

Experimental hypervelocity impact into quartz sand - II, Effects of gravitational acceleration

Donald E. Gault, John A. Wedekind

(1997) Impact and Explosion Cratering, Pergamon Press
(New York), p. 1231-1244

神戸大学大学院理学研究科
M1 高野翔太

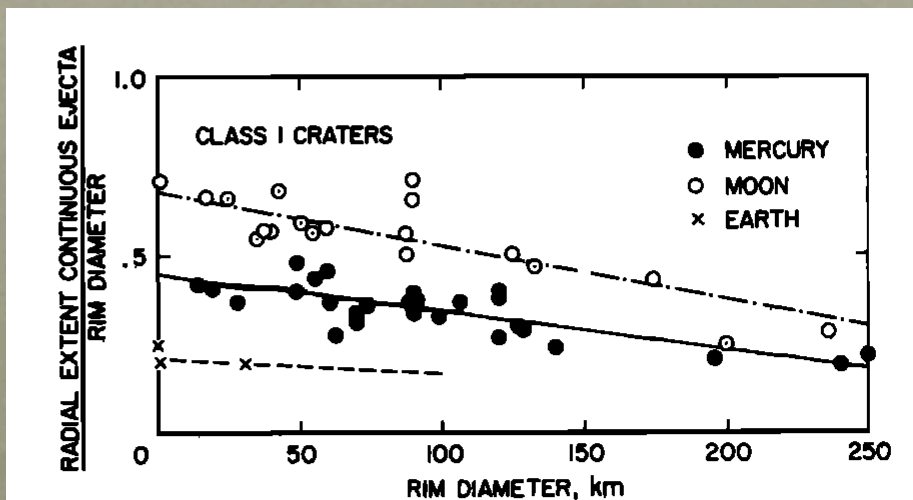
Introduction

◆ 重力加速度: クレーター形成における重要なパラメーターの1つ

➤ 重力加速度がクレーター形成に与える影響

- 1) クレーターの最終サイズ
- 2) エジェクタの弾道軌道・放射分布・二次クレーターの形成
- 3) 緩和過程

➤ 月と水星のクレーターは 2),3)の違いが見られる (Gault et al., 1975)



エジェクタ堆積範囲

水星/月 = 0.65

Introduction

◆ 重力加速度: クレーター形成における重要なパラメーターの1つ

➤ 重力加速度がクレーター形成に与える影響

- 1) クレーターの最終サイズ
- 2) エジェクタの弾道軌道・放射分布・二次クレーターの形成
- 3) 緩和過程

➤ 月と水星のクレーターは 2),3)の違いが見られる (Gault et al., 1975)

目的

実験的な調査を行い、衝突クレーター
のサイズに対する重力の影響を調べる

Experimental Procedure

◆ 実験: NASA, Ames Research Centerの軽ガス銃 →

◆ 弾丸: アルミ球

サイズと形成時間の関係

	本研究	基礎実験	基礎実験
直径(mm)	3.18	3.18	1.59, 6.53
質量(g)	0.047	0.047	0.006, 0.376
速度(km/s)	6.64	0.4~8.0	1.4~6.6
重力(g)	0.1~0.8	1	1

直径と E_k の関係性

◆ 標的: 石英砂 (強度効果を最小化重力効果を最大化)

