

レーザー変位計を用いたその場計測による衝突クレーター形成過程の物理的解明

山本 聡¹、長谷川直²、鈴木絢子²、松永恒雄¹

¹ 国立環境研究所, ² JAXA

1. はじめに

固体天体地表における卓越地形の一つである衝突クレーターの解析を行うため、これまで数多くの衝突クレーター形成実験が行われていきた(see, Melosh 1989)。一方、これらの研究の多くでは、衝突素過程をブラックボックス的に捉え、実験後に回収されたターゲットのクレーターの最終形状の測定を行い、それらのデータを統計的に解釈するという方法が用いられてきた。その為、例えば衝突クレーター形成に対するスケーリング則の衝突速度依存性や標的物性値依存性などが、よく分かっていないのが現状である。そこで本研究では、クレーター形成過程のその場観測を行い、その物理的解釈に基づいてスケーリング則を再考することを大きな目標としている。

過去に行われたクレーター形成過程のその場観測手法として、レーザーを用いた方法が提案されている(Yamamoto et al. 2006a; Barnouin-Jha et al. 2007)。またこのその場観測手法により、重力支配域における衝突によって生じる掘削物質の流動(掘削流)の物理特性の定量的測定が行われ、それを基にした掘削流モデル式が提案されている(Yamamoto et al. 2009)。しかし、これらのレーザーを用いた実験は、弾丸の衝突速度が約 0.3km/s 以下の低速度領域で行われたものであった。一方、実際の地球型惑星で起こる天体衝突は数 km/s～数 10km/s を超える高速度衝突であることから、掘削流モデル式についての衝突依存性を明らかにすることが重要である。

そこで本研究では、宇宙科学研究所の大学共同利用施設である超高速衝突実験施設に設置されている新型の縦型二段式軽ガス銃(以下では JAXA 縦型銃と呼ぶ)を用いて、衝突速度数 km/s 以上での粉体標的に対する高速度衝突実験を行い、レーザー変位計を使って掘削流のその場観測を行った。

2. 測定手法と実験条件について

2.1. 高速衝突クレーター実験

JAXA 縦型銃は弾丸を最大約 7-8km/s まで加速することができ、大きさ $\Phi 150\text{cm} \times 200\text{cm}$ の真空チャンバーに垂直に設置されていることから、重力支配域を模擬した粉体標的に対する高速衝突実験を行うのに適している。今回弾丸はポリカーボネイト(質量 0.06g、直径 4.76mm)を使用。また、ターゲットとして、内径 42cm の容器にいれられた乾燥珪砂 5 号(東北珪砂データ: 平均粒径約 510 μm 、バルク密度 1490～1620kg/m³)を使用した。青木(2014)等によりこの砂の内部摩擦角は約 31°、固着力は 30Pa であると報告されている。衝突実験は全て真空条件 20Pa 以下で実施。今回行った実験条件を表 1 にまとめた。

2.2. レーザー変位計によるその場観測手法

図 1 にレーザー変位計による掘削過程のその場観測手法の概要図を示す。この方法では、JAXA 縦型銃により加速された弾丸を粉体標的に垂直衝突させ、衝突によって形成される掘削領域の形状を、レーザー変位計を用いて測定する。このレーザー変位計(Keyence 超高速インラインプロファイル測定器)は数 10cm 領域での一次元プロファイルを 1～2kHz のサンプリングレートで連続取得することが出来るため、高速ビデオカメラを使う事無く、掘削過程の時間発展を非接触で測定できるという特長を持つ。また、レーザー変位計は標的の上面に垂直に設置されていることにより、放出物に視界を遮られない位置関係になっている(図 2)。このレーザー変位計により掘削領域の形状を各時間において測定し、衝突前の表面における掘削領域の直径 D_{ap} を、衝突からの時間 t の関数として測定する。

