

LAST
CHRISTMAS
WHAM!

高速度での堆積岩への クレーター形成実験

笹森 務仁¹， 永木 恵太²， 義原 拓志³

¹東京大学， ²大阪大学， ³九州工業大学

構成

- 実習概要
- 研究背景
- 研究目的
- 実験装置
- 実験結果
- 結論 & 今後の課題

実習概要

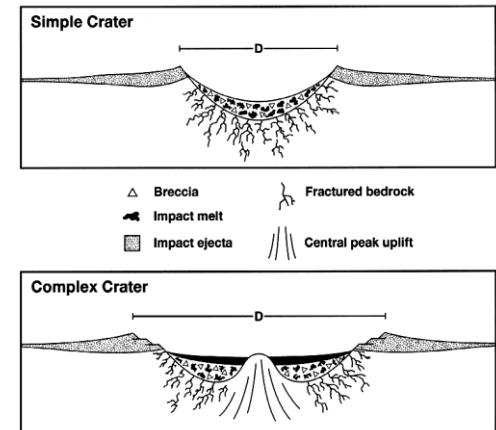
- 開催日: 2010年11月15~17日
- 開催場所: 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- テーマ: B「高速度での堆積岩へのクレーター形成実験」
- 講師: 門野敏彦, 長谷川直, 中村昭子, 鈴木絢子(敬称略)

研究背景



- 衝突クレータの解析
 - 衝突天体の情報の推定
 - サイズ分布、軌道及びそれらの時間的進化等

- クレータの形態変化
 - 衝突時の環境の推定
 - 太陽系天体の地表面進化の推定



研究背景

- クレーター解析の方法

実験室での衝突実験



惑星表面での実際のクレーター

- スケーリング則を用いる

- 物理現象を説明する無次元量
- 金属や堆積岩などのたくさんのデータが必要

研究背景

～今回用いる無次元量～

$\pi_1 = \rho_t * V / m_p$: クレータ体積(を弾丸質量で規格化)

$\pi_3 = Y / (\rho_p * U^2)$: 強度支配項

$\pi_4 = \rho_t / \rho_p$: ターゲットと弾丸の密度比

Y: ターゲット強度、V: クレータ体積、
 ρ_t : ターゲット密度、 ρ_p : 弾丸密度、
 U: 衝突速度、 m_p : 弾丸質量

～スケーリング則～

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha$$

→ 今年の夏までの実験では金属
での $\beta = -0.738$ を使用していた

→ 堆積岩でも金属と同じ β の
値を使ってもいいのか？

研究背景

- 2009年の実験実習
 - ターゲット: 砂岩、中国砂岩、泥岩、石灰岩、大理石
 - 弾丸: $\Phi 7.14$ のナイロン球、2~4km/sで衝突
 - 13shots中11shotsの計測(2shotsは計測不可)
- 2010年の基礎実習
 - ターゲット: パキスタン砂岩
 - 弾丸: $\Phi 14.8$, 長さ20.0mmのポリカ円柱, 0.8~1km/sで衝突
 - 速度計測のため、プロジェクトイル内に磁石
 - 4shotsの計測

研究目的

- データの蓄積
 - ターゲットが堆積岩の場合のクレーターのデータを取る
 - 金属の場合と堆積岩の場合の β の値の比較
 - π_3 の値を一定にして実験を行う

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha$$

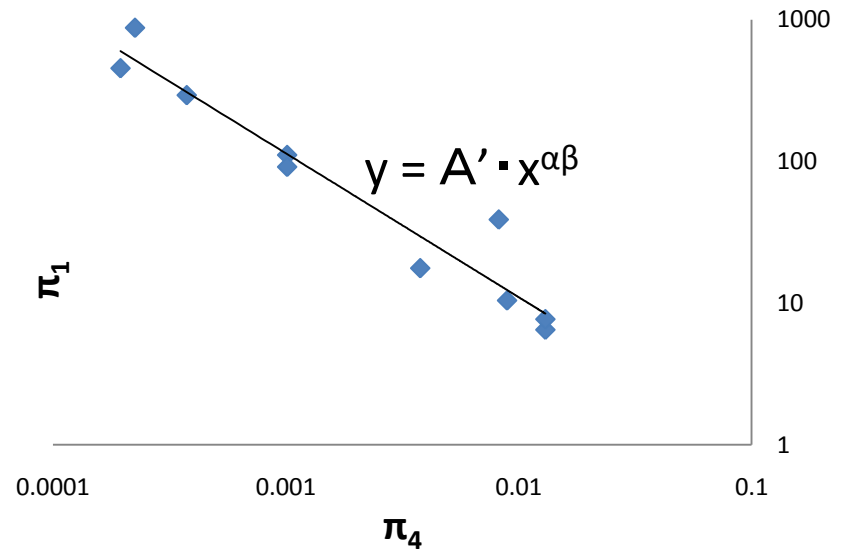
$$\pi_3 = Y / (\rho_p \cdot U^2) : \text{強度支配項}$$

研究目的

$\alpha\beta$ を求める。

$$\begin{aligned}\pi_1 &= A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha \\ &= \boxed{A \cdot \pi_3^\alpha} \cdot \pi_4^{\alpha\beta} \\ &\quad \parallel \\ &\quad \text{Const.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho_t \cdot V / m_p \\ \pi_3 &= Y / \rho_p \cdot U^2 \\ \pi_4 &= \rho_t / \rho_p\end{aligned}$$



$$\pi_1 = A' \cdot \pi_4^{\alpha\beta}$$

→ $\alpha\beta$

研究目的

～全データより～

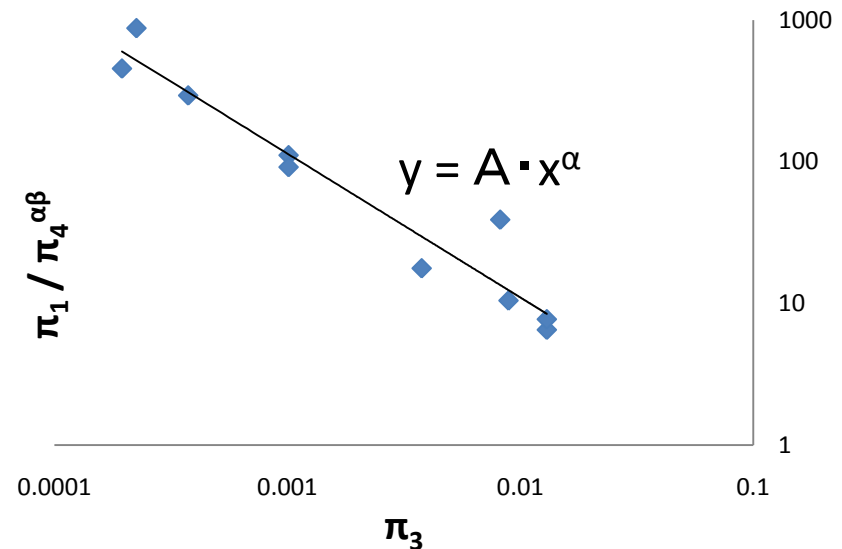
求めた $\alpha\beta$ の値を用い、 α と A を求める。

$$\pi_1 = A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^{\alpha\beta}$$

$$\pi_1 = \rho_t \cdot V / m_p$$

$$\pi_3 = Y / \rho_p \cdot U^2$$

$$\pi_4 = \rho_t / \rho_p$$



$$\pi_1 / \pi_4^{\alpha\beta} = A \cdot \pi_3^\alpha$$



A, α, β

研究目的

βを求めるには・・・

本実験データ

→ αβを求める

全データ

→ αを求める

→ βが求まる

αβを用いて

$$\pi_1 = \underbrace{A \cdot \pi_3^\alpha}_{\text{Const.}} \cdot \pi_4^{\alpha\beta}$$