メジアン径 : 0.35mm
バルク密度 : 1.65g/cm³

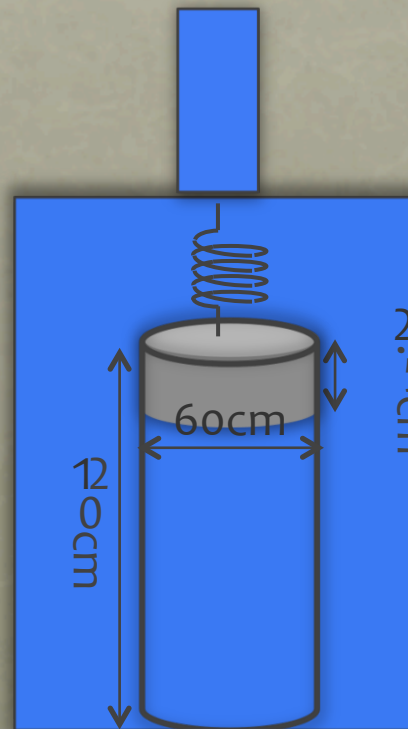


Experimental Procedure

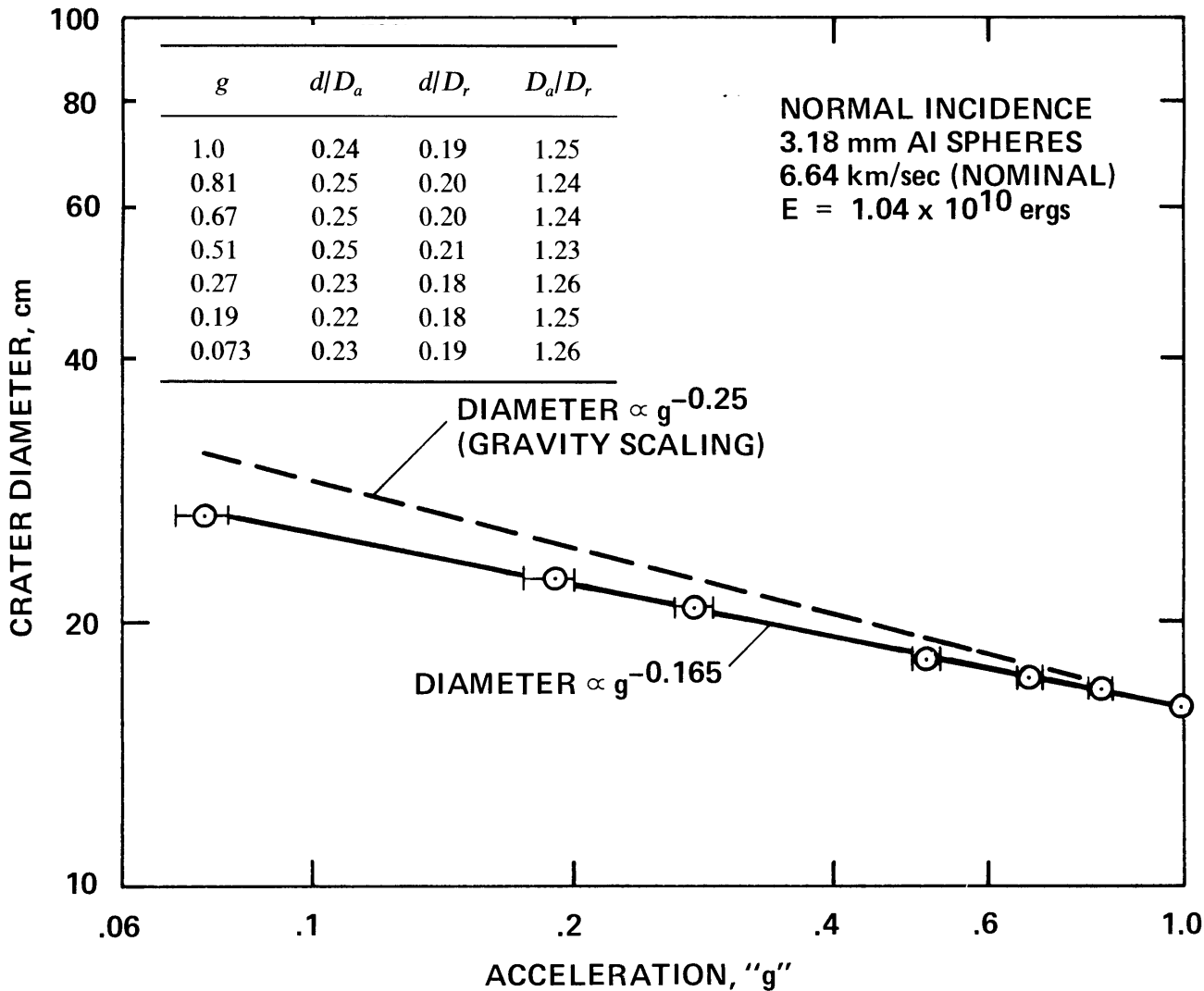
標的の設置

- ◆ 模擬重力はバネ定数を変えて変化
- ◆ 加速時計は標的内に埋めてある
→ 標的加速度・衝突時間・定重力終了時間
- ◆ チャンバー内圧力: 1mmHg以下
- ◆ 撮影: 35mmの映画用カメラ

