

## 落下塔実験施設を用いたクレーター形成実験

東邦学園大	高木 靖彦
JAXA	長谷川 直、矢野 創
JAXA/東大・院・理	寺元 啓介
東大・院・新領域創成	山本 聡、杉田 精司、黒澤 耕介
法政大・工	仲田 哲進
JAXA	本田 親寿、安部 正真、藤原 顯

## Impact Cratering Experiments using a Drop Tower

*Yasuhiko Takagi*

Toho Gakuen University, Heiwagaoka, Meito, Nagoya 465-8515  
E-Mail: takagi@nagoya-toho.ac.jp

*Sunao Hasegawa, Hajime Yano*

Isas/JAXA, Sagamihara, Kanagawa 229-8510

*Keisuke Teramoto*

Dept. Earth Planet. Sci., U. Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033

*Satoru Yamamoto, Seiji Sugita, Kousuke Kurosawa*

Dept. Complexity Sci. and Eng., U. Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8561

*Tesshin Nakada*

Dept. Mechanical Eng., Hosei U., Koganei 184-8584

*Chikatoshi Honda, Masanao Abe, Akira Fujiwara*

Isas/JAXA, Sagamihara, Kanagawa 229-8510

**Abstract:** We performed systematic impact cratering experiments in microgravity and vacuum environment with impact velocities larger than 100 m/sec and obtained data on diameter of crater formed in the environment. The experiments showed that the drop tower is an appropriate tool for studies of surface processes on small bodies. The result shows that the formation time and final diameter of crater formed in the glass beads or quartz sand layer are not controlled by the gravity.

**Key words:** Impact Cratering, Asteroid Exploration

はじめに: MUSES-C/はやぶさ探査機は、小惑星(25143)イトカワが“ラブルパイル”構造をしており、その表面の一部はレゴリスと呼ばれる砂礫あるいは mm から cm の小石で覆われていることを発見した [1, 2]。また、数は少ないが、そのレゴリス層に幾つかのクレーターがあることも発見した [3]。この結果は、クレーター形成過程の理解が太陽系小天体の表面での現象の研究に必要であることを再確認させた。しかし、微小重力環境下でのクレーター形成実験は、技術的困難のためにほとんど行われていない。最近、Colwell [4] がスペースシャトルのカーゴベイの中で、ダストで覆われた表面への衝突実験を行ったが、衝突速度は非常に遅い (< 100 cm/sec) ものであった。スケーリング則の研究に役立つ低重力下でのデータは、Gault and Wedekind [5] の Fig. 1 に示されているものだけである。微小重力環境下でのクレーター形成実験の実施が、小天体上での現象の理解と、探査結果を最大限に利

用するためにも望まれる。

微小重力環境は、弾道飛行する航空機中や自由落下するカプセル中で実現できる。航空機の弾道飛行を用いた場合は、落下塔を用いた自由落下に比べて継続時間が長いけれども、微小重力の質は一般的に劣ると言える。そこで我々は、落下塔施設を用いて、微小重力環境下での衝突クレーター形成実験を行った。同じ施設と実験装置は、MUSES-C/はやぶさ探査機のサンプル採集装置の性能試験においても使用されている [2]。

**実験方法:** 微小重力環境下での衝突実験は、岐阜県土岐市の MGLAB の落下塔施設を用いて行った。この施設の落下距離は、ちょうど 100 m であるので、微小重力継続時間は 4.5 秒である。この継続時間が十分であるかの検証結果は、後で述べる。この施設を用いて、計 40 回の落下実験を行った。

カプセルのペイロード空間は通常圧力であるので、衝突実験を行うために直径 550 mm、高さ 700 mm の真空容器を搭載した。真空容器はカプセルの組立て前に排気・密封される。真空容器内の圧力は弾丸の発射直前まで、100 Pa 以下に保たれている。

真空容器内に衝突銃と標的容器を設置した。この実験では、2 種類の衝突銃と標的容器のセットが用いられた。セット A は、2 組の衝突銃と標的容器で構成され、1 落下中に 2 つの衝突実験が行えるようになっていた。このセットが 30 回の実験に使われた。10 回の落下実験については、1 組の衝突銃と大き目の標的容器で構成されたセット B が用いられた。