$$\pi_1 / \pi_4^{\alpha\beta} = A \cdot \pi_3^\alpha$$

αβとαの値より

π₃を一定にしたクレーター形成実験のデータが必要

実験手順

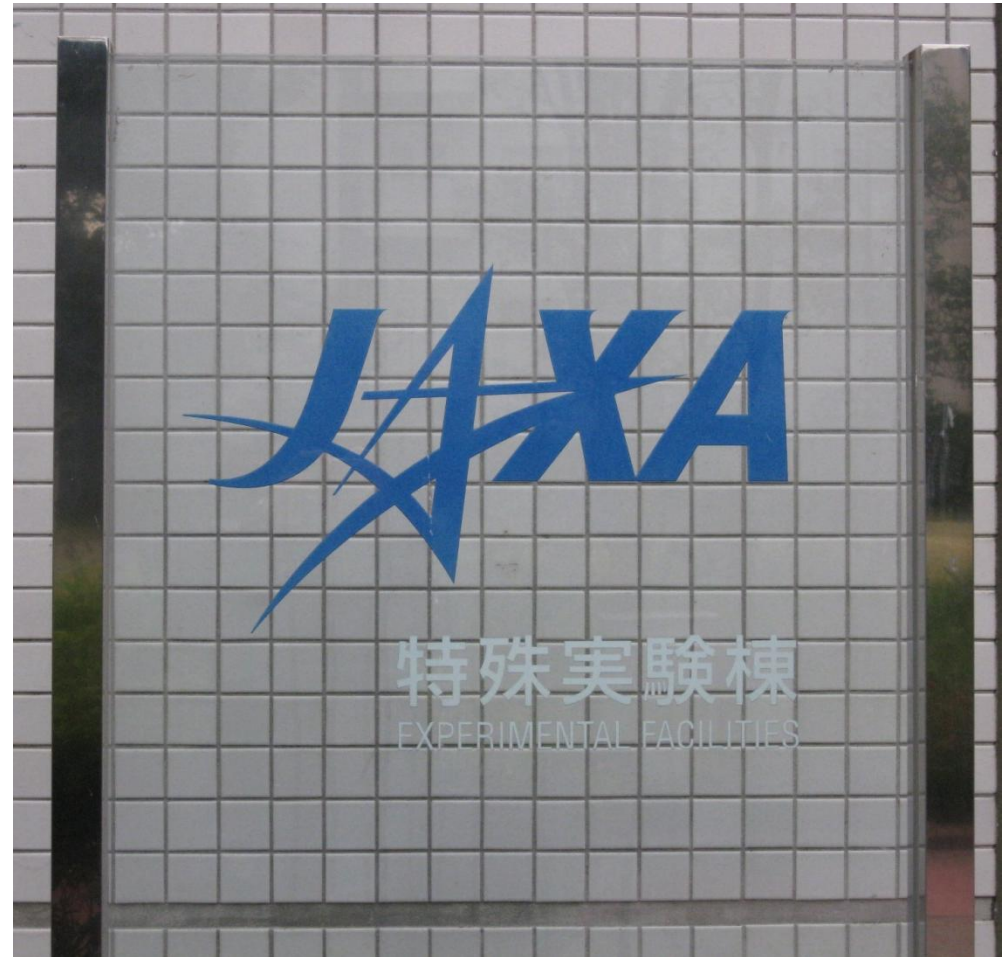
- プロジェクタイルの質量と径を測定し、密度を求める。
- π_3 一定の条件を元に、各プロジェクタイルの速度を決定。
- 二段式軽ガス銃を用いてプロジェクタイルを設定速度で超高速衝突させる。

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha$$

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho_t \cdot V / m_p \\ \pi_3 &= Y / \rho_p \cdot U^2 \\ \pi_4 &= \rho_t / \rho_p\end{aligned}$$

実験装置

- 二段式軽ガス銃
- プロジェクティル
- サボ
- ターゲット



発射装置 ～二段式軽ガス銃～



～諸元～

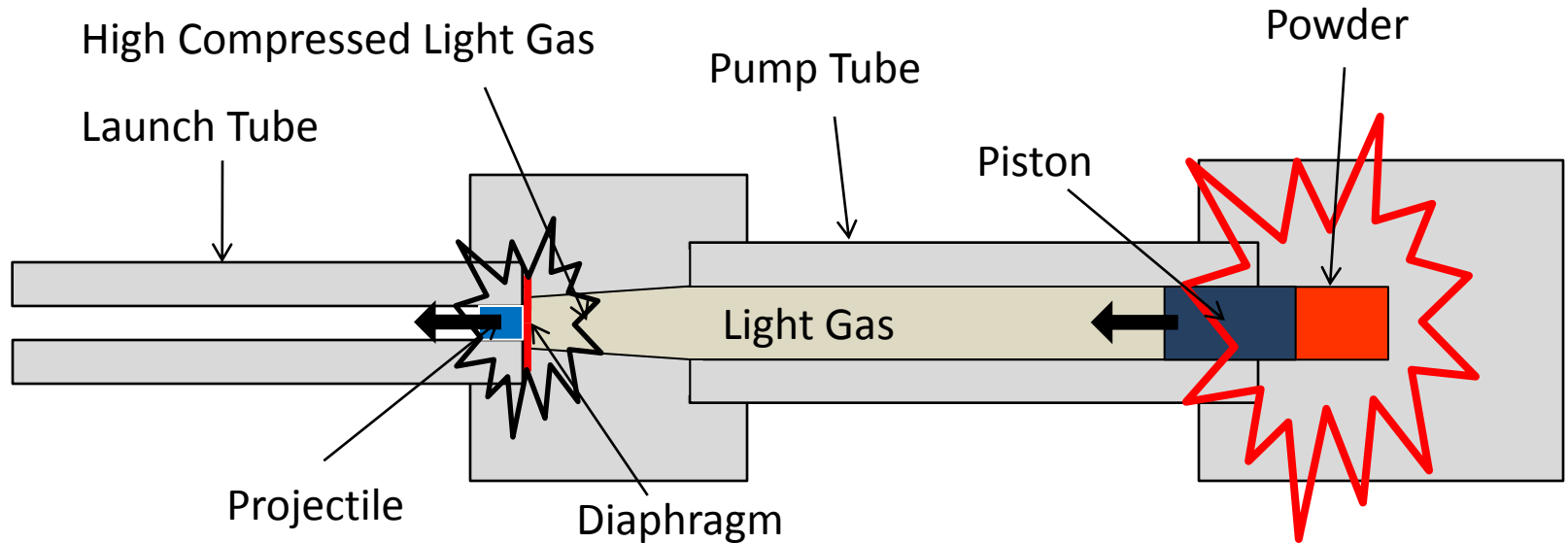
- 常時運転最高速度
 - 7 km/s
- 発射管内径
 - 7 mm
- 速度計測法
 - レーザ