>0.5g	<0.5g
60コマ/s	30コマ/s



Results



- ◆ 重力加速度とクレーター直径の関係

$$D \propto g^{-0.165}$$

- ◆ 重力加速度とクレーター形状の関係

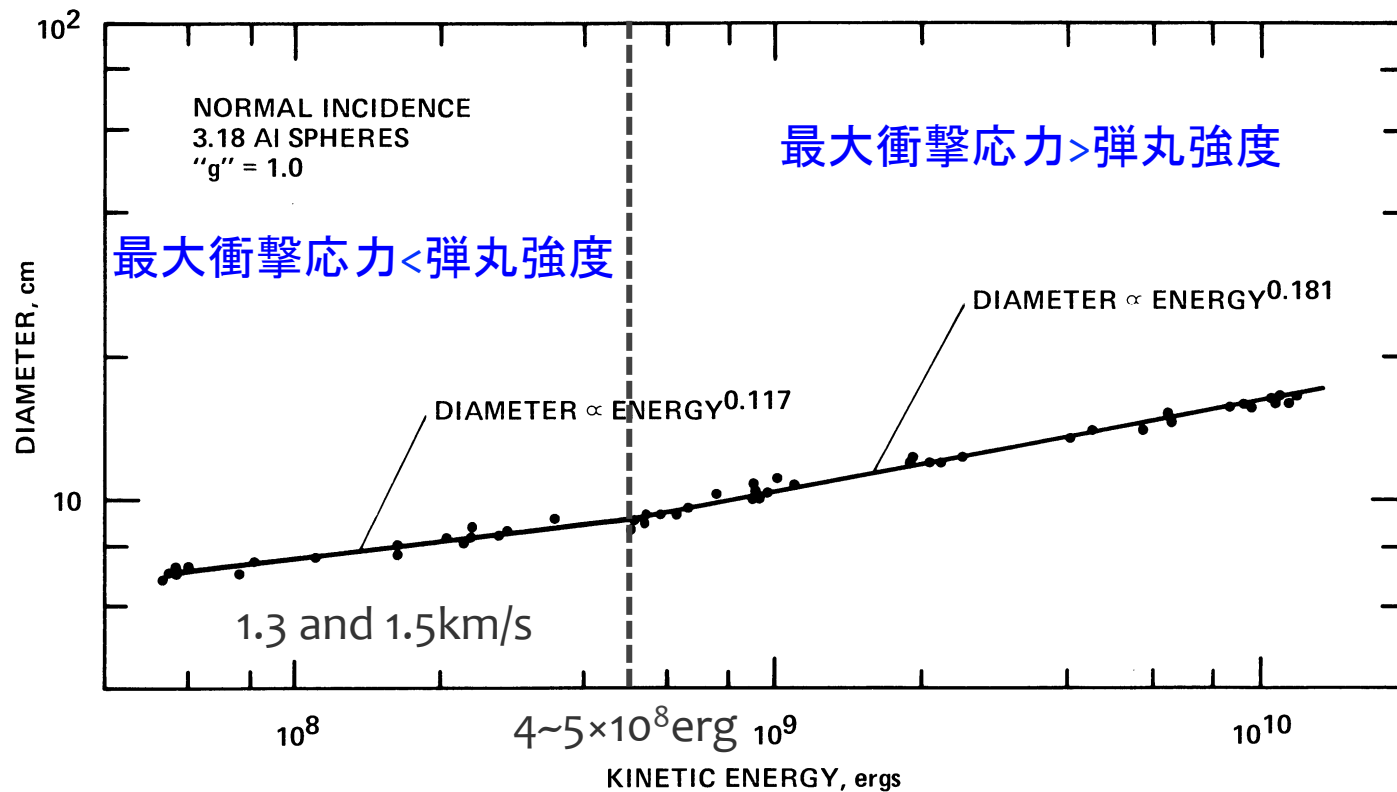
- 系統的な形状の変化は見られない

d : 元の表面からの深さ
 D_a : クレーター直径
 D_r : リム直径

Results

◆ E_k とクレーター直径の関係

- フィッティング線の傾きに変化が見られる
→クレーター形成過程が変化したことを現している



Results

◆ 弾丸の変形について

① 最大衝撃応力 < 弾丸強度

→ 弾丸が貫入する

壊れずにもとの形状を維持

② 最大衝撃応力 > 弾丸強度

→ 弾丸はクレーター底に残る

薄板 or 破片

➤ 2.0~2.5km/sを超えると、ほとんど破片は残らない

➤ さらに高速だと弾丸の溶融・蒸発が起こる

◆ クレーターの形状について

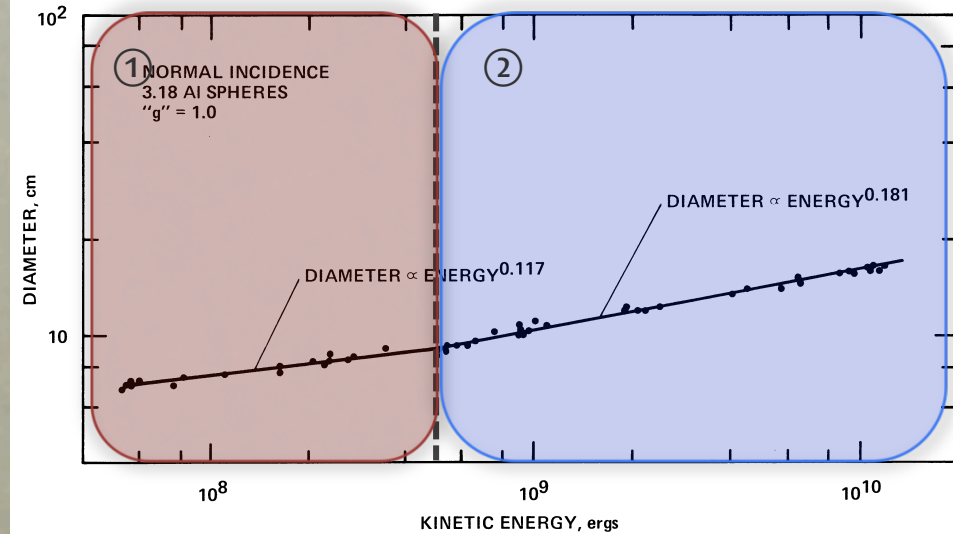
① 円錐型クレーター

② お椀型クレーター



高速度域が本研究の目的にふさわしい

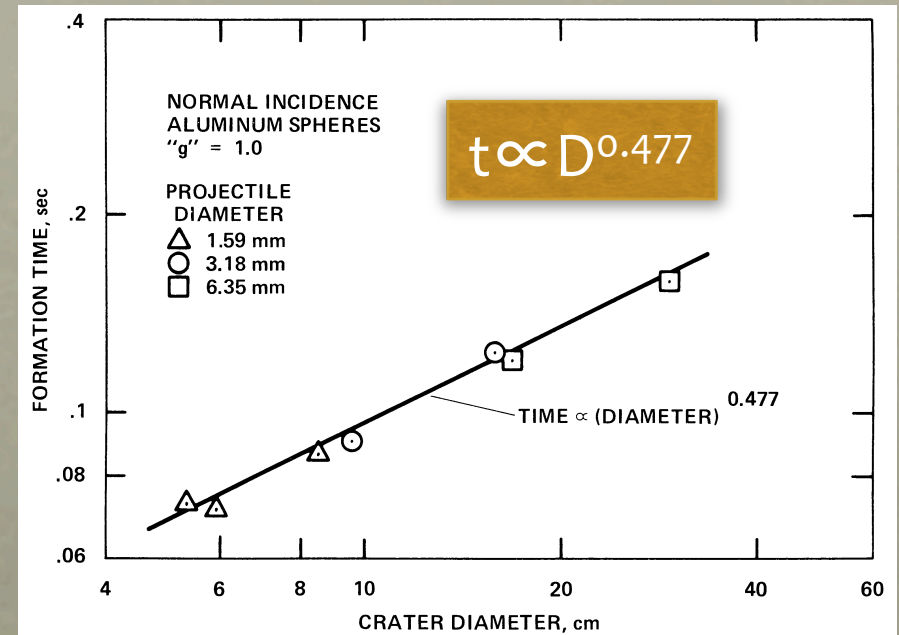
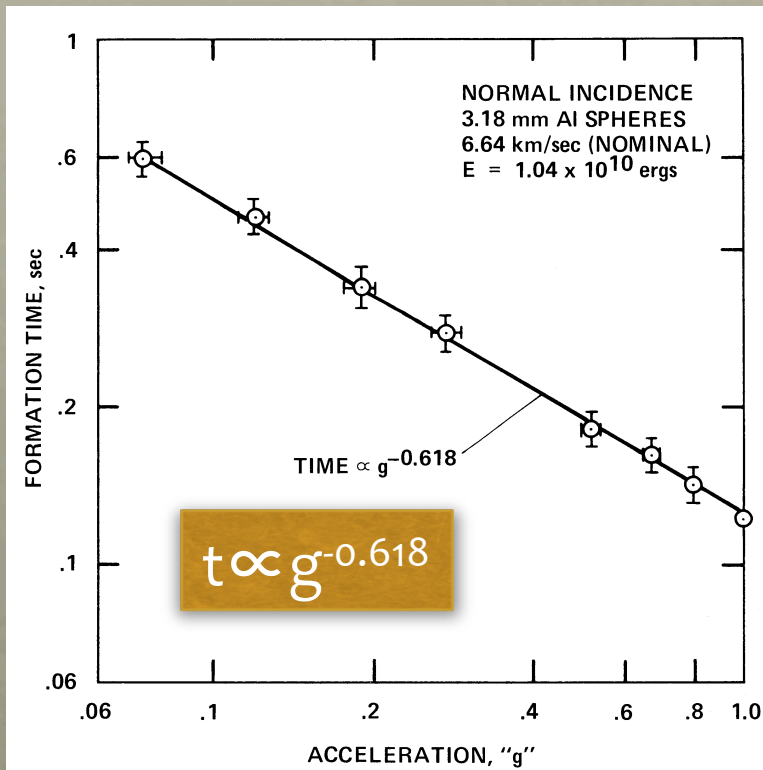
$$D \propto E_k^{0.181}$$



Results

◆ クレーター形成時間

エジェクタプリュームの根元がリム半径の1.25倍に成長した時間



グラフには示していないが...

$$t \propto K_E^{0.105}$$

Discussion

◆クレーター形成過程の次元解析は重要

➤ Charters and Summers 1959

クレーター形成エネルギー =

抵抗力に逆らってキャビティーを拡大する為に費やす仕事量

↳ 強度・天体重力

$$\text{Cratering energy} = \int_0^r \int_0^{\pi/2} (sr^2 \cos \theta + \rho gr^3 \sin \theta \cos \theta) dr d\theta.$$

$$= \frac{\pi}{12} sD^3 + \frac{\pi}{64} \rho g D^4 = \frac{\pi}{64} (\rho g D) D^3,$$

