

境界を制約された表層におけるクレーター形成実験

青木隆修（神戸大）、長岡宏樹（神戸大）、安田奈央（金沢大）

はじめに

惑星・衛星には隕石の衝突によりできたと考えられるクレーターが存在している。その形態は、月のクレーターに見られるお椀型の単純クレーター、内部に中央丘などの構造をもつ複雑クレーターの他に、火星ではランパートクレーターと呼ばれるクレーター周辺が花びら状になっているもの、火星・氷衛星では、ピットクレーターと呼ばれる中央部分に狭くて深い穴のあいたクレーターが存在する。このさまざまなクレーター形態は、地形や内部構造の影響を受けていると考えられる。

このような、惑星・衛星に形成されたクレーターの直径や深さを決定する要因は大きく2つあり、それらは強度と重力である。重力よりも強度の影響力が大きく、破砕物がすべて吹き飛ばすような領域を強度支配域という。これに対して、重力が強度よりも影響力が大きく、破砕部分の一部が飛び出るような領域を重力支配域という。

例えば粉々に破砕された岩石片が降り積もったレゴリス層への衝突など、重力支配域における衝突実験は粉体層をターゲットに用いることでよく行われている。しかしこのような重力支配域の場合、実際のクレーターでは下部に何らかの境界を持つ。その境界の存在は、クレーター形成に影響を与えないだろうか。

クレーターサイズは、破壊がどこまで進行するかによって決まるといえる。つまり、減衰しながら伝播する衝撃応力が重要となる。天体衝突では、圧力は衝突点から三次元的に球面波として伝播し、遠方では一定の割合で減衰する。下部に存在する境界は、これらの圧力伝播に影響を与え、クレーター形成に何らかの影響を与えることが予想される。

このような境界をもつ重力支配域での衝突を理解するために、ターゲットである粉体層（ガラスビーズ）の中に直径11cmの器を入れ境界を仮定し、そこにアルミ弾丸、ポリカーボネート弾丸を様々な速度で衝突させる実験を行った。高速カメラでのイジェクト計測、クレーター直径の計測により、下部の境界の存在がクレーター形成へどのような影響を与えるのかを調べる。

実験手法

縦撃ちの一段式軽ガス銃によって弾丸を加速し、標的に衝突させた。弾丸はアルミニウムとポリカーボネイト（以下、ポリカ）で、標的はガラスビーズを用いて内部境界はステンレスのお椀型の器で模擬した。チャンバー内圧力は0.1気圧以下で、衝突速度は2本のレーザーを通過する時間間隔をオシロスコープで計測して求めた。衝突の様子は高速度のビデオカメラで撮影し、イジェクタの様子を観察した。衝突後にクレーター直径を直接ノギスで測り、器の制限によってそれ以上大きくなれなかったものは器の直径11cmをクレーター直径としてイジェクタ量を調べた。詳しい実験条件はTable 1にまとめた。

Table 1. 実験条件

Run No.	弾丸物質	弾丸質量 [g]	標的物質	衝突速度 [m/s]	クレータ ー直径 [mm]	放出イジ ェクタ量 [g]
1	アルミ	2.1	ガラスビーズ	7.84	71.15	
2	アルミ	2.1	ガラスビーズ	89.6	器直径	215
3	アルミ	2.1	ガラスビーズ	28.7	116.25	
4	ポリカ	0.925	ガラスビーズ	127.09	器直径	171

結果

クレーター形態

速度が遅い場合はクレーター直径が器の直径まで達しなかった(Fig. 1. a)。しかし、速度が大きくなるとエネルギーが増えるために器によってクレーターの成長が途中で止まってしまい、器の直径以上に成長できなかった(Fig. 1. b)。

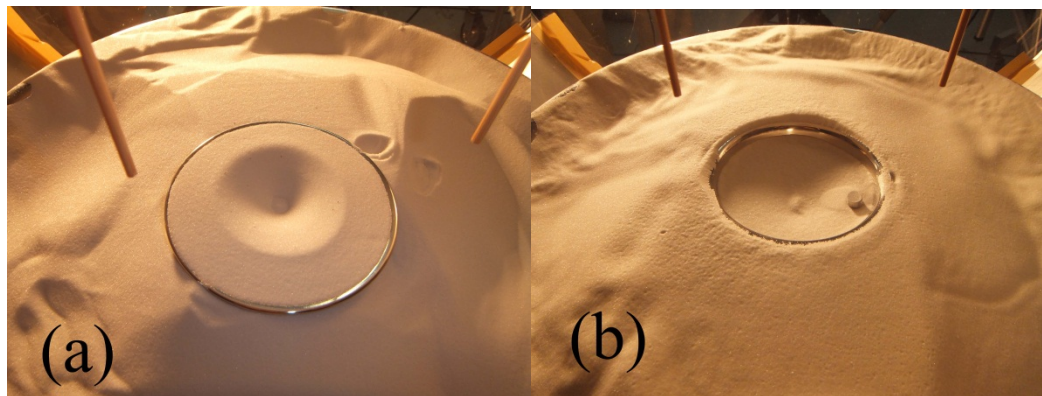


Fig. 1.