発射装置

～二段式軽ガス銃～

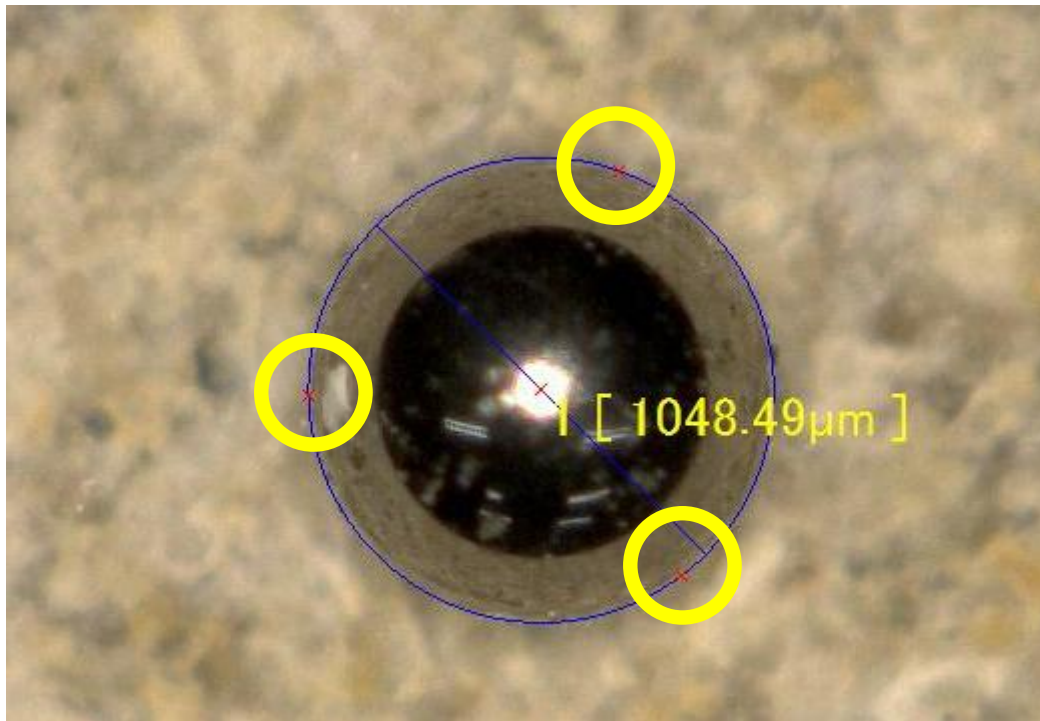
火薬の点火 → ピストンの加速 → 軽ガスの圧縮

→ ダイアフラムの破断 → 飛翔体の発射



プロジェクトタイトル

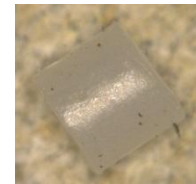
- 画像処理による寸法測定
 - KEYENCE VHX-1000を用いた



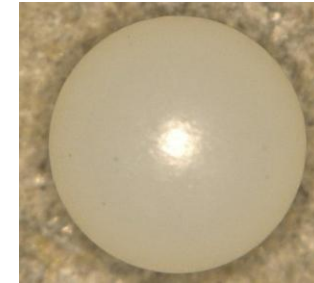
- 円周上の任意の3点を指定
- 3点で決定される円の直径を計測

プロジェクトタイル

材質	Φ (mm)	高さ (mm)	質量 (mg)	密度 (g/cm ³)
ナイロン	1.035	0.919	0.80	1.03
ナイロン	3.112	/	19.18	1.22
ナイロン	3.112	/	19.34	1.23
ガラス	1.038	/	1.61	2.75
アルミナ	1.014	/	2.01	3.68
チタン	1.007	/	2.67	4.98
チタン	1.002	/	2.78	5.27
SUS304	0.981	/	3.95	7.99
SUS304	0.957	/	3.88	8.45
WC	0.996	/	7.86	15.18