① ② ③

①: 強度に逆らうエネルギー

②: 重力に逆らうエネルギー

③: $\rho g D$ は重力的な強度を表す

Discussion

◆クレーター形成過程の次元解析は重要

- 独立した2変数(クレーター直径 D 、形成時間 t)の関係性を4つの独立変数(運動エネルギー KE ・強度 s ・重力加速度 g ・標的密度 ρ)で評価した

$$f_D(D, KE, s, g, \rho) = 0, \quad (1a)$$

$$f_t(t, KE, s, g, \rho) = 0. \quad (1b)$$

バッキンガム Π 理論

$$F_D(\pi_1, \pi_2) = 0,$$

$$F_t(\pi_3, \pi_4) = 0,$$

5(物理量の数) - 3(次元の数) = 2(無次元量の数)

$$\pi_1 = \frac{KE}{sD^3}; \quad \pi_2 = \frac{KE}{\rho g D^4};$$

$$D = k_d \left(\frac{KE}{s} \right)^{1/3} \times j(\pi_2), \quad (2a)$$

$$D = k_d \left(\frac{KE}{\rho g} \right)^{1/4} \times j(\pi_1). \quad (2b)$$

Discussion

◆ 無重力(zero g, $j(\Pi_2)=1$)の場合

$$D = k_d \left(\frac{KE}{s} \right)^{1/3} \times j(\pi_2), \quad (2a) \quad \longrightarrow \quad D = k_d \left(\frac{KE}{s} \right)^{1/3}$$

クレーター直径: エネルギーの1/3乗に比例
強度の1/3乗に反比例

◆ 強度無し(zero s, $j(\Pi_1)=1$)の場合

$$D = k_d \left(\frac{KE}{\rho g} \right)^{1/4} \times j(\pi_1). \quad (2b) \quad \longrightarrow \quad D = k_d \left(\frac{KE}{\rho g} \right)^{1/4}$$

クレーター直径: エネルギーの1/4乗に比例
 g の-1/4乗に比例

$$\begin{aligned} \text{Cratering energy} &= \int_0^r \int_0^{\pi/2} (sr^2 \cos \theta + \rho gr^3 \sin \theta \cos \theta) dr d\theta. \\ &= \frac{\pi}{12} sD^3 + \frac{\pi}{64} \rho g D^4. \end{aligned}$$

Discussion

◆ 2つの場合分けのしきい値: $s/\rho g D$

$s/\rho g D \gg 1$: 強度支配域

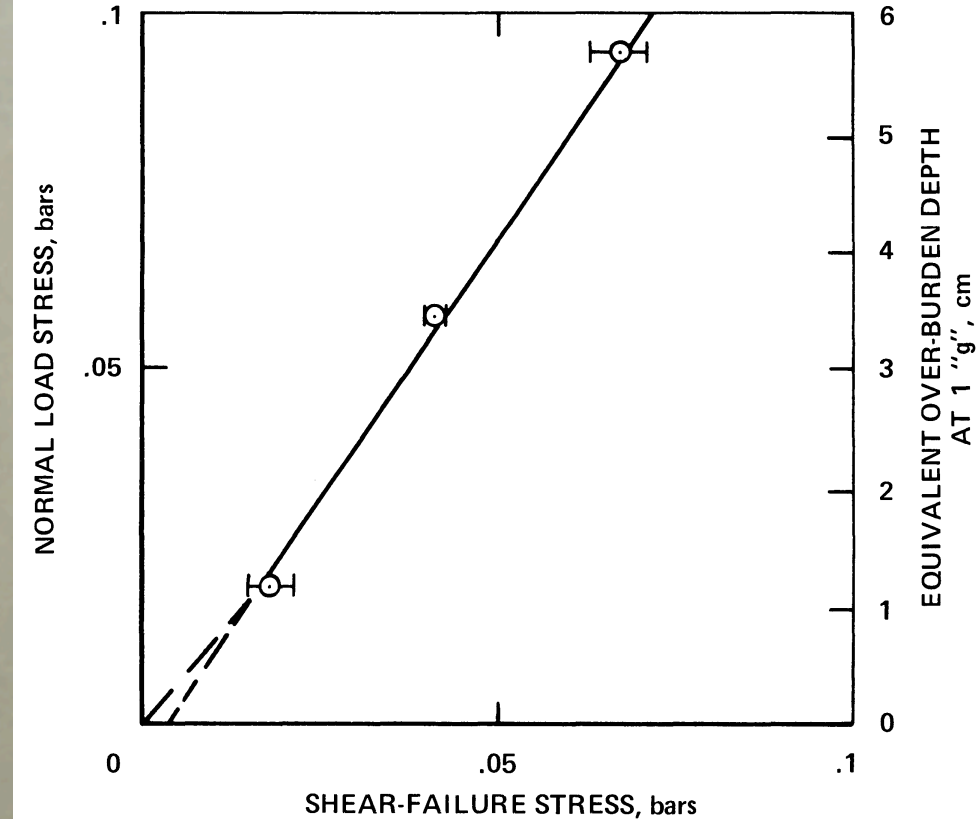
$s/\rho g D \ll 1$: 重力支配域

◆ 本研究の場合 標的: 石英砂

引っぱり強度・圧縮強度 = 0

弱い剪断強度を持つ

$0 < s/\rho g D < 1$



考慮していないが無視できない
強度の効果が効いている可能性

Discussion

$$\pi_3 = \frac{KE^2 \rho^3}{s^5 t^6}; \quad \pi_4 = \frac{KE}{\rho g^5 t^8}.$$

◆ 時間 t に関する無次元量で評価すると

$$t = k_t \frac{KE^{1/3} \rho^{1/2}}{s^{5/6}} \times j(\pi_4), \quad (4a)$$

$$t = k_t \frac{KE^{1/8}}{\rho^{1/8} g^{5/8}} \times j(\pi_3), \quad (4b)$$

E_K を消す

$$t = k_t \frac{D}{(s/\rho)^{1/2}} \times j(\pi_4), \quad (5a)$$

$$t = k_t (D/g)^{1/2} \times j(\pi_3). \quad (5b)$$

➤ 無重力(zero g , $j(\Pi_2)=j(\Pi_4)=1$)の場合

クレーター形成時間 (4a): $KE^{1/3}$ に比例

(5a): クレーターサイズに比例

➤ 強度無し(zero s , $j(\Pi_1)=j(\Pi_3)=1$)の場合

クレーター形成時間 (4b): $KE^{1/8}$ に比例 (定重力の場合)
 $g^{-5/8}$ に比例 (KE一定の場合)