なお、レーザーは形成される衝突点から一同径方向に対してのみ測定がなされるため、 D_{ap} の決定においてはクレーター形状の軸対称性が仮定される。この場合、弾丸着弾点の中心位置の決定が重要である。そこで、毎回 shot を行う前に標的表面上方からレーザー光を当て、レーザースポット中央に弾丸を手動で設置し、レーザー変位計を使って着弾予想点を決定した。この決定においては、shot 毎に測定した着弾中心測定値について平均値をとり、そのばらつき(今回の解析では約 2mm)を D_{ap} の決定時の誤差として取り扱った(結果として、軸対称を仮定するので、 D_{ap} の見積りに $\pm 2\text{mm}$ の誤差が生じることになる)。

またレーザープロファイルのサンプリングレートは 2kHz とした。一方、サンプリングレート間隔内に

おける標的表面に着弾した正確な時間を知ることは難しい。そこで、衝突による擾乱がプロファイルデータの中で確認された最初の時間を $t=0.25\text{ ms}$ とし、さらに時間に対する不定性（つまり誤差）を $\pm 0.25\text{ ms}$ とした。

最後に、補助情報として、衝突クレーター形成の横からの様子について高速ビデオカメラを使って同時に撮像した。高速ビデオカメラの設定条件としては、128 コマ/秒とした。ただし、この高速ビデオカメラは、主に実験の様子を確認するためのものであり、以下の解析では高速ビデオカメラによる測定データは使用していない。

3. 結果

3.1. クレーター径と π スケーリング

生成されたクレータサイズについて表 1 にまとめた。合計 15 回実験を行い、衝突速度 v_i は約 $0.88 \sim 6.3\text{ km/s}$ 、最終クレーターのリム径 D_m は $110 \sim 210\text{ mm}$ であった。これらの D_m について無次元クレーター半径と無次元エネルギーの関係 (e. g. Holsapple, 1993) に換算した結果を図 3 に示す。これより、無次元クレーター半径は無次元エネルギーに対してべき乗分布を示していることがわかる。本実験及び予備実験データに対してべき乗関係式でフィットした場合、冪指数は -0.170 ± 0.004 であった。このべきの傾きは、過去の標準スケーリング関係式 (図中の直線) (Schmidt & Housen 1987) の傾き (冪指数 0.17) と一致する。

一方、低速衝突 ($v_i = 11 \sim 329\text{ m/s}$; Yamamoto et al. 2006b) の結果と比べると、ガラスビーズを標的とした場合のトレンドよりもクレーター径が小さくなるが、同実験の乾燥砂 (dry sand) のトレンドより大きなクレーター径となっている事がわかった。

3.2. 掘削キャビティのプロファイル測定

図 4 に Shot 2-9 における衝突からの時間 $t=0.7, 7.7, 78.8\text{ ms}$ でのプロファイルのスナップショット例を示す。これより、衝突による掘削領域 (キャビティ) が時間とともに広がり、また放出物カーテンが横方向に広がり、最終的にクレーターリムが形成される様子が捉えられているのが分かる。

図 5 に、断続的時間発展の様子をまとめた (表示サンプリング時間は、時間について対数表示した時に等間隔になるように選定した)。衝突速度が早い場合 (例えば、Shot 2-5)、衝突直後では擾乱が酷いためキャビティをきれいに捉えることが難しく、例えば深さ方向の初期段階の時間発展の情報を捉えるのは難しい。一方、元の表面付近のキャビティのプロファイルは、高速衝突であっても多くの場合断片的に捉えることができています。このことから、プロファイルデータを使った D_{ap} の時間発展の測定は、衝突直後の初期時間であっても可能であることがわかった。