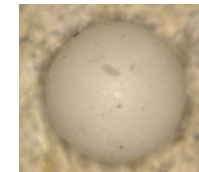
ナイロン



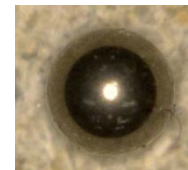
ナイロン
φ3



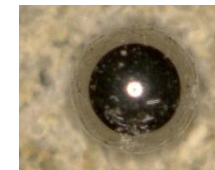
ガラス



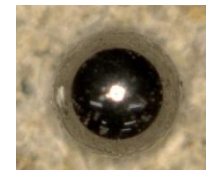
アルミナ



チタン



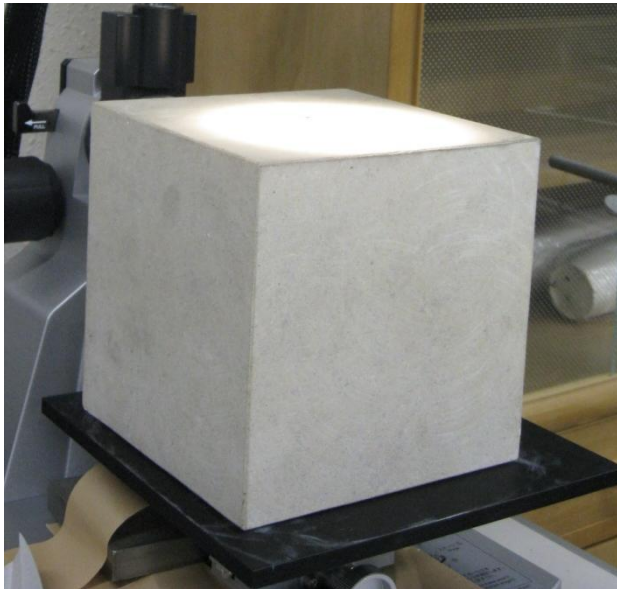
SUS304



WC

ターゲット

- 砂岩
 - 主に砂が続成作用により固結してできた岩石。
 - 堆積岩でもっとも一般的なものの一つ。



～今回使用品～

-パキスタン砂岩

-150 × 150 × 150

-約7.8kg

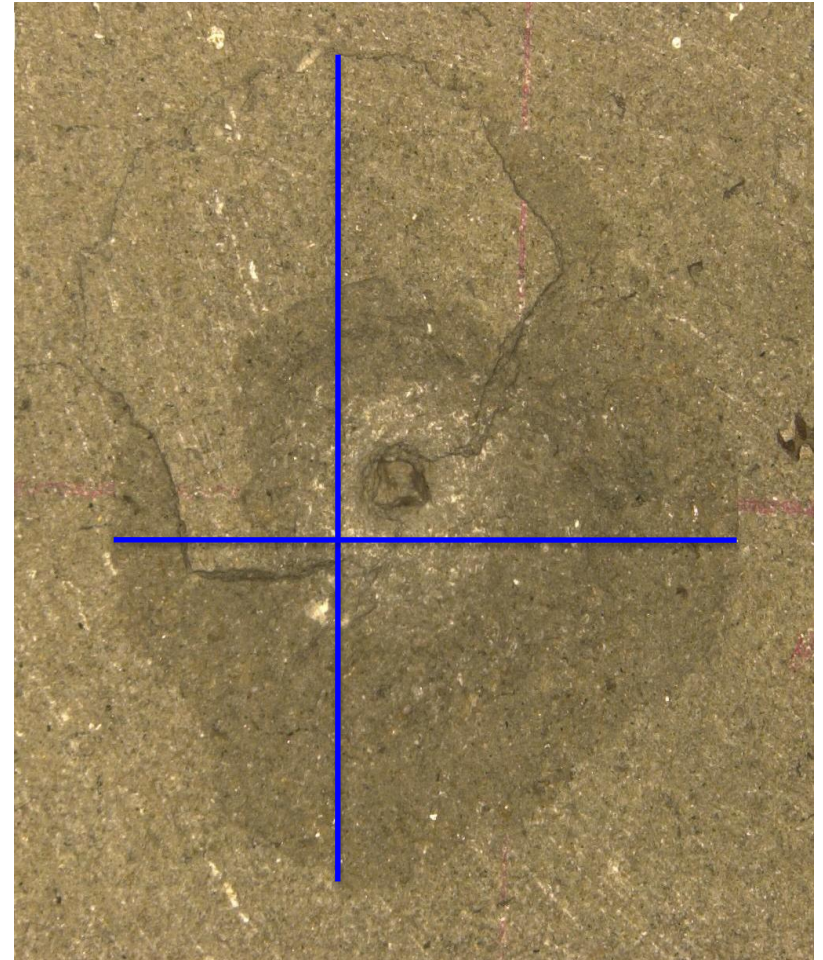
-約2.3g/cm³

-ファニチャーストーン株式会社

径の測り方

去年の値と比較するためクレーター測定
の判断基準は同じ方法で行なう

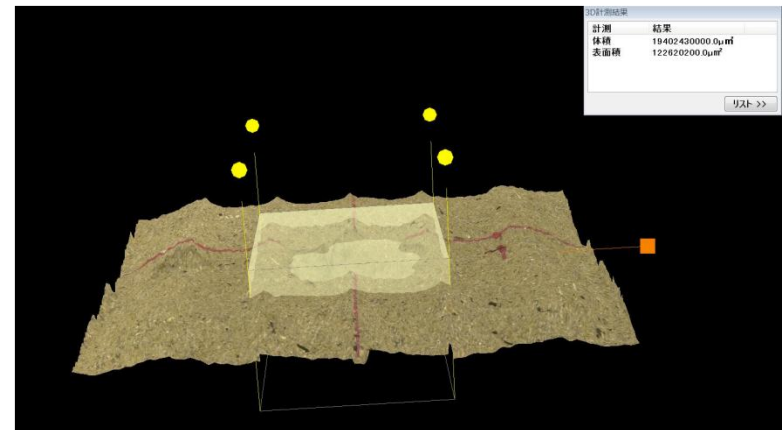
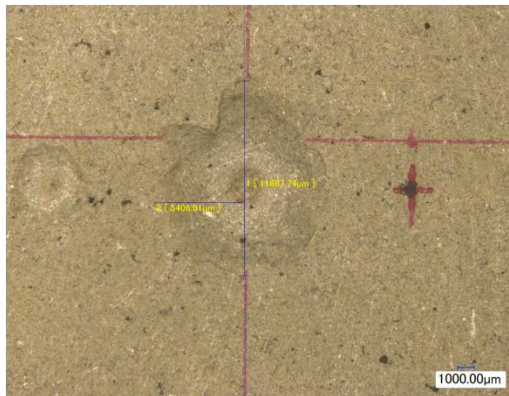
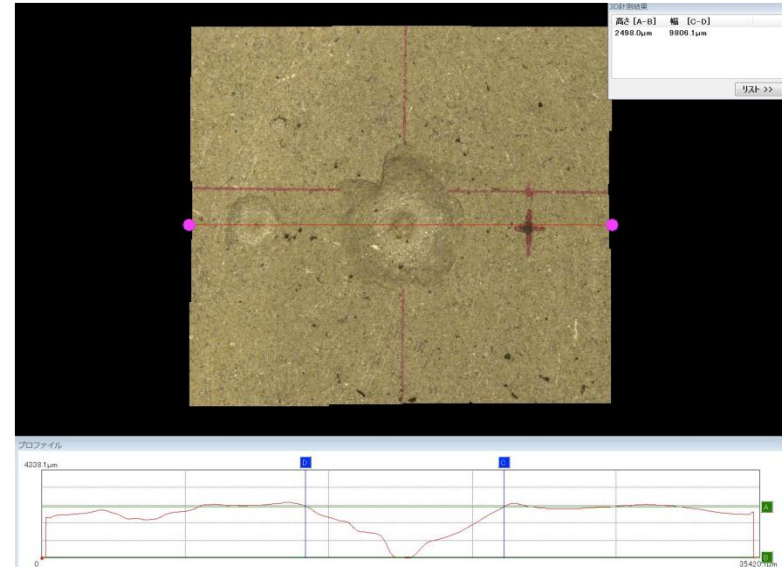
- スポレーションを含むクレーター
の径を測定する
- クレーターの中で一番長い
径と、それに垂直な一番
長い径を選択する



shot8: SUS304
速度 2.564 km/s

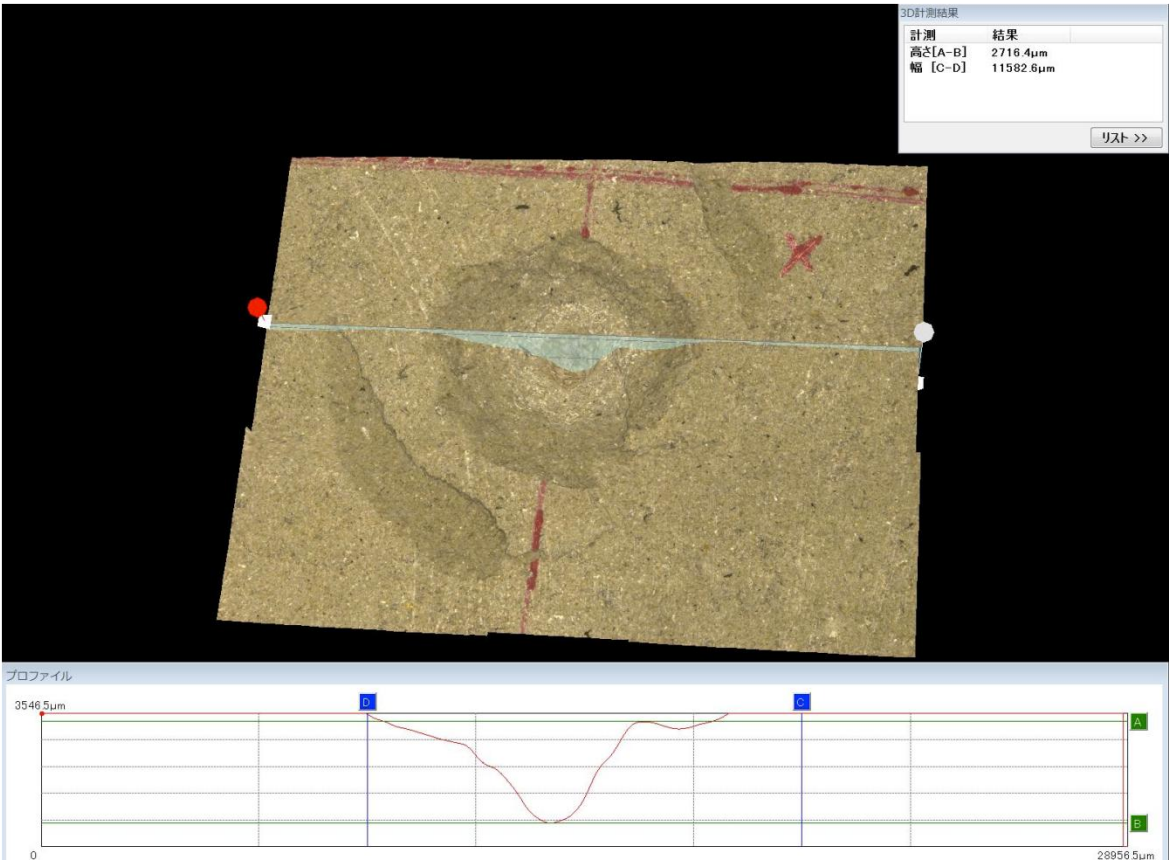
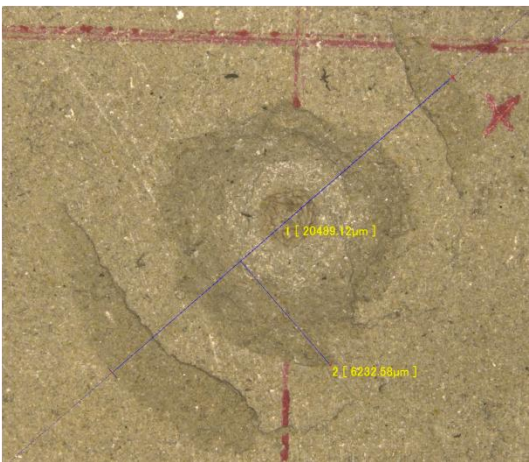
実験結果

