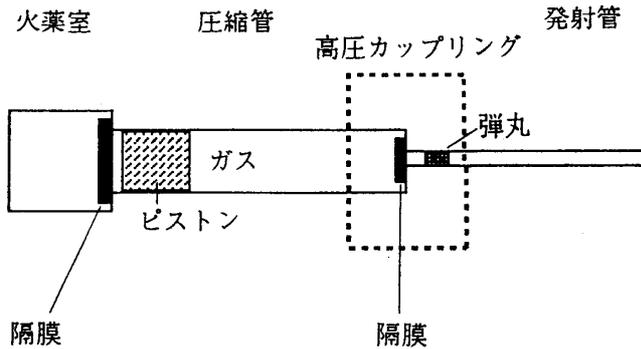


図2. 二段式軽ガス銃の模式図

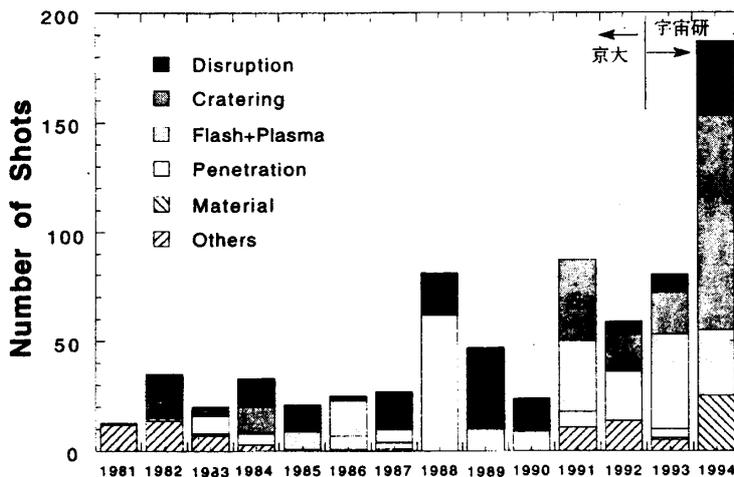


図3. 二段式軽ガス銃利用頻度の推移. 1994年では, 電通大の利用回数が80発を超える.

丸射出) 回数の推移をグラフにしたものを図3に示す.

1. 脆性物質の衝突・破壊と破片の運動 (“Disruption” と “Cratering”)
2. 衝突による発光, プラズマの発生 (“Flash+Plasma”)
3. 衝撃波による物質変成 (“Material”)
4. 低密度 (固体) 物質による高速粒子の減速と捕獲 (“Penetration”)

以下にそれぞれの内容を述べる.

## 1. 脆性物質の衝突・破壊

クレーター形成実験や破壊実験は, 1980年代の特に前半に国内のいくつかのグループで盛んになった. 二段式軽ガス銃による実験は, 結果的に, 衝突速度の大きい領域でのデータの取得を分担す

ることになった. 弾丸を岩石等の標的に衝突させて, クレーターの大きさや形状, 破片のサイズ, 形, 速度, 回転速度を求める実験が行われ[1], 小惑星, 特に小惑星の族について知られている観測事実との比較がなされたり, 小惑星帯の衝突進化のシミュレーションに取り入れられたりしてきた. 現在の小惑星帯での相対速度は5km/sぐらいとされていて二段式軽ガス銃の守備範囲である. また, 小惑星は, 1つの岩のかたまりであっても多数の岩 (mega-regolith) が重力で集まったものであっても, その衝突破壊過程には脆性物質の特徴が現われる程度の (自己重力が大きすぎない) 大きさであると考えられる. 加えて, その数が多いことから衝突実験の魅力的な研究対象である. 破壊の様式やスケージング則については, 本特集の他の記事に詳しいと思われるので, 以下ではわれわれの銃による研究の

うち特色のあるものから2, 3取り上げて紹介する.