3.3. 掘削キャビティの直径の時間発展

図 6 に、全実験結果について D_{ap} と t の関係をプロットした。これより衝突直後から $t \sim 0.03\text{ s}$ くらいまで、 D_{ap} は t に対してほぼべき乗則で増加しているのが分かる。一方 $t \sim 0.03\text{ s}$ 以降では D_{ap} の成長率が時間とともに減衰し、 $t \sim 0.1 \sim 0.2\text{ s}$ 以降は一定となっている。これは $t \sim 0.1 \sim 0.2\text{ s}$ 以降ではキャビティの成長が止まっていることを意味する。つまりクレーター形成は約 $0.1 \sim 0.2\text{ s}$ 後に終了したことを意味するが、これはクレーター形成典型時間 $T_{tp} = (D/g)^{0.5} \sim 0.1 \sim 0.2\text{ s}$ と調和的な結果である。その後、崩壊過程における D_{ap} の顕著な増加は見られなかった。また、衝突速度が高くなると、同じ時間における D_{ap} が大きくなるが、時間発展のパターン (初期段階はべき乗則で増加し、その後増加率が減衰するパターン) に違いは見られなかった。一方、衝突速度が高くなると、全体的な傾向が上にシフトしている。

4. 考察 : Z モデルによる評価

Yamamoto et al. (2009) では、Maxwell (1977) の Z モデルを基にして、過渡クレーター形成までの D_{ap} の時間発展に対して次の掘削流モデル式が提案されている :

$$D_{ap}(t) = A(1 - e^{-\beta t})^\gamma \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 β は減衰率、 $\gamma = 1/(Z+1)$ 、 Z は Z モデルにおける掘削流速度場の距離に対する減衰率、 A は比例定数である。この式 (1) 使って、今回の結果での β 、 γ 、 Z の値を求めることで掘削流の物理的特性を定量化する。図 7 に時間発展に対して式 (1) によるモデルフィットを行った結果例を示す。

図 8 (左) に γ (および Z) と衝突速度 v_i の関係についてプロットした結果を示す。この図より、減衰率 γ について、 2 km/s を境として値に違いが見られることがわかった。例えば、 $v_i = 2\text{ km/s}$ 以下では、いずれの γ の値も 0.34 から 0.38 である (対応する Z 値は約 1.7 から 1.9)。一方、 $v_i = 2\text{ km/s}$ 以上では、いずれの γ の値も 0.30 から 0.34 (対応する Z 値は約 $2 \sim 2.5$) であり、 $v_i = 2\text{ km/s}$ 以下の結果と比べて γ 値が小さい (Z 値で言えば大きい)。また、Yamamoto et al. (2009) の $v_i < 0.3\text{ km/s}$ の結果はいずれも $\gamma > 0.34$ で

あり、本実験の $v_i < 2 \text{ km/s}$ の結果と調和的である。つまり $v_i < 2 \text{ km/s}$ では $\gamma > 0.34$ ($Z < 2$) であるが、 $v_i > 2 \text{ km/s}$ では $\gamma < 0.34$ ($Z > 2$) であることが分かった。つまり、高速衝突による掘削流の速度場の距離に対する減衰率は、低速衝突の場合に比べて大きいということを意味する。

次に、減衰率 β について衝突速度 v_i に対してプロットした結果を図 8 (右) に示す。同様に $v_i = 2 \text{ km/s}$ を境として、減衰率の値に違いが見られ、高速衝突 ($v_i > 2 \text{ km/s}$) は低速衝突に比べて減衰率が小さいという事がわかった。一方、Yamamoto et al. (2009) では、 β 値は標的種類によって大きくばらついているおり、その主たる原因は物性値の違いによるものと解釈されていた。しかし、本実験結果より、 β は物性依存性だけでなく、速度依存性を示す可能性があることもわかった。

一方、 γ および β の衝突速度依存性については、 $v_i = 2 \text{ km/s}$ を境に値が変わっているのではなく、全体的な傾向として衝突速度に対して負の相関がある可能性も考えられる。今後データ点を増やしこの速度依存性についてさらに調べることが重要と考えられる。