•shot4	アルミナ
•速度	3.779 km/s
•3D体積	0.0608 cm ³
•深さ	1.830 mm
•径H	10.395 mm
•径V	10.950 mm
•円錐体積	0.0545 cm ³



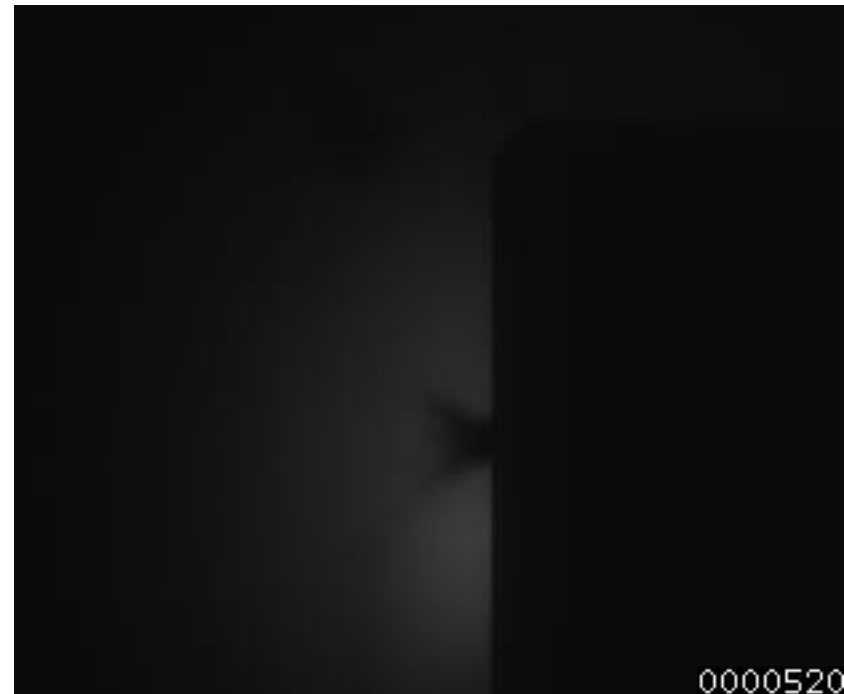
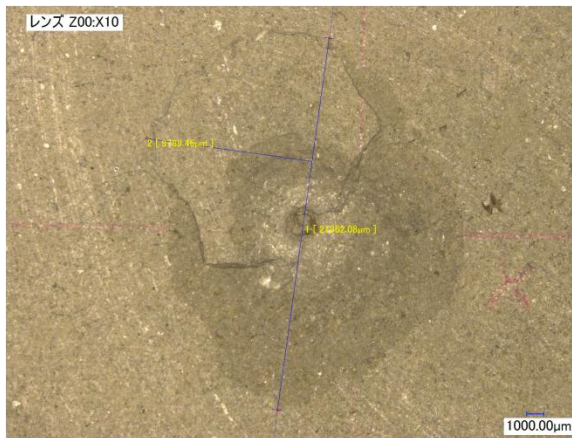
実験結果

•shot5	SUS304
•速度	3.561 km/s
•3D体積	0.0170 cm ³
•深さ	2.975 mm
•径H	22.530 mm
•径V	21.700 mm
•円錐体積	0.381 cm ³



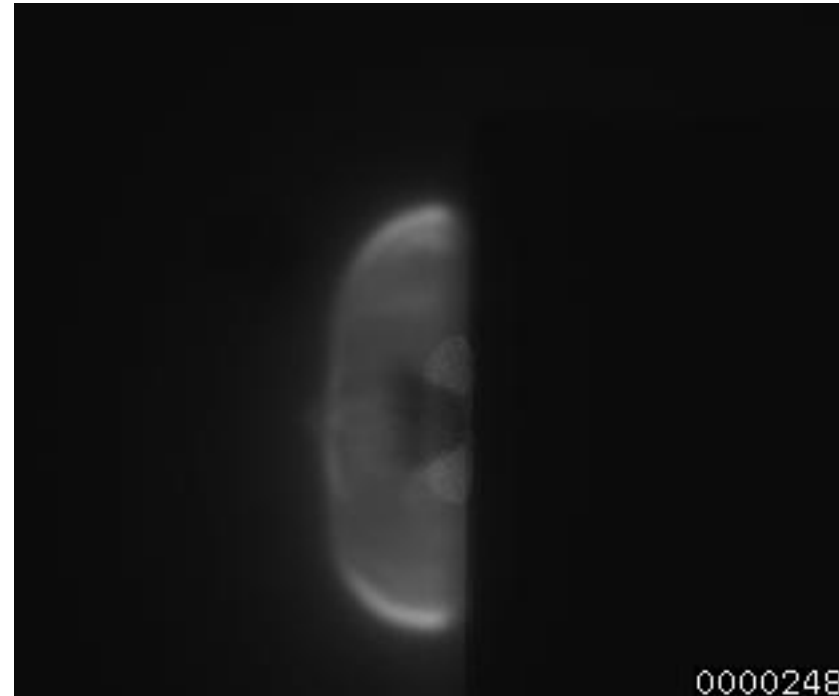
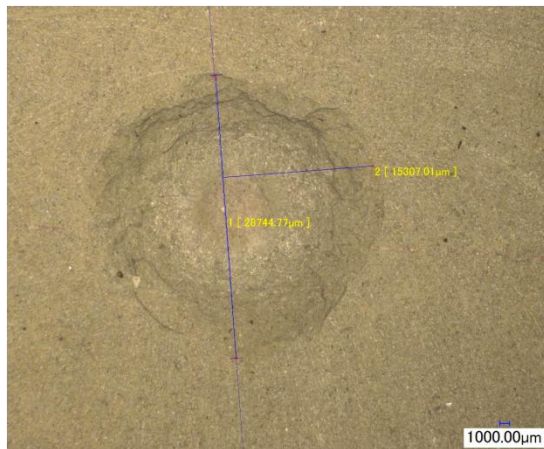
実験結果

•shot8	SUS304
•速度	2.567 km/s
•3D体積	0.0725 cm ³
•深さ	2.490 mm
•径H	20.260 mm
•径V	20.950 mm
•円錐体積	0.277 cm ³