実験後拾い集められた破片のサイズ分布では, 実験条件によらない決まった傾きが細かい破片の領域で現われることが名大のグループを中心に示されている. べきの値は, 微分サイズスペクトルでおおよそ-3である. このべきがどのサイズまで続くかは, エネルギー分配, さらには破壊のメカニズムの観点から興味深い. グレインサイズが30~300  $\mu\text{m}$  の玄武岩について, 発泡スチロールを使って小破片 (1~100  $\mu\text{m}$ ) が回収されサイズ分布が調べられた. 微分サイズスペクトルの「べき」は, 放出方向によって-3, -3.5であった[2].

隕石の中には, 火星や分化した大きな小惑星からやってきたと考えられているものがあるが, どのような衝突で母天体の脱出速度を超える速度を得たのだろうか. このように, 破片の速度分布は,

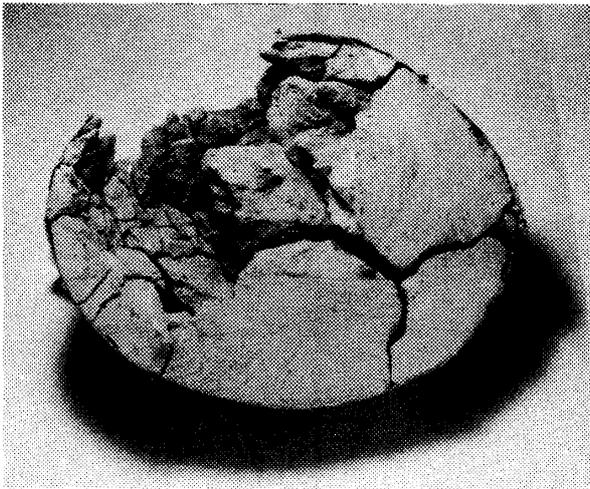


図4. フォボスの模型. 衝突破壊後に組み立てられたフォボスの模型の断面(南半球)を北極の方向から撮った写真. 模型は、密度 $1.9\text{g/cm}^3$ の粘土で最長径が $6.4\text{cm}$ (フォボスの約20万分の1の大きさ)につくられている. ナイロン球弾丸は、スティックニークレーターとフォボスの中心を結ぶ方向から速度 $3.8\text{km/s}$ で衝突した.

惑星間塵や隕石の供給・小天体上のレゴリス層の形成・小惑星の族の形成などに関係がある. 一桁余り( $\text{mm}$ ～数 $\text{cm}$ )のサイズ領域について、衝突破片の速度が高速カメラを用いて調べられ、小さな破片ほど高速のものがあることが示された. また、衝突点近傍から飛び出す細かくて( $< 100\ \mu\text{m}$ )速い( $> 100\text{m/s}$ )破片については、岩石標的の周囲に薄膜の標的を並べ、破片が薄膜につくる貫通痕の分布から速度が見積られた. こうして得られた破片のサイズ-速度関係と、月・金星・火星のクレーターからの放出物について推定されているサイズ-速度関係の比較が行われている[3]. 天体規模の衝突では、 $1\text{km}$ の大きさの放出物でも $100\text{m/s}$ をこえる速度をもつと推定されたが、小さな破片ほど高速のものがある傾向は実験室の場合と似ている.

クレーター形成に関連する研究では、例えば、火星の衛星フォボスと軸比が同じ楕円体の標的が用意された. 弾丸をフォボス最大のクレーターであるスティックニーの位置に衝突させ、フォボスに見られる溝地形に似た割れ目のパターンができ

るのが示されている[4] (図4).

## 2. 衝突による発光

高速衝突直後の現象として、入射および標的物質の蒸発、構成している分子の解離、原子の励起、イオン化、それにとまなう発光、などが考えられる. 京大では1984年くらいから、衝突時にみられる光のスペクトルを写真やCCDなどの光学素子を用いて調べたり、光ダイオードなどを用いて光の強度の時間変化を追ったりするということが行われてきた. この光には衝突直後の物質の物理、化学状態についての情報が含まれていると思われる. また電極を標的近くに設置するなどして、衝突により発生するプラズマを電氣的に測定することも行われた. 衝突による発光・プラズマ発生の研究は、衝突型ダスト検出器の開発につながる可能性がある.