(a)Run No. 1 のクレーター写真。(b)Run No. 2 のクレーター写真

鈴木さん実験との比較

器の影響をしらべるために制限のない半無限体ターゲットへの衝突実験（鈴木さんの実験データ）と比較した。器の直径まで達しなかったものは鈴木さんデータと運動エネルギーに対するクレーター半径の関係は調和的であり、器の影響を受けなかったことがわかったが、器の直径まで達したものはそこでクレーター成長が止められるために半無限体ターゲットへ衝突したときに予想されるものよりも直径は小さくなった(Fig. 2)。また、クレーター深さが直径の 0.2 倍として体積を求めたところ、Fig. 2 と同じような関係がみられた(Fig. 3)。

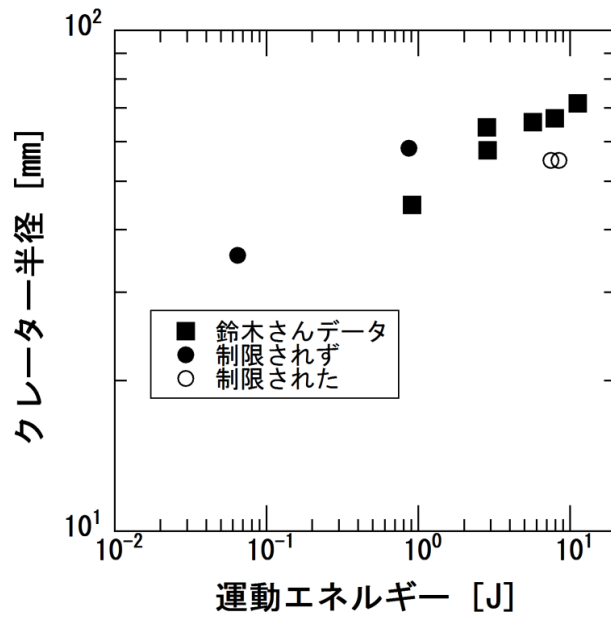


Fig. 2

弾丸運動エネルギーに対するクレーター半径の関係。白抜き丸は器の直径まで達してそれ以上クレーターが成長できなかったもの。

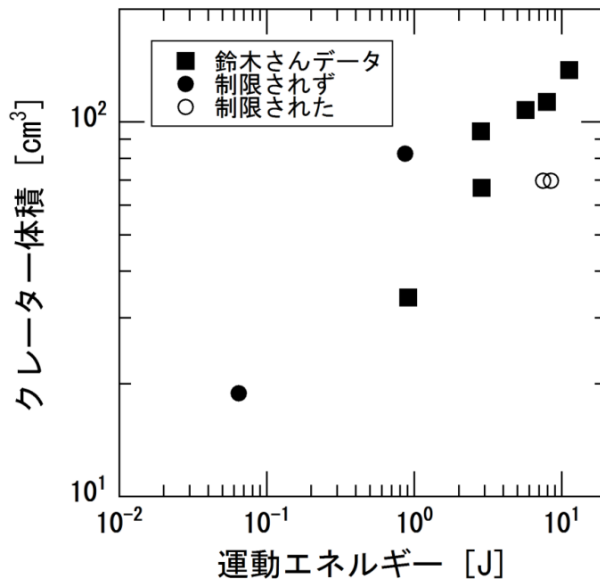


Fig. 3

弾丸運動エネルギーに対するクレーター体積の関係。白抜き丸は器の直径まで達してそれ以上クレーターが成長できなかったもの。

イジェクタ量

イジェクタ量について調べるために、器いっぱいに入れたガラスビーズの質量から衝突後の器の質量を引いてイジェクタ量を決定した。イジェクタ量を衝突前のガラスビーズ標的のバルク密度 1.513 g/cm^3 で割って計算したクレーター体積は他のデータと運動エネルギーに対するクレーター体積の関係ではほぼ一致した (Fig. 4)。