実験結果

•shot9	ナイロンφ3mm
•速度	6.814 km/s
•3D体積	0.656 cm ³
•深さ	5.555 mm
•径H	28.840 mm
•径V	28.565 mm
•円錐体積	1.198 cm ³



実験結果

shot	飛翔体		クレータ				
	材質	速度 (km/s)	体積3D (cm ³)	深さ (mm)	径H (mm)	径V (mm)	体積 (cm ³)
2	ナイロン	6.875	0.0126	1.505	9.810	9.745	0.0377
3	WC	2.047	0.0643	1.855	15.06	11.79	0.0862
4	アルミナ	3.779	0.0608	1.830	10.39	10.95	0.0545
5	SUS304	3.561	0.0170	2.975	22.53	21.70	0.3878
6	ガラス	4.794	0.0127	1.715	9.705	8.765	0.0382
7	チタン	3.655	0.0120	2.065	10.87	9.030	0.0530
8	SUS304	2.567	0.0725	2.490	20.26	20.95	0.2767
9	ナイロンΦ 3mm	6.814	0.0656	5.555	28.84	28.57	1.1980
10	ナイロンΦ 3mm	4.892	1.3300	4.760	26.07	23.41	0.7605
11	チタン	3.046	0.0163	1.595	11.24	11.29	0.0530

実験結果

$$\pi 1 = \rho_t * V / m_p$$

$$\pi 3 = Y / \rho_p * U^2$$

$$\pi 4 = \rho_t / \rho_p$$

shot	飛翔体		クレータ		π 1	π 3	π 4
	材質	速度 (km/s)	3D体積 (μ m3)	計算体積 (cm3)			
2	ナイロン	6.875	0.0126	0.0377	117.708	0.000225	2.416368
3	WC	2.047	0.0643	0.0862	27.426	0.000173	0.164667
4	アルミナ	3.779	0.0608	0.0545	67.996	0.000210	0.680135
5	SUS304	3.561	0.0170	0.3878	241.307	0.000109	0.313064
6	ガラス	4.794	0.0127	0.0382	59.305	0.000174	0.910322
7	チタン	3.655	0.0120	0.0530	47.698	0.000156	0.474193
8	SUS304	2.567	0.0725	0.2767	178.509	0.000198	0.295825
9	ナイロンΦ 3mm	6.814	0.0656	1.1980	156.1885	0.000195	2.057237
10	ナイロンΦ 3mm	4.892	1.3300	0.7605	98.328	0.000375	2.040214
11	チタン	3.046	0.0163	0.0530	49.709	0.000238	0.501824

実験結果

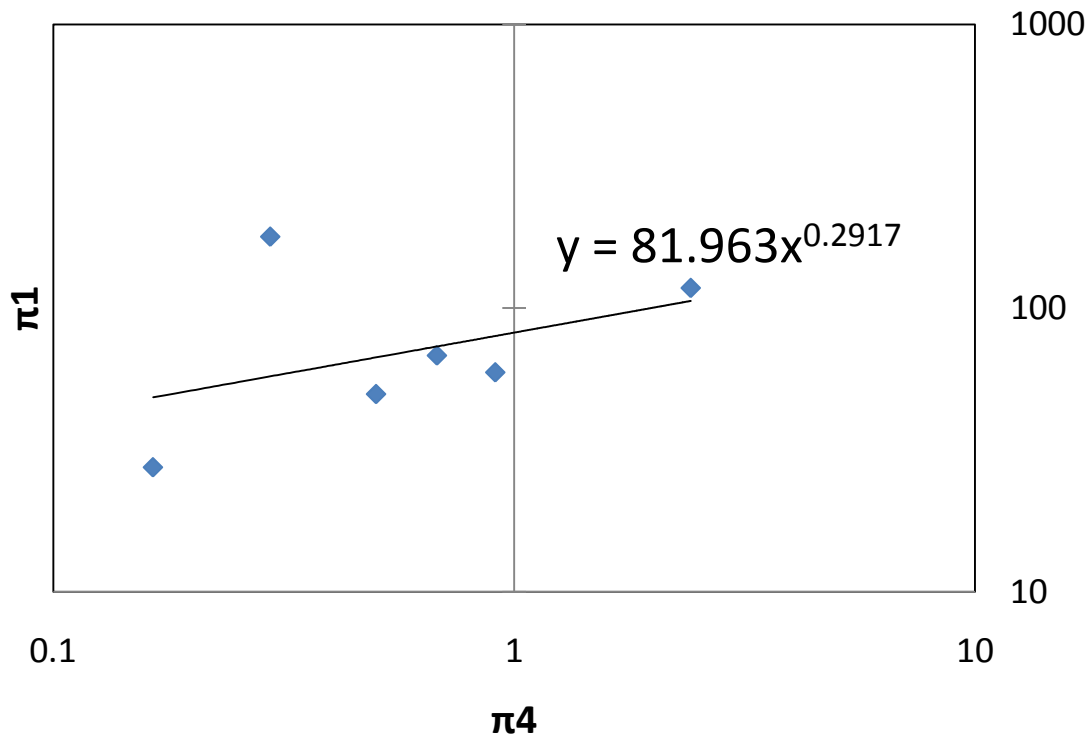
- 第一段階 : 今回のデータを用いる。
 - できるだけ $\pi_3 \doteq \text{Const}$ と考えるために、shot5(SUS),7(チタン)を除き、 $\Phi 3\text{mm}$ の弾丸のデータものぞく

$$\begin{aligned}\pi_1 &= A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha \\ &= \boxed{A \cdot \pi_3^\alpha} \cdot \pi_4^{\alpha\beta} \\ &\quad \parallel \\ &\quad \text{Const.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\pi_1 &= A' \cdot \pi_4^{\alpha\beta} \\ &\quad \longrightarrow \boxed{\alpha\beta}\end{aligned}$$

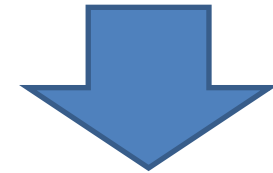
第一段階

～今回の実験結果より～



$$\begin{aligned} \pi_1 &= A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha \\ &= A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^{\alpha\beta} \\ &\parallel \\ &\text{Const.} \end{aligned}$$