5. まとめと今後

- ・ 今回の測定により、キャビティの時間発展の挙動について速度依存性があることがわかった。
 - 衝突速度 2 km/s 以下では、 γ 値は > 0.34 (Z 値は約 1.9 以下) であり、逆に 2 km/s 以上では、 γ 値は < 0.34 であった (Z 値は約 2 以上)。この結果は、Yamamoto et al. (2009) の $v_i < 0.3 \text{ km/s}$ の結果 ($\gamma > 0.34$) と調和的である。
 - これは高速衝突の場合、掘削流の速度場の距離に対する減衰率が、低速度衝突に比べて大きくなることを意味する。
- ・ 減衰率 β においても、 $v_i = 2 \text{ km/s}$ を境にして、値の違いが観測された。
 - 高速衝突 ($v_i > 2 \text{ km/s}$) は、低速衝突に比べて減衰率が小さい。
- ・ ただし、 $v_i = 2 \text{ km/s}$ で違いがあるのか、 $v_i = 0.8\text{--}6 \text{ km/s}$ の範囲で負の相関があるのかについて今後追加実験を行い調べることが重要である。
- ・ また $v_i = 0.3\text{--}0.8 \text{ km/s}$ でどうなっているのかについても調べていくことが重要である。

表 1：実験条件

SHOT 番号		実験ノート番号	衝突速度 [m/s]	真空 条件 [Pa]	最終リム直径 (ノギス計測) [mm]	最終アパ レント直径 (本 手法) [mm]	高速カメラ による撮像
SHOT 2-1		150114-1405	1696	20	138	108	なし
SHOT 2-2		150114-1513	6031	7	210	170	なし
SHOT 2-3		150115-0844	6250	6	210	169	○
SHOT 2-4		150115-1028	5030	6	202	164	○
SHOT 2-5		150115-1131	4355	4	193	148	○
SHOT 2-6		150115-1316	2820	5	165	131	○
SHOT 2-7		150115-1408	2112	4	146	116	○
SHOT 2-8		150116-0834	1655	3	139	111	○
SHOT 2-9		150116-0929	909	5	111	88	○
SHOT 2-10		150116-1034	997	5	114	87	○
SHOT 2-11		150116-1125	976	6	113	92	○
SHOT 2-12		150116-1352	888	5	110	89	○
予備実験	SHOT 1-1	141007-0957	1620	11	134	105	○
	SHOT 1-2	141007-1152	2684	6	153	124	○
	SHOT 1-3	141007-1356	2320	19	154	120	○

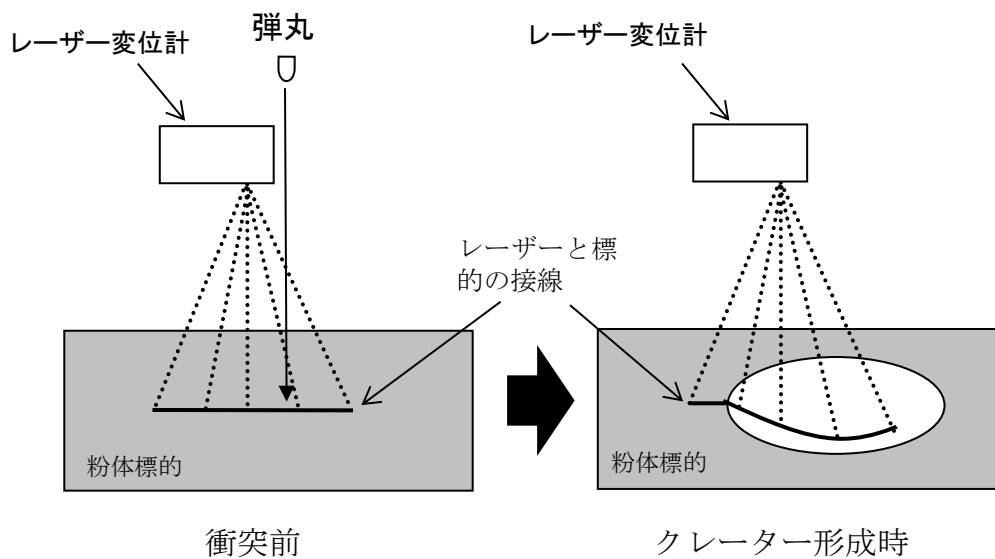


図 1：レーザー変位計によるその場観測手法の概要図。



図 2：レーザー変位計とターゲットの位置関係。レーザー変位計はターゲット表面に対して、垂直に設置されている。衝突点からの変位計の前面ガラスまでの距離は約 25.5cm である。