一方、惑星の進化過程への応用も考えられる. 集積が進み惑星が成長して重力を増すと惑星表面への天体衝突の速度が増加し、衝突の際発生するガスがその後の惑星進化に重要な関わりを持つようになる(たとえば、惑星大気の生成、散逸、月の起源など). そこで、ガスが放出する光を利用して高速衝突により蒸発して生成されたガスの膨張の様子を調べることが考えられる. 真空中への球対称のガスの断熱膨張の問題は、特殊な初期条件の時にのみ解析解が見い出されているにすぎない.

玄武岩などの岩石どうしの衝突では衝突速度が $10\text{km/s}$ を越えないと蒸発しないとされており、岩石が完全に蒸発したときのガスの様子をわれわれの銃で直接見ることは難しい. しかし、ナイロンと金属や岩石の衝突では衝突速度 $4\text{km/s}$ でもナイロンが完全に蒸発していると考えられ、発生するガスの挙動はわれわれの銃の性能範囲で十分調べることができる. これまで、現象が非常に速いことなどもあってガスの挙動を空間的にとらえるこ

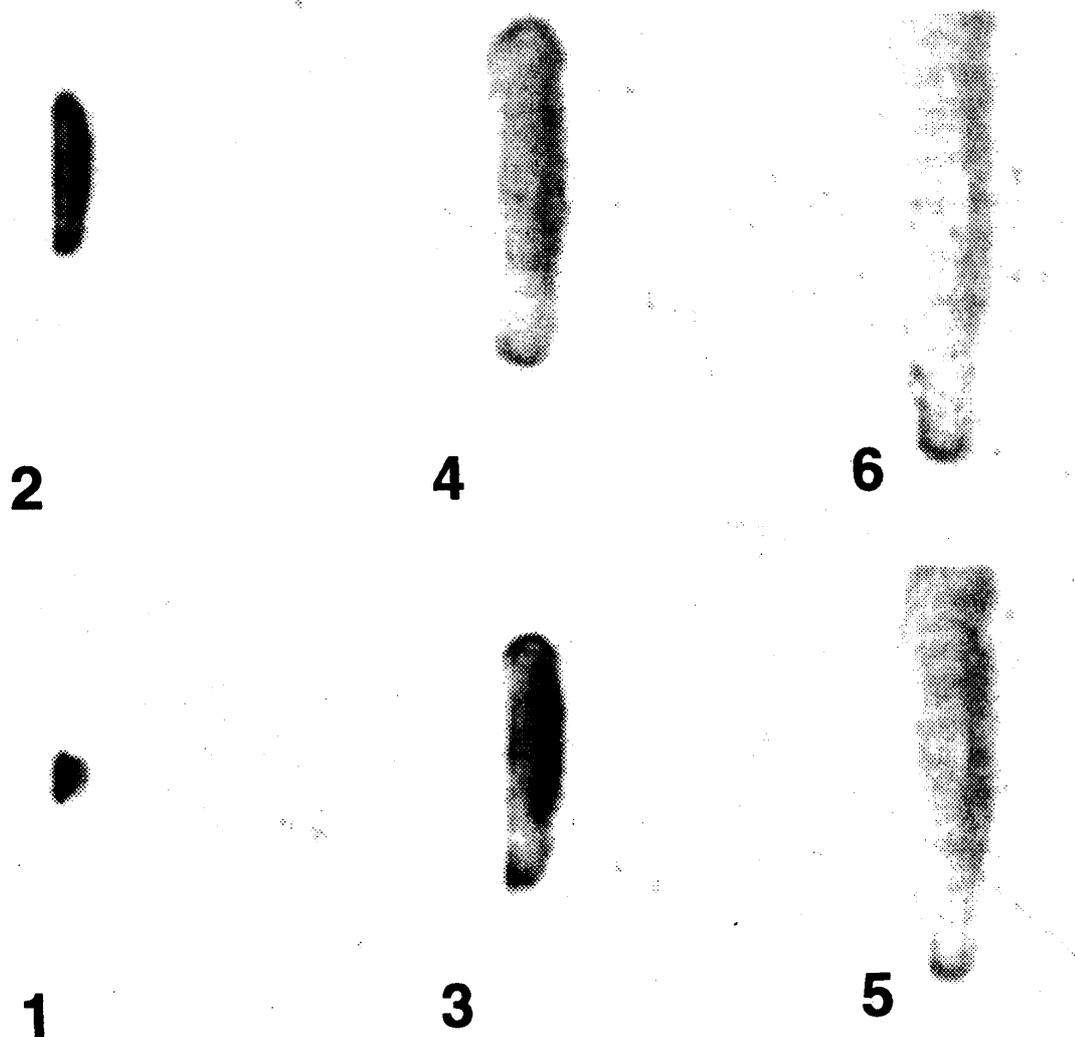


図5 衝突で発生したガス雲の膨張。ナイロンを速度4.1km/sで画面右から銅の表面に垂直に衝突させた。フレーム間隔は1 $\mu$ secである。ガス雲は銅の面に平行な方向にリング上に拡がっている。

とは行われていなかった。しかし、最近、高速応答の光ダイオードを数個並べてガスからの光がそれぞれの光ダイオードに入ってくる時間差からガスの先端の膨張速度を測定したり、イメージコンバータカメラを使って高速連続写真を撮影し、ガス雲の形、膨張速度、光度分布などを調べる実験が行われている[5] (図5)。

### 3. 衝撃波による物質変成

1993年より、衝突によって発生する衝撃波をエネルギー源として、水中でのアミノ酸の合成実験が行われている[6]。原始地球においては隕石の重

爆撃があったことが知られており、これら衝突は生体を構成する分子の非生物学的合成のためのエネルギー源として有力な候補である。材料物質としてアンモニア、ホルムアルデヒドの混合水溶液等を用い、これらをステンレス製のケースに封入し、ケースの外側表面に弾丸を高速衝突させてサンプル中に衝撃波を走らせる実験が行われた。衝突実験後、回収されたサンプルは、横浜国大において高速クロマトグラフィーを用いてアミノ酸の同定、定量が行われた。現在、グリシンなどの生成が確認されており、G-value (molecule / eV) として $10^{-3}$ という値が得られている。われわれの