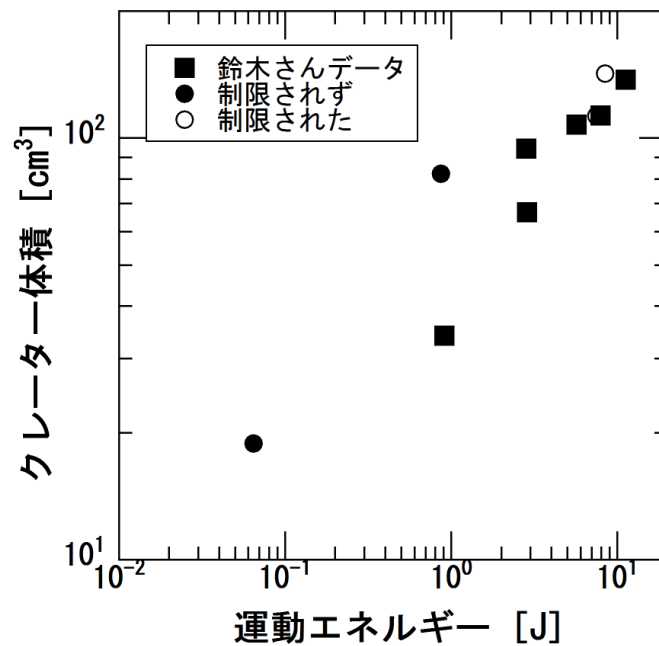


Fig. 4

運動エネルギーに対するクレーター体積の関係。白抜き丸はイジェクタ量から換算したクレーター体積を示している。

Π スケーリング

それぞれの衝突を Π スケーリングによってまとめる。実験における弾丸質量を m 、半径を a 、標的密度を ρ 、重力加速度を g 、衝突速度を U 、クレーター体積を V とする。このとき、無次元体積 Π_V は $\rho V/m$ 、無次元衝突条件 Π_2 は ag/U^2 で表される。縦軸を Π_V 、横軸を Π_2 でそれぞれの実験結果をプロットした (Fig. 5)。上の図はクレーターの深さを直径の 0.2 倍としたときの V でプロットしており、器によって制限された 2 ショットがそれ以外の点をのせる直線から外れている。下図はイジェクタ量から換算した体積を V としてプロットした。この図では器によって制限された 2 ショットが他の点と同じ直線に乗っている。

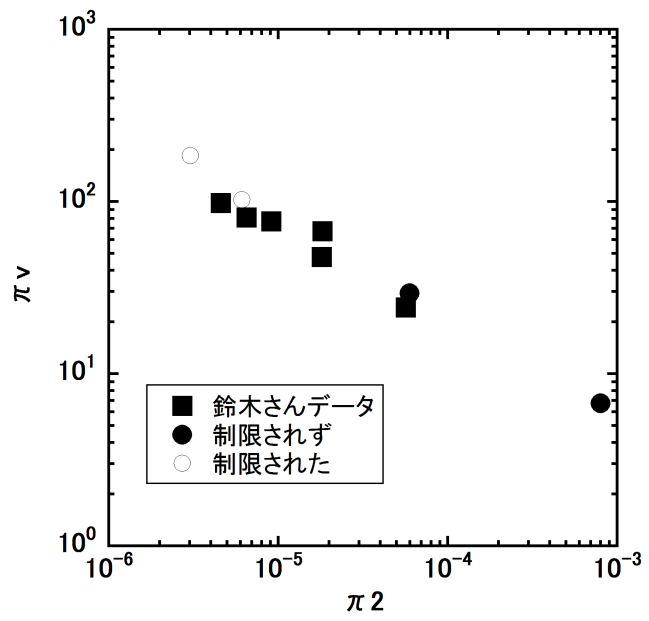
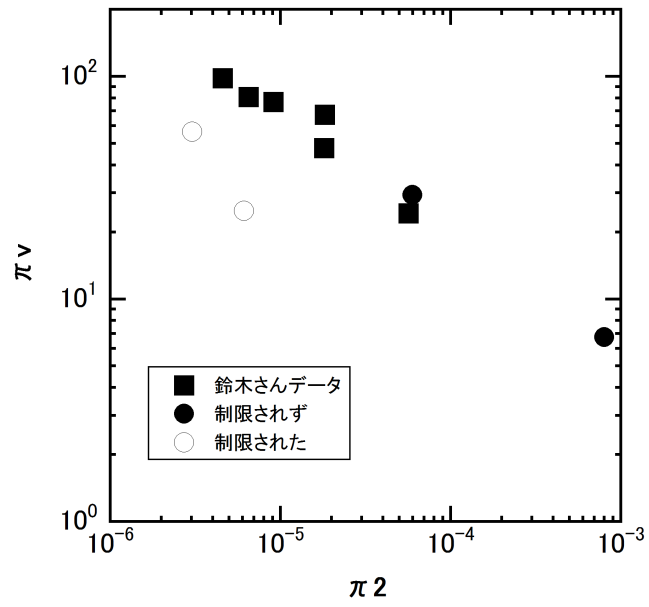