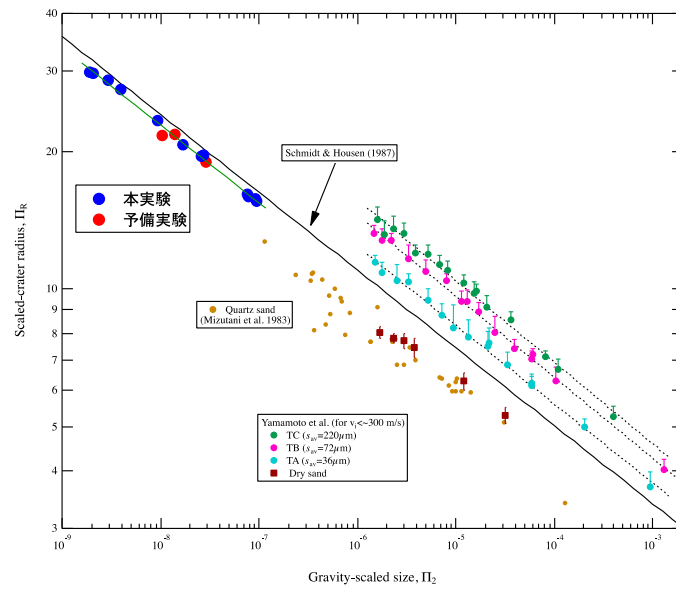


図 3：無次元クレーター半径と無次元エネルギーの関係。青丸が本実験の結果、赤丸が予備実験の結果（最終クレーターリム直径；ターゲット密度を 1540 kg/m^3 と仮定）。緑の直線は、本実験及び予備実験データに対してべき乗関係式でフィットした場合（冪指数は-0.170）。その他のデータは Yamamoto et al. (2006b)。