よって $\alpha \cdot \beta$ は



$$\alpha \cdot \beta = 0.2917$$

実験結果

- 第二段階 : 過去も含めた全データを用いる。
 - 去年のデータのshot3(石灰岩),shot11(泥岩)は粉砕してデータがない

$$\pi_1 = A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^{0.2914}$$

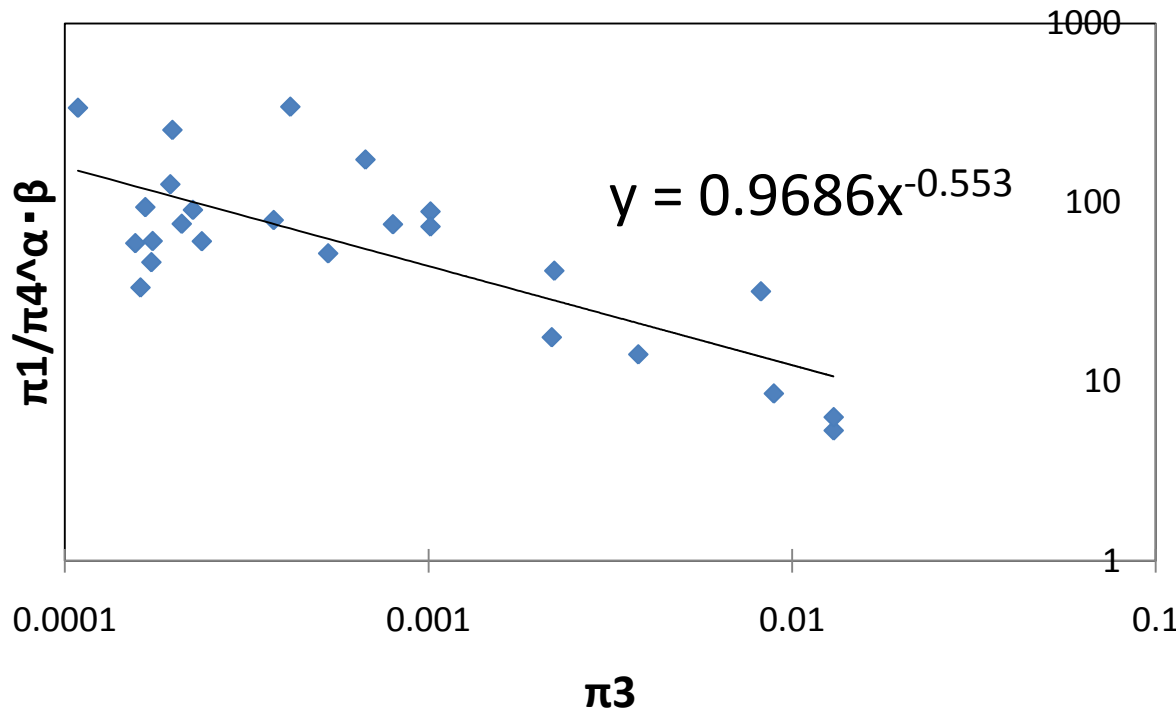
$$\pi_1/\pi_4^{0.2914} = A \cdot \pi_3^\alpha$$



A、 α 、 β

第二段階

～全部の実験結果より～



$$\pi_1 / \pi_4^{0.2914} = A * \pi_3^\alpha$$



よって

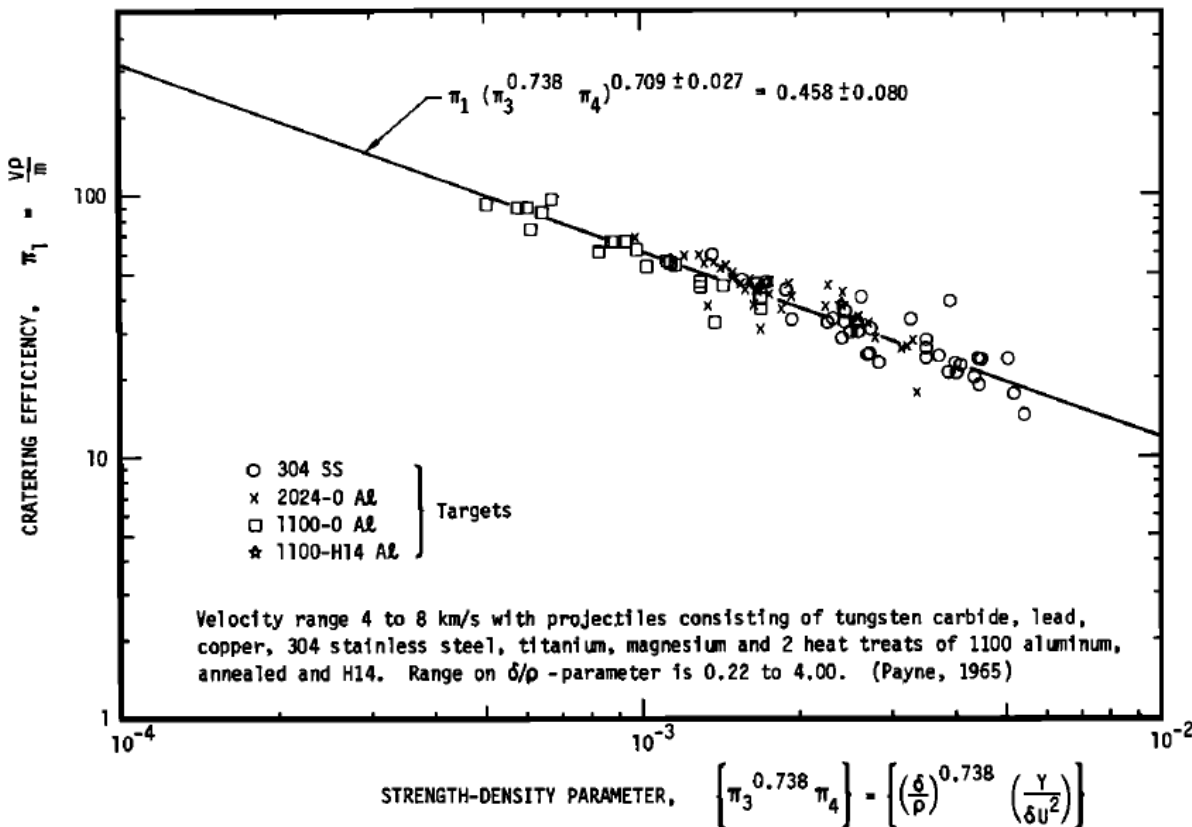
$$\alpha = -0.553$$

$$\beta = -0.527$$

$$A = 0.9686$$

考察

• 金属を使ったスケーリング則との比較



$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha$$

K. A. HOLSAPPLE, R. M. SCHMIDT
(1982)より

$$\alpha = -0.709$$

$$\beta = -0.738$$

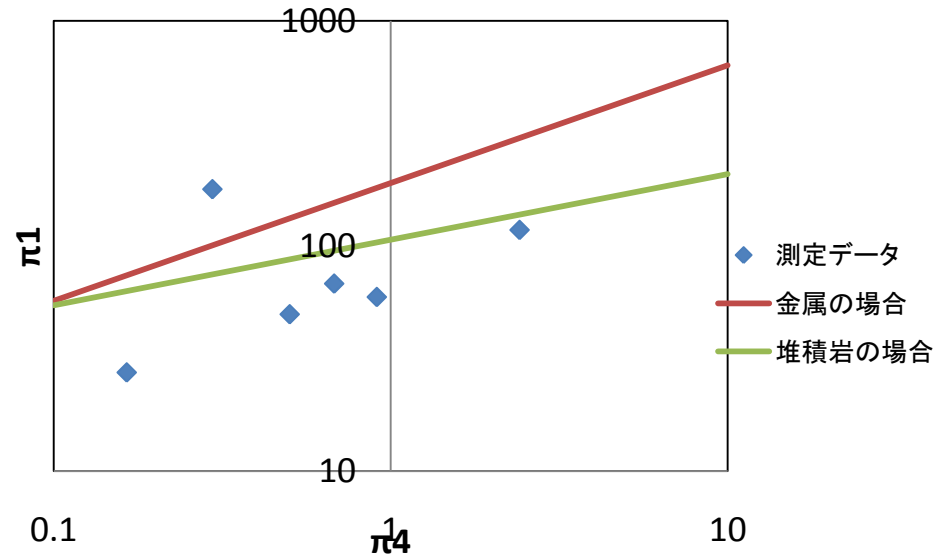
$$A = 0.458$$

考察

• 金属を使ったスケーリング則との比較

$$\begin{aligned} \pi_1 &= A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha \\ &= A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^\gamma \quad \text{とすると} (\gamma = \alpha \cdot \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{金属}} &= 0.523 \\ &> \\ \gamma_{\text{堆積岩}} &= 0.291 \end{aligned}$$