(5b): $D^{1/2}$, $g^{-1/2}$ に比例

Discussion

◆ 時間 t に関する無次元量で評価すると

$$\pi_3 = \frac{KE^2 \rho^3}{s^5 t^6}; \quad \pi_4 = \frac{KE}{\rho g^5 t^8}.$$

$$t = k_t \frac{KE^{1/3} \rho^{1/2}}{s^{5/6}} \times j(\pi_4), \quad (4a)$$

$$t = k_t \frac{KE^{1/8}}{\rho^{1/8} g^{5/8}} \times j(\pi_3), \quad (4b)$$

E_K を消す

$$t = k_t \frac{D}{(s/\rho)^{1/2}} \times j(\pi_4), \quad (5a)$$

$$t = k_t (D/g)^{1/2} \times j(\pi_3). \quad (5b)$$

➤ (a),(b)の関係性は伝播速度の比に依存する

$$\frac{(s/\rho)^{1/2}}{(gD)^{1/2}} = \left[\frac{s}{\rho g D} \right]^{1/2},$$

右辺は強度の比を表す

- ◇ Gault 1973での小さいクレーター = 10のオーダー
- ◇ 地球型惑星での巨大クレーター = 0に近い値
- ◇ 本研究での石英砂上のクレーター = 10^{-1} (ほぼ 0)

クレーター形成時間には強度よりも重力が効いている

Discussion

◆ 実験結果と次元解析の評価

- 実験から求めたベキの値が次元解析から求めた値より小さくなった
- クレーター直径に関して最も大きな違いが生じた(①)

◇ KE一定の場合

実験結果 : $\alpha = 1/6$ (0.165)
 重力スケールリング : $\alpha = 1/4$ (0.25)

- 形成時間に関するベキは次元解析と実験とで一致

特に、③の一致・⑤の一致は強度でなく重力がクレーター形成に効いていることを示唆

$$t = k_t \frac{D}{(s/\rho)^{1/2}} \times j(\pi_4), \quad (5a)$$

$$t = k_t (D/g)^{1/2} \times j(\pi_3). \quad (5b)$$

Table 2. Comparison of experiment with gravity scaling ($s = 0$; $j(\pi_1) = j(\pi_3) = 1$).

Dependent variable	Conditions	Gravity* scaling	Experiment
$D \propto \left[\frac{KE}{g} \right]^\alpha$	① KE constant	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.165 \pm 0.005^\dagger$
	② g constant	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.181 \pm 0.009$
$t \propto \left[\frac{KE}{g} \right]^\beta$	③ KE constant	$\beta = 0.625$	$\beta = 0.618 \pm 0.019$
	④ g constant	$\beta = 0.125$	$\beta = 0.105 \pm 0.027$
$t \propto \left[\frac{D}{g} \right]^\delta$	⑤ g constant	$\delta = 0.5$	$\delta = 0.477 \pm 0.032$

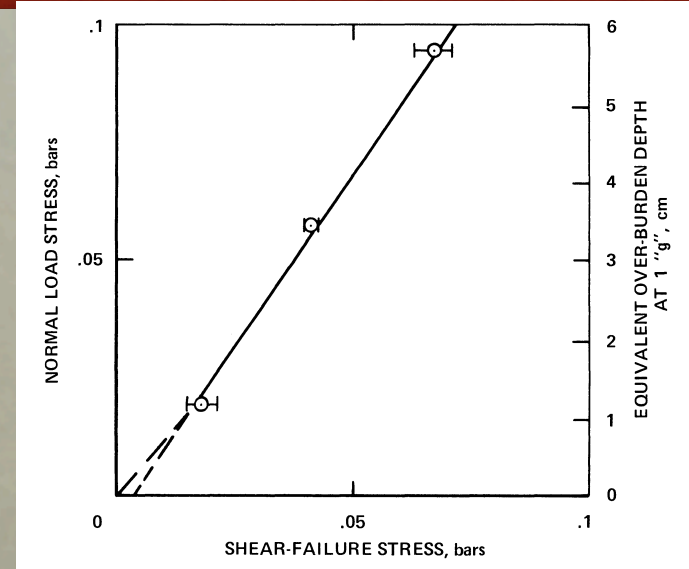
*Equations (2b), (4b), and (5b).

†Uncertainty at 95% confidence level.

Discussion

- ◆ 実験でのベキが小さくなる
→ 小さいが重要な強度が効いている可能性

今回より大きなスケールでの実験だと、強度は無視できず純粋な重カスケーリングは適用できなくなることを示唆



- ◆ スケーリングと実験の違いは強度だけの影響ではないことに注意が必要

強度スケーリング

重カスケーリング

$$KE^{1/3}$$



$$KE^{0.181}$$

$$KE^{1/4}$$



このモデルは受け入れがたく、別のファクターを考慮する必要性を示唆

Discussion

◆ 先行研究との比較

- 砂上での爆破クレーター形成に関する重力の影響を調べた実験

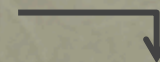
	Viktorov and Stepenov (1960)	Johnson et al (1969)
標的	湿った砂	乾燥した砂
重力	1, 25, 45, 65g	0.17, 0.38, 1, 2.5g
圧力	大気圧	600mmHg

- 1/4乗スケーリングより小さいベキ: 0.08-0.16 → 衝突実験と一致

0.08: 湿った砂の結果

↳ 強度 or 凝集力を持つ

→ 重力加速度の効果を打ち消す



◇ Schmidt 1977でも支持

粘土上での爆破クレーター形成実験
(遠心分離機を用いて480gまで加速)

Dependent variable	Conditions	Gravity* scaling	Experiment
$D \propto \left[\frac{KE}{g} \right]^\alpha$	① KE constant	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.165 \pm 0.005^\dagger$
	② g constant	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.181 \pm 0.009$

Discussion

◆ 先行研究との比較

➤ Bryan et al 1977, Killian and Germain 1977

ベキの値は埋める深さに依存 → 埋める深さが深くなるとベキは増加

➤ Shoemaker 1962, Baldwin 1963, Oberbeck 1971

衝突現象は浅い爆発と良い相関関係を示す

◇ Viktorov and Stepenov 1960 : 深い位置での爆破実験

→ 比較するのは適切ではない

➤ Johnson et al 1969

◇ 衝突実験とほぼ一致(ベキ0.11)