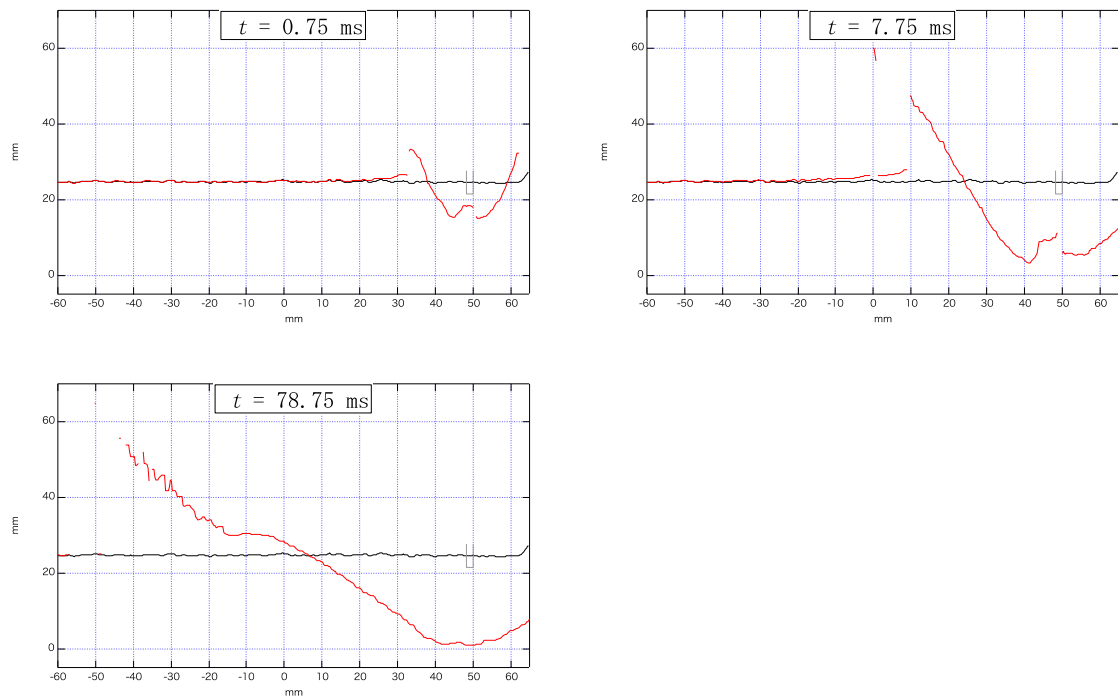


図 4：Shot 2-9 ($v_i=909 \text{ m/s}$) の場合における、 $t=0.75, 7.75, 78.75 \text{ ms}$ におけるプロファイルのスナップショット（赤線）。黒の水平線は衝突前の標的表面のプロファイル。横軸 48-50mm 辺りの「U」形状が弾丸着弾点を示す。

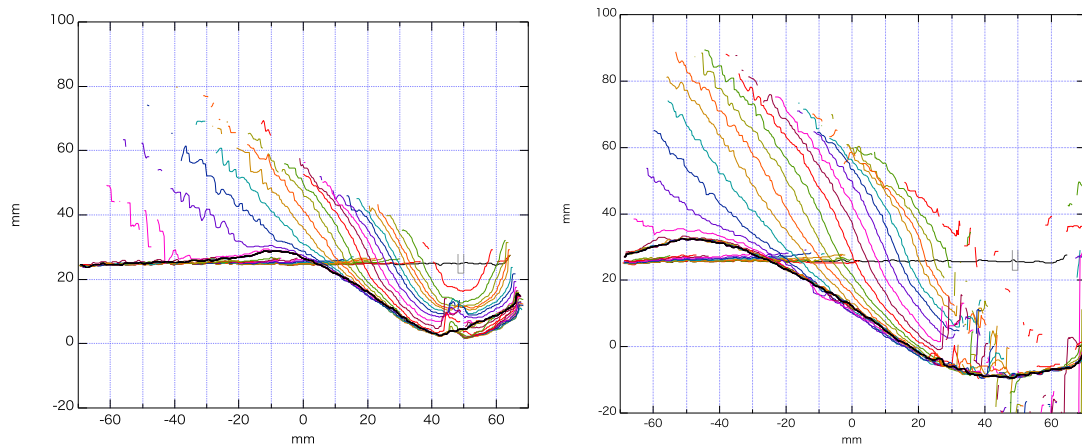


図 5 : プロファイルの時間発展の様子。黒の水平線は衝突前の標的表面のプロファイル。横軸の値 48-50 mm 辺りの灰色の “U” が着弾点を示す。(左) Shot 2-12 ($v_i=888$ m/s) と (右) Shot 2-5 ($v_i=4355$ m/s) の場合。