銃では弾丸の直径が小さく，自由表面からの希薄波がサンプル中に走る衝撃波に追いつき圧力が効率よくあがらない。そこで，より径の大きい銃での実験も検討されている。

#### 4. 低密度（固体）物質による高速粒子の減速過程

1986年のハレー彗星回帰の際には各国の探査機がin situ観測を行い，彗星についての数多くの知見が得られた。次のステップとして彗星の塵または核物質を地球に持ち帰ることが必要である，という認識が持たれるようになった。探査機が彗星を横切の際に尾に含まれる塵をあつめ地球を持ちかえり分析する計画—SOCCER (Sample Of Comet Coma Earth Return)計画—が宇宙研とNASAの間で検討されていた。計画では彗星の軌道や燃料の制約から，探査機と彗星の相対速度が10km/sにもなっていた。したがって，塵の地上への回収計画において最も重要かつ困難な問題のひとつは，相対速度が10km/sという高速のしかも揮発性と思われる粒子をいかに捕集するか，ということである。

前述のようにこの二段式軽ガス銃では弾丸を～5 km/sまでの速度でしか飛ばせないため，実際の塵捕集装置の開発をこの銃だけで行うことは難しい。しかし，高速の粒子が低密度な物質に貫入，減速，停止する物理過程を理解することは装置の開発に際し非常に重要であり，この銃でも物理過程の解明に十分役立つ実験が行えると考えられる。そこでダストコレクターとして考えた下記3つの方法についての基礎実験が，1988年くらいから行われている[7]。

・発泡スチロール（密度0.01g/cm<sup>3</sup>）にナイロン球（直径7mm）を（図6），またエアロジェル（密度0.13g/cm<sup>3</sup>）とよ

ばれる，SiとOからなる原子レベルでみて低密度で透明なゲル体に銅粉（10～100 μm）を衝突させた。発泡スチロールの実験は神戸大のグループとの共同研究である。銅粉を飛ばすのには前述のサボが使用された。