弾丸には、ナイロン、アルミニウム、鋼鉄の球を用いた。弾丸の直径は、2 から 7 mm、質量は 5 から 510 mg であった。弾丸の発射には小型の一段式火薬銃を用い、衝突速度は、45 から 360 m/sec であった。衝突速度は、弾丸が細いワイヤを切断する時間間隔から測定した。衝突角度は、セット A の場合は 73 度、セット B の場合は 90 度に固定されていた。また、火薬の燃焼ガスが放出物の運動を乱すのを防ぐため、サボとサボストップパーの機構を用いた。

標的には、粒径 80 から 900  $\mu\text{m}$  のガラスビーズ（株）不二製作所製）を主に用いた。また、アメリカで標準物質として使われることが多い、イリノイ州 Ottawa 産の石英砂（粒度 F-75、US Silica 社製）も用いた。標的物質は深さ 150 mm の円筒形の標的容器に入れて使用した。標的容器の直径は、セット A では 180 mm、セット B では 300 mm であった。ガラスビーズを標的物質として用いた場合は、標的容器の側面を木槌で十分に叩くことにより、圧密度が一定になるようにした。石英砂の場合は、圧密度を一定することが困難であったので、まったく圧密せずに使用した。

カプセル制動時の 10 G にも達する減速により、形成されたクレーターは破壊されてしまうので、記録は全て落下中に行う必要がある。衝突の様子は、2 台の通常民生品デジタル・カムコーダーにより記録した。撮影速度は、30 コマ/秒である。クレーターの直径等は、その画像から測定した。Fig. 1 に画像の例を示す。セット A の場合は、各衝突は 1 台のカムコーダーでのみ撮影されているので、深さ方向の情報を得ることは出来ない。セット B では、一つの衝突を 2 台でステレオ撮影しているので、深さ方向のデータを得ることが可能である。

1 G 環境での比較実験は、JAXA 相模原キャンパスの実験室の床に真空容器を設置した状態で行った。真空容器、衝突銃、標的容器、弾丸物質、標的物質等すべて同じものを使用し、条件も同じにした比較実験を行った。ビデオ撮影も同様に行った。

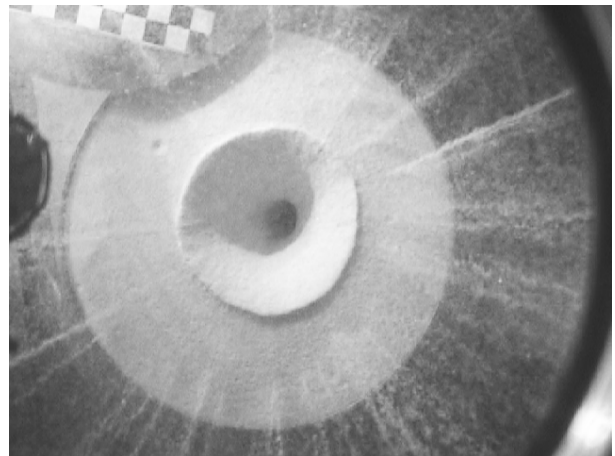


Fig. 1. An example of video images; Impact of 5 mm steel sphere (509 mg) to Ottawa quartz sand F-75 at  $250 \pm 17$  m/sec. The crater diameter is 83 mm.

**クレーター形成時間:** 落下塔による実験の最大の弱点は微小重力環境の継続時間が短いことである。そこで最初に、クレーターの形成される時間に対して微小重力環境の継続時間が十分であるかを検証した。その結果、粒径が 220  $\mu\text{m}$  より小さなガラスビーズと F-75 石英砂を標的物質に用いた実験では、全てのクレーター形成が 0.1 秒以内に終了していることが判明した。また、微小重力環境と 1 G 環境で、クレーター形成時間に差が無いことも確認された。したがって、MGLAB の落下塔を用いた場合の微小重力継続時間 4.5 秒は、この実験に関しては十分長いことが証明できた。

粒径が 300  $\mu\text{m}$  より大きな石英砂を標的物質として用いた実験結果に関しては、大量の放出物により画像が不鮮明になっており、解析を継続中である。