本研究のベキ
0.165とのずれ

1. 物性の違い(強度etc...)
2. 実験環境の真空度の違い
3. 爆破と衝突のクレーター形成過程の違い

Discussion

➤ Johnson et al 1969

標的: 丸い粒子

弱い

剪断強度・固着力

強い

強い

重力加速度の効果

弱い

➤ 本研究

標的: 角張った粒子

Johnson et al 1969は本実験より重力の影響が強く効き0.165より大きなベキになるはず

↓
しかし、0.11という値

↓
爆破実験と衝突実験でクレーター形成メカニズムが異なることを示唆する証拠かもしれない

Conclusion

- ◆本研究での実験と解析の結果から、任意の初期条件から生成されるクレーターの直径とその形成時間を計算することはできない。
- ◆衝突クレーター形成過程において2つの独立変数の重要性に注目し協調した
 - 標的物質の強度と重力加速度である
- ◆これらの役割を深く理解し、定量化することが今後の研究の目的である

Impact Cratering Experiments in Microgravity Environment

Y.Takagi et al.,2007

Lunar and Planetary Science XXXVIII(2007)

神戸大学大学院理学研究科
M1 高野翔太

Introduction

◆ はやぶさ探査

- イトカワのラブルパイル構造
- 表面のレゴリス層
 - ↳ クレーターが存在

太陽系小天体の表面での現象の研究



クレーター形成過程の理解が必要

しかし、微小重力環境でのクレーター形成実験は技術的に困難であり、あまり行われていない



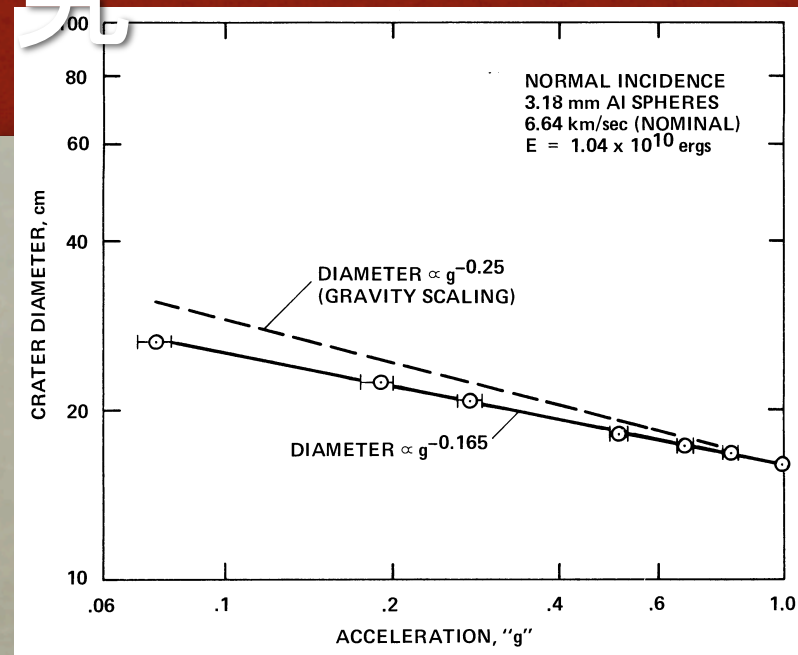
先行研究

- Colwell J. E. (2003)

低速度領域での実験(<100cm/s)