・アルミニウムとポリエチレンの薄膜を弾道方向に重ねたシステムで，柱密度が発泡スチロール程度に小さいものをつくり，上の結果との比較がなされた。膜が薄くなり膜間隔が狭くなると，現象は次第に発泡スチロールに対するそれに近くなることが定性的に確かめられた。

・ナイロン球（直径7mm）を4.1km/sまでの速度で大気中（密度0.001g/cm<sup>3</sup>）に射出し，減速のされ方が質量損失のない場合の計算結果によく一致することが確かめられた。揮発性の高い物質でできた粒子のいろいろな気体中での減速のされ方や残存率を調べるのが，今後の課題であろう。

これら一連の実験の経験は，現在ではスペースデブリのコレクターの開発に生かされようとしている。

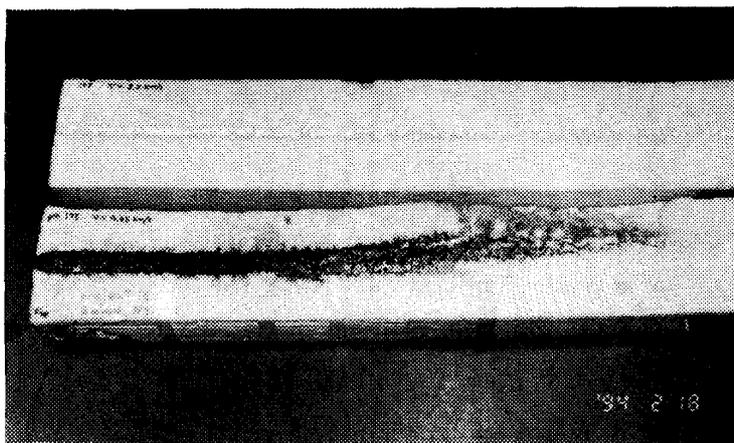


図6. 発泡スチロールにできた衝突貫入孔。低密度の物質に高い密度のものが衝突すると，いわゆるクレーターは形成されず入射粒子は標的物質中に貫入して孔をあける。孔の入口はほとんど入射粒子の大きさと同じである。入射粒子の運動エネルギーの消費に関係していると思われる孔の径と貫入深さ，および入射粒子の残存率などが調べられた。上は速度2.0km/s下は4.4km/sで，ともに直径7mmのナイロン球が左側から貫入した。

衝突実験というとクレーターや破壊実験のイメージが強いと思われるが、破壊のみならず衝突に伴う様々な現象に着目して研究が行われてきた。京大時代には、愛媛大、岡山理科大、神戸大、名古屋大、岐阜大、東大宇宙線研、外国からの研究者らが、また、宇宙研に移されてからも電通大などのグループが、衝突現象に関する各々のアイデアを持ってきてこの銃を利用してきた。最後に「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」という藤原氏の言葉[8]をもって本稿の締めくくりとしたい。

写真を提供して下さった藤原氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] Fujiwara, A. et al. 1989: Experiments and scaling laws for catastrophic collisions. In *Asteroid II*, eds. Binzel, R. P. et al. (Arizona Press), pp.240-265.
- [2] Asada, N. 1985: Fine fragments in high-velocity impact experiments. *J. Geophys. Res.* **90**, 12445-12453.
- [3] 中村昭子 1994: 小惑星から微惑星へー太陽系小天体の衝突, 天文月報 87, 329-334.
- [4] Fujiwara, A., and Asada, N. 1983: Impact fracture patterns on Phobos ellipsoids. *Icarus* **56**, 590-602.
- [5] Kadono, T., Fujiwara, A., and Nakamura, A. M. 1993: Measurement of expansion velocity of an impact-generated vapor cloud. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1595-1598.
- [6] Shirono, S. Kobayashi, K. and Fujiwara, A. 1994: Amino acid synthesis by hypervelocity impact, In *Proc. of the 27th ISAS Lunar Planet Symposium*, pp. 188-191.
- [7] Fujiwara, A. et al. 1991: Penetration of hypervelocity projectiles into low density materials. In *Proc. IAU Colloquium*, No. 126, pp.281-285.
- [8] 藤原 顕 1982: 衝突実験屋のみた小惑星の構造, 天文月報 75, 300-304.