**クレーターの最終直径:** Fig. 2 は、弾丸に鋼球、標的に粒径 220  $\mu\text{m}$  のガラスビーズを用いた場合の、レートステージ実効エネルギーと呼ばれる衝突の強さを表す量 [6] に対するクレーター直径の関係を示している。黒塗りの記号が微小重力環境下での実験結果を、白抜きの記号が 1 G での比較実験の結果を示している。直線は、微小重力下と 1 G の両方の実験結果をまとめて最小 2 乗法で決定したものである。この結果は、微小重力環境下と 1 G 環境下で形成されたクレーターの直径がばらつきの範囲内で一致していることを明確に示している。他の弾丸と標的物質を用いた場合も、同様の結果になっている。このことは、この実験でのクレーター形成が重力により支配されていないことを示している。

一方、Fig. 2 に示した直線の傾きは 1/3.48 になっている。他の弾丸と標的物質の組合せに関しても、傾き

は 1/3.5 - 1/4.0 の範囲に入っている。これらの値は、どちらかと言うと、強度スケーリングの値 1/3 よりも重力スケーリングの値 1/4 に近い。このことは、クレーター直径が強度スケーリングにも従っていないことを示唆している。粒子間の動摩擦に関係したような新たなスケーリング項を考える必要があることを示している可能性がある。

今回の結果は、クレーター形成時間に関してもクレーター直径に関しても重力依存性が無いことを示しているが、これは Gault and Wedekind [5]の結果と異なったものとなっている。彼らの結果は、形成時間、直径とも重力と負の相関を持つこと示していた。この違いの原因は今のところ明確にはなっていないが、動摩擦の違いで説明できる可能性はある。すなわち、彼らが用いた標的物質は、Ottawa 産石英砂ではあったが、粒径が今回のものより相当に大きいものであった。従って、単位体積当たりの動摩擦は、かなり小さかったと予測される。その事により、重力の影響が現れやすかった可能性がある。重力と物質強度以外に粒子間動摩擦も考慮する必要があると考えれば、今回の実験結果と矛盾するものではない。

**結論:** 今回我々は、微小重力・真空環境下、かつ、衝突速度 100 m/sec 以上の領域で、系統的な衝突クレーター形成実験を世界で初めて実施し、クレーター形成時間および直径に関するデータを取得することに成功した。結果は、粒径の小さなガラスビーズや石英砂を標的に用いた場合は、クレーター形成時間および直径に対して重力が影響しないことを示した。

また、今回の実験は、小惑星や彗星のような太陽系小天体の表面現象の研究に対しても、落下塔施設が有用な道具であることを示した。

**参考文献:** [1] Fujiwara A. et al. (2006) Science, 312, 1330-1334. [2] Yano H. et al. (2006) Science, 312, 1350-1353. [3] Saito J. et al. (2006) Science, 312, 1341-1344. [4] Colwell J. E. (2003) Icarus, 164, 188-196. [5] Gault D. E. and Wedekind J. A. (1977) in Impact and Explosion Cratering, Pergamon, New York. [6] Mizutani H. et al. (1983) JGR, 88, A835-845.

**謝辞:** 本研究は、(財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行われました。落下実験施設のすばらしい運用をしていただいた岩上敏男、野倉正樹両氏をはじめとする MGLAB の職員の方々に感謝します。

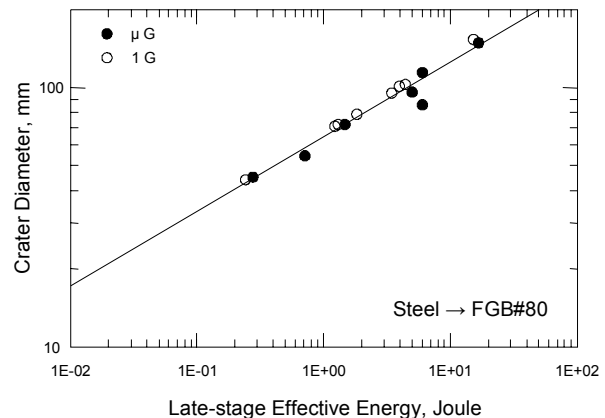


Fig. 2. The crater diameter on the late-stage effective energy [6] of experiments with steel projectiles and the glass beads of 220  $\mu\text{m}$  diameter.