Fig.5

クレーターの深さを直径の 0.2 倍としたとき (上) とクレーターの体積を器内部に残ったガラスビーズの体積から求めたとき (下) の π スケーリング。

考察

クレーターの端が容器の端に達する高速衝突において、器に残った砂の量から求めたクレーターと、器の直径の 0.2 倍の深さをもつと仮定したクレーターでは前者の方が体積は大きい。それは、半無限体への衝突では下に潜り込むように移動する粒子の領域がこの実験では器によってそれより下に行けなくなって行く場を失い、器から外にとびだしていったことにより結果として同じ直径のクレーターでも体積が大きくなったと思われる。逆に、低速衝突ではクレーター直径と体積の関係は半無限体に衝突させた実験と調和的な結果となった。

π スケーリングでは、衝突後に器の中に何も残らなくなるとき、Fig.5 において πv が一定になることになるが、そのような傾向は本実験では見られない。これは、器の内部にまだ多くのガラスビーズが残っているためである。

器の有無によるイジェクタの飛び方の違い

衝突してからしばらくは器の有無でイジェクタの飛び出す様子に違いは見られないが、クレーターが成長して器の端に達するときイジェクタのくびれの位置が器の影響を受けて若干上にずれているように見える。これは、高エネルギーの場合だと、下方へ潜り込めなかった粒子が器に沿って上方へ輸送されるため、垂直な部分ができ、その上にくびれができるためくびれが高い位置になっていると思われる。

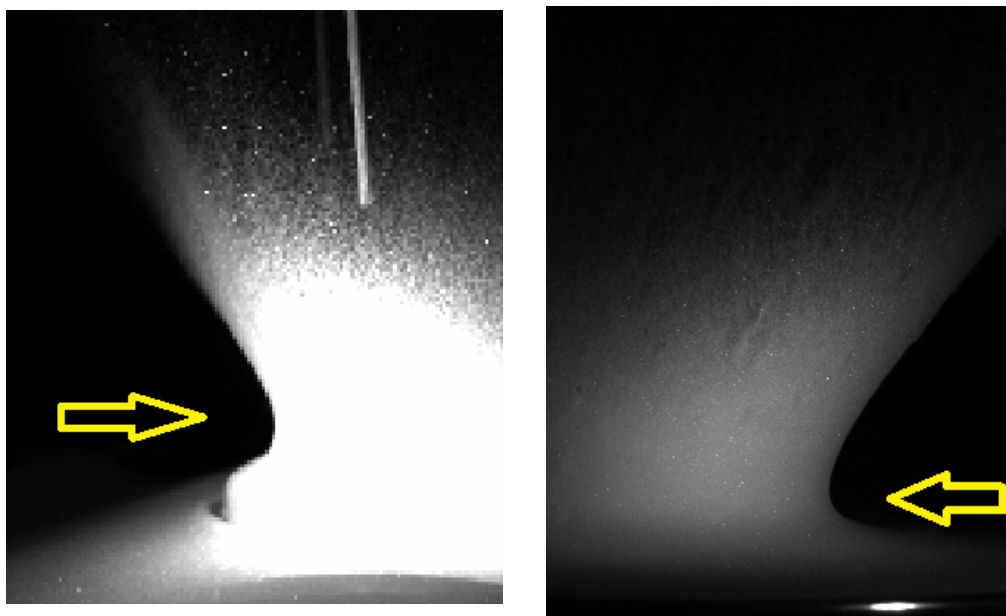


Fig.6

器がある場合のイジェクタの様子 (左) と半無限体への衝突実験のエジェクタの様子 (右)。黄色い矢印はイジェクタのくびれの位置。

まとめ

今回は重力支配域において、境界があるターゲットへの衝突実験を行い半無限体ターゲットの衝突実験と結果を比較した。衝突速度はクレーターがとても小さなものから器の端にかかるものまで変えた。実験ではクレーターの直径の成長は器の端で止まった。イジェクタから見積もったクレーターの体積は半無限体への衝突のクレーターの体積と調和的だった。単に、器によって境界を作られたことで本来下方に潜るように動く粒子が器に沿って上方に輸送され、掘削領域のイジェクタとともに飛び出し、その体積が偶然にも半無限体への同じ速度の衝突によるクレーターの体積と同じだったかもしれない。しかし他の考えとして、器によってクレーターの直径は制限されるが、クレーターの体積は制限をうけないことを表しているのかもしれない。衝突時の映像では、器の端で確かにイジェクタが器による影響を受けており、イジェクタのくびれの位置などの形の違いも見える。

今回の実験から境界があるターゲットへの衝突はクレーターの直径に制約をつけることがわかった。実際のクレーターはもっと複雑な境界を持っているはずだが、単純な形の境界での実験結果から順番に考えていく足掛かりになるだろう。

謝辞

このレポートは衝突実験実習についてまとめたものです。講師をしてくださった荒川政彦氏、鈴木絢子氏、また実習世話人の皆様に感謝いたします。ありがとうございました。