- Gault and Wedekind 1977

先ほど紹介



小天体上での現象の理解・探査結果の最大限の利用

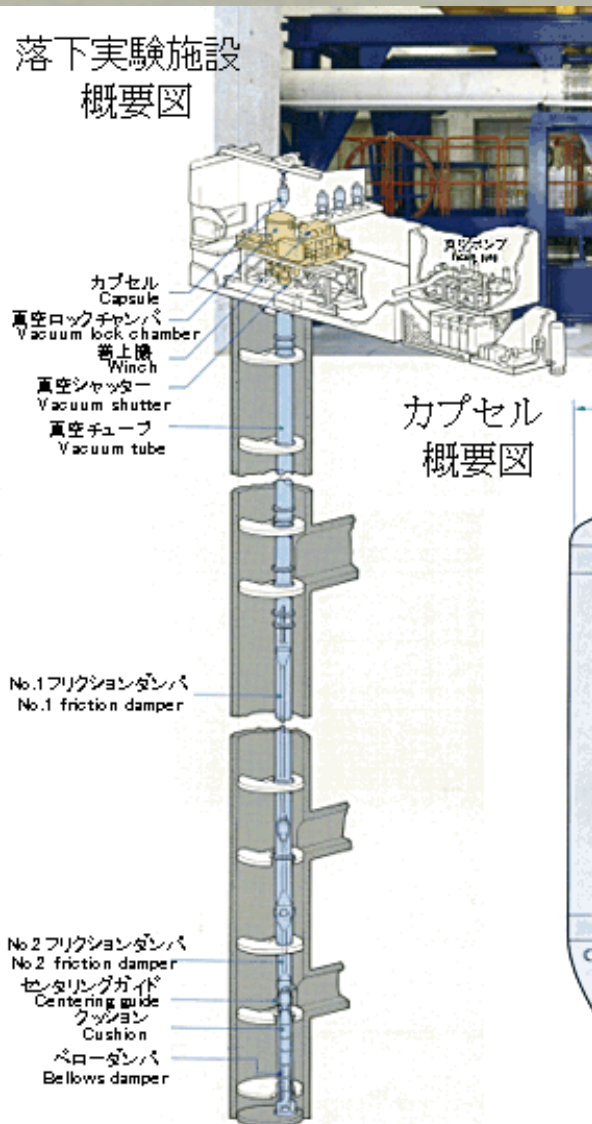


微小重力環境下でのクレーター形成実験が望まれる

◆ 微小重力環境の再現

- 1) パラボリックフライト (継続時間は長いが微小重力の質は低下)
- 2) 落下塔施設の利用

実験方法



◆ MGLAB(岐阜県土岐市)の落下塔施設
→微小重力継続時間4.5s

◆ 球弾丸: ナイロン・アルミニウム・鋼鉄
 $\varphi=2\sim 7\text{mm}$, $m=5\sim 510\text{mg}$

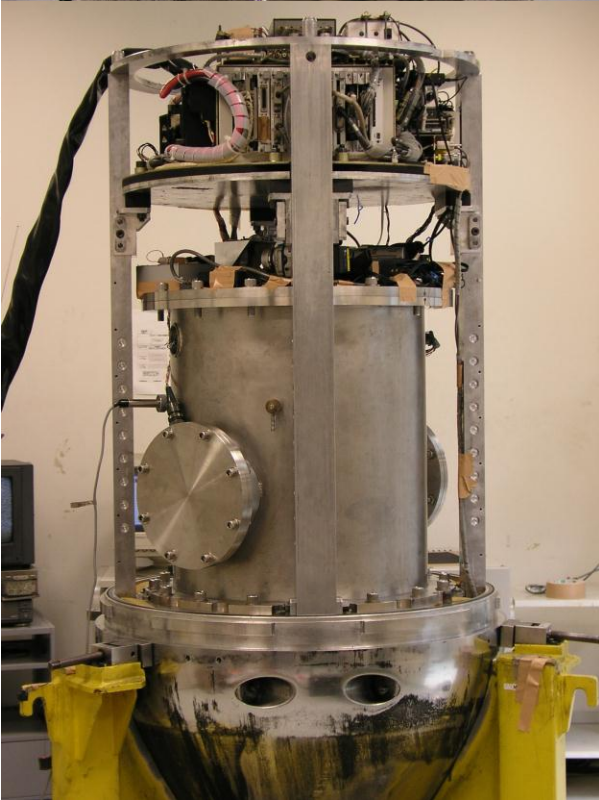
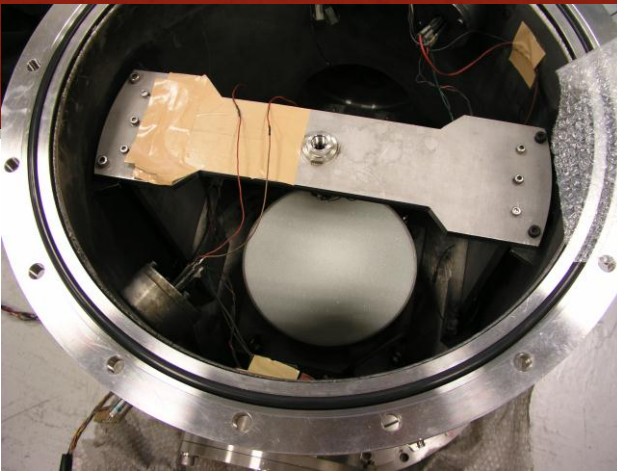
◆ 標的 : ガラスビーズ
石英砂(Ottawa産) $d=80\sim 900\mu\text{m}$

◆ セット方法: 真空容器内に衝突銃と標的容器を設置
↳ 小型一段式火薬銃
(衝突速度: 45~360m/s)

A: 2組の衝突銃・標的容器(300mm), 衝突角度 73°
・・・30回

B: 1組の衝突銃・標的容器(180mm)衝突角度 90°
・・・10回

実験方法



◆ MGLAB(岐阜県土岐市)の落下塔施設
→微小重力継続時間4.5s

◆ 球弾丸: ナイロン・アルミニウム・鋼鉄
 $\varphi=2\sim 7\text{mm}$, $m=5\sim 510\text{mg}$

◆ 標的 : ガラスビーズ
石英砂(Ottawa産) $d=80\sim 900\mu\text{m}$

◆ セット方法: 真空容器内に衝突銃と標的容器を設置
↳ 小型一段式火薬銃
(衝突速度: 45~360m/s)

A: 2組の衝突銃・標的容器(300mm), 衝突角度 73°
...30回

B: 1組の衝突銃・標的容器(180mm)衝突角度 90°
...10回

クレーター形成時間

◆ 220 μm より小さなガラスビーズ・F-75石英砂を用いた実験



{ 0.1秒以内にクレーター形成終了
微小重力と1Gでの形成時間は同じ

微小重力継続時間4.5秒は十分長い

※300 μm より大きな石英砂では画像が不鮮明になり解析を継続中

クレーターの 最終直径

◆ クレーター直径は重力に依存せず一致

➤ 他の弾丸・標的でも同様の結果

クレーター形成は重力に支配されない

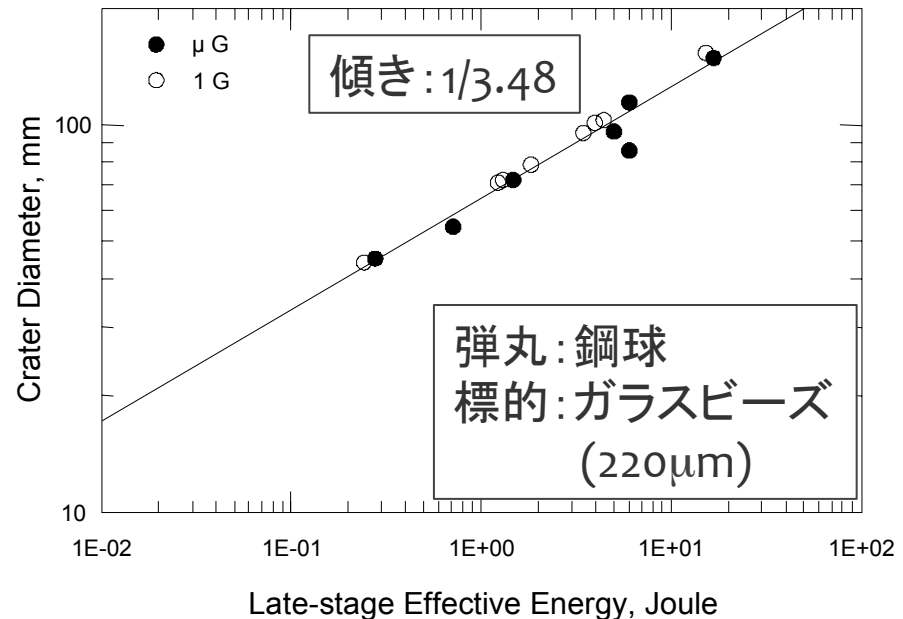
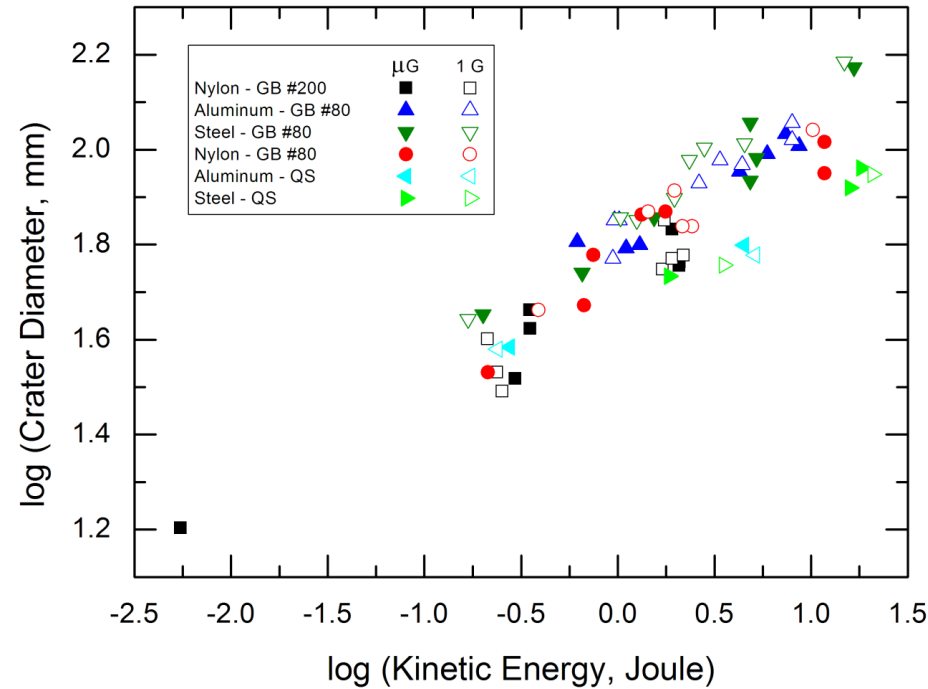
◆ フィッティング線の傾き