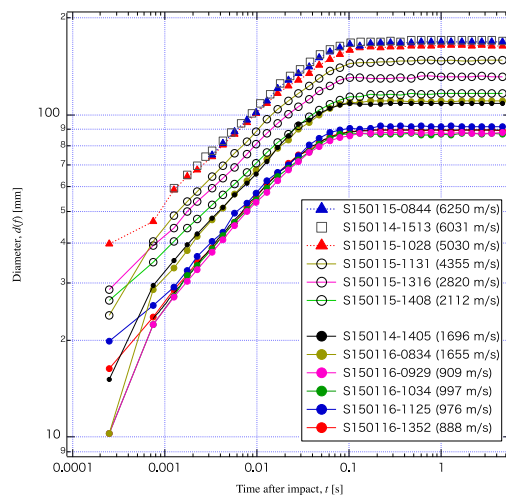


図 6 : 掘削穴の時間発展。煩雑を避けるため、エラーバーはここではつけていない。

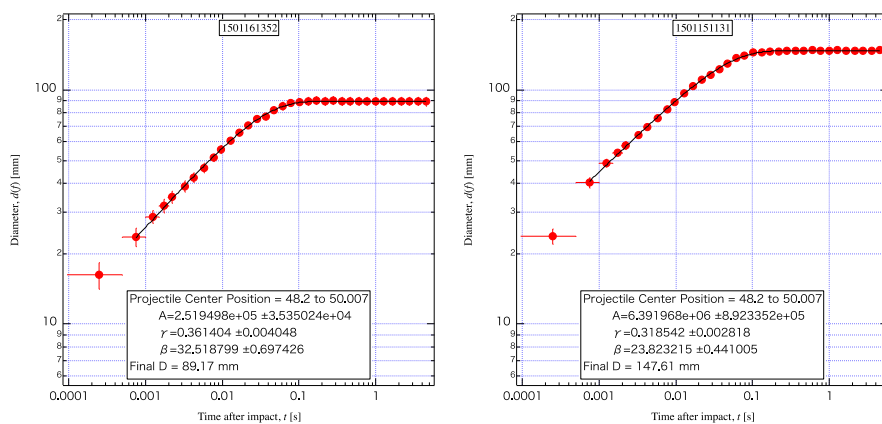


図 7 : 掘削穴の時間発展。(左) Shot 2-12 ($v_i=888$ m/s) と (右) Shot 2-5 ($v_i=4355$ m/s)。

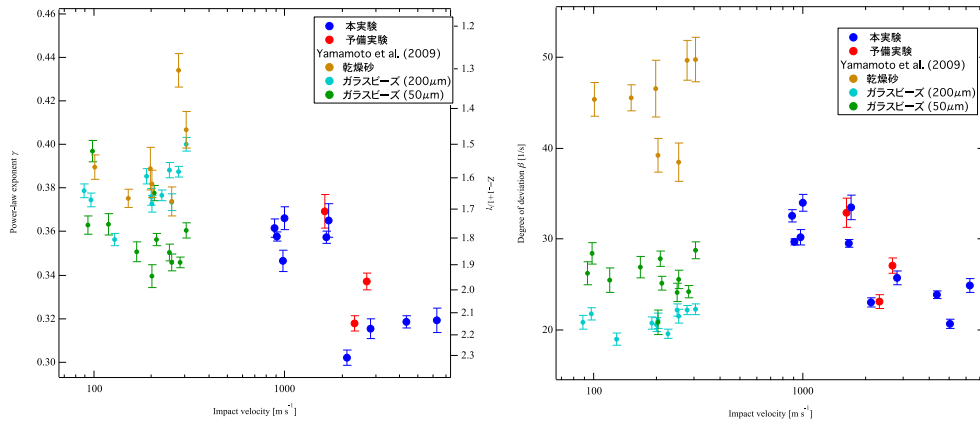


図 8：(左)冪指数 γ および対応する Z 値と衝突速度の関係。(右)減衰率 β と衝突速度の関係。比較として低速度衝突結果 (Yamamoto et al. 2009) の結果も示した。

参考文献

- 青木 隆修, イトカワ礫層の内部摩擦角の推定, 神戸大学大学院理学研究修士学位論文, 2014.
- Barnouin-Jha, O. S. et al., Non-intrusive measurements of crater growth, *Icarus*, 188, 2, 506-521, 2007.
- Holsapple, K.A., The scaling of impact processes in planetary sciences, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 333-373, 1993.
- Maxwell, D.E., Simple Z model of cratering, ejection, and the observed flap, In *Impact cratering* (eds by Roddy, D.J. et al.), Pergamon Press, New York, pp. 1003-1008, 1977.
- Melosh H.J., *Impact cratering*, Oxford Univ. Press, New York, 1989.
- Mizutani et al., Cratering experiments in sands and a trial for general scaling law, *J. Geophys. Res. (Suppl.)*, 88, A835-A845, 1983.
- Schmidt, R.M., K.R. Housen, Some recent advantages in the scaling of impact and explosion cratering, *Int. J. Impact Eng.* 5, 543-560, 1982.
- Yamamoto, S. et al., Direct observation of transient crater growth, *Proc. of ESLAB-40: First international conference on impact cratering in the Solar System*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2006a.
- Yamamoto, S. et al., Transient crater growth in granular targets: An experimental study of low velocity impacts into glass sphere targets, *Icarus*, 183, 215-224, 2006b.
- Yamamoto, S. et al., An empirical model for transient crater growth in granular targets based on direct observations, *Icarus*, 203, 310-319, 2009.