: $1/3.5 - 1/4.0$

➤ 重力スケールリング: $1/4$

➤ 強度スケールリング $1/3$

強度スケールリングにも従っていない



クレーターの 最終直径

◆ クレーター直径は重力に依存せず一致

➤ 他の弾丸・標的でも同様の結果

クレーター形成は重力に
支配されない

◆ フィッティング線の傾き

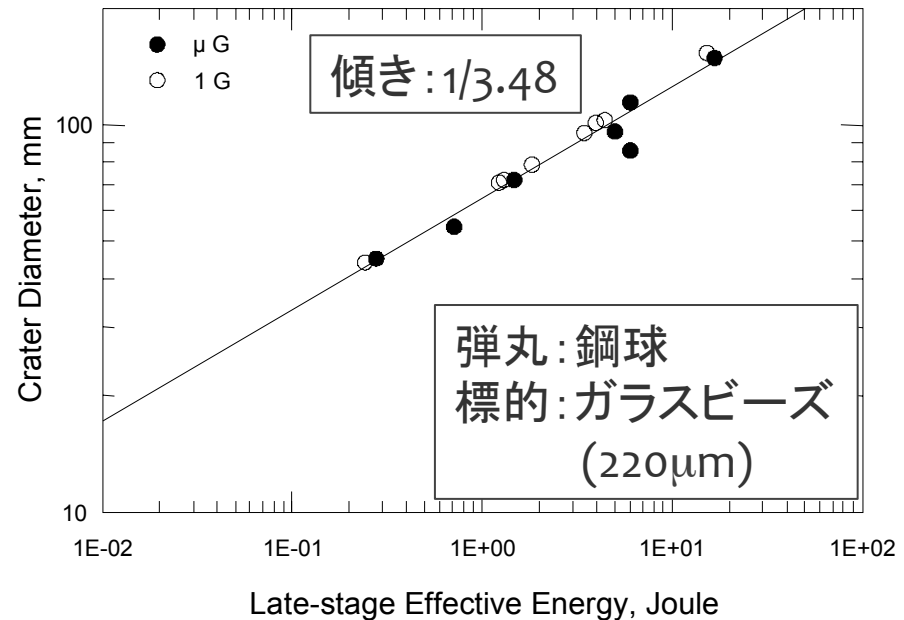
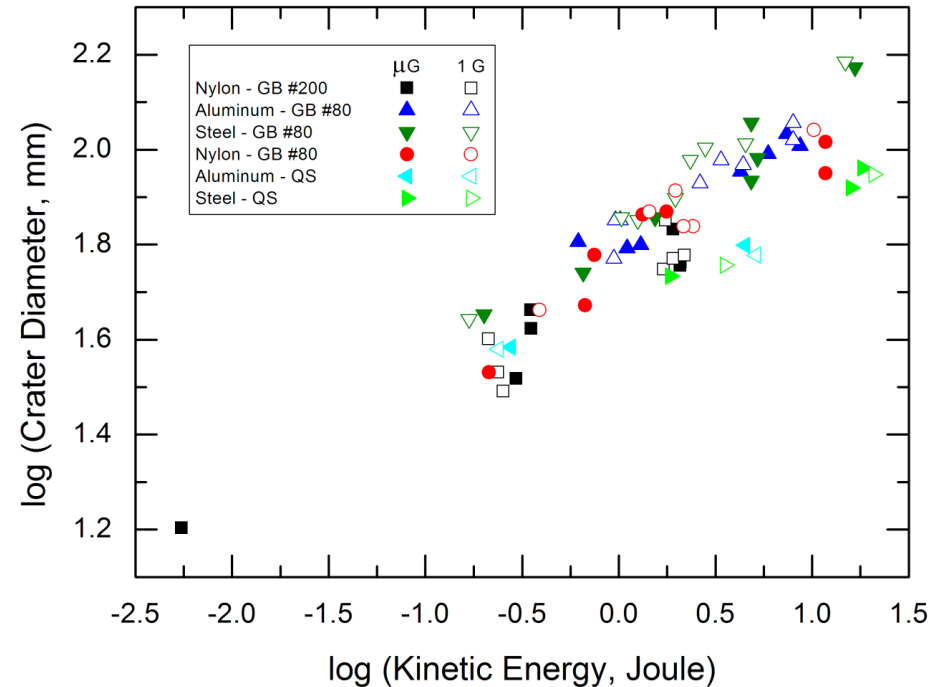
: $1/3.5 - 1/4.0$

➤ 重力スケールリング: $1/4$

➤ 強度スケールリング $1/3$

新たなスケールリング項を考える
必要がある

E.g) 粒子間の動摩擦



先行研究との比較

◆本研究での結果

クレーター形成時間・直径共に重力依存性なし

→Gault and Wedekind と異なる結果

- 粒径： 本研究 ・・・80~900 μ m
Gault and Wedekind・・・0.35mm

原因

Gault and Wedekindでは、単位体積あたりの動摩擦力が本研究より小さく、重力の影響が出やすかった可能性

動摩擦力の違いが影響している可能性

まとめ

- ◆ 微小重力・真空環境下かつ、衝突速度100m/s以上で系統的な衝突クレーター形成実験を行った
 - 重力は、クレーター形成時間・直径に影響しない
 - 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