➡ 堆積岩の方がターゲットと弾丸の密度比の変化によるクレーターの大きさの変化が小さい

➡ 今回の実験で求めた γ を使うことで
実際に惑星面などに隕石が衝突した場合の隕石と衝突地点の密度比の推測の誤差を小さくすることができる

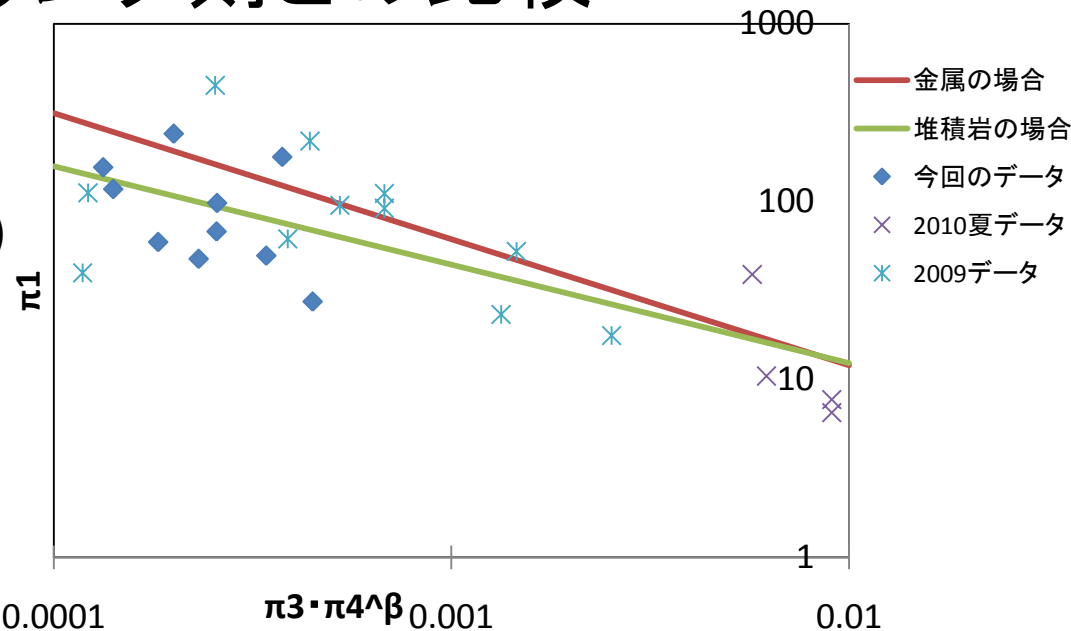
考察

● 金属を使ったスケージング則との比較

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha$$

$$= A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^\gamma \quad \text{とすると} (\gamma = \alpha \cdot \beta)$$

$$\alpha_{\text{金属}} = -0.709 < \alpha_{\text{堆積岩}} = -0.553$$



➡ 堆積岩の方がターゲットと弾丸の π_3 の変化によるクレーターの大きさの変化が小さい

➡ 今回の実験で求めた α を使うことで
実際に惑星面などに隕石が衝突した場合の π_3 の推測の誤差を小さくすることができる

考察

• 体積の比較

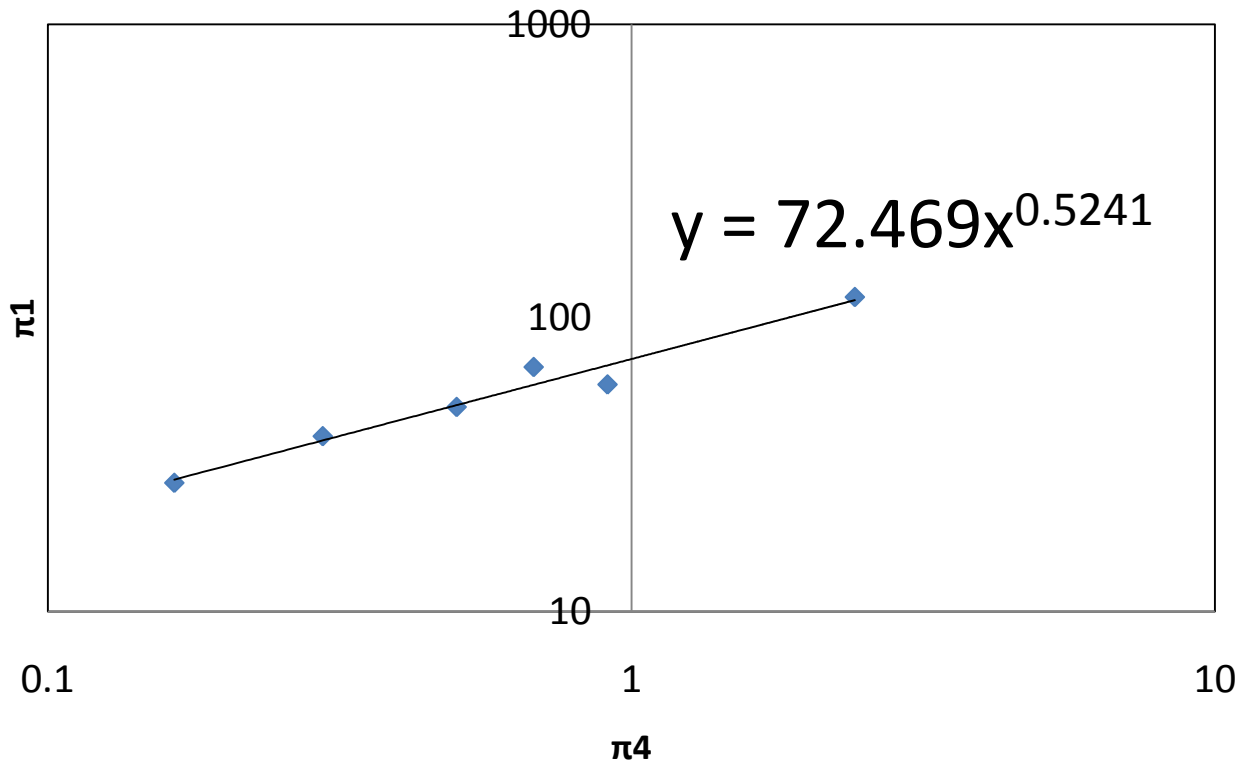
shot	弾丸材質	キーエンス顕微鏡	楕円錐
		クレーター体積(cm ³)	クレーター体積(cm ³)
2	ナイロン①	1.26E-02	3.77E-02
3	WC②	6.43E-02	8.62E-02
4	アルミナ	6.08E-02	5.45E-02
5	SUS①	1.70E-02	3.81E-01
6	ガラス①	1.27E-02	3.82E-02
7	チタン②	1.20E-02	5.30E-02
8	SUS③	7.25E-02	2.77E-01
9	ナイロン①Φ 3mm	6.56E-02	1.20E+00
10	ナイロン②Φ 3mm	1.33E-01	7.61E-01
11	チタン①	1.63E-02	5.30E-02



- ・SUSの場合スポレーションが不完全なため顕微鏡計測体積との差も大きい
- ・よってSUSのみスポレーションしていない径で同じ評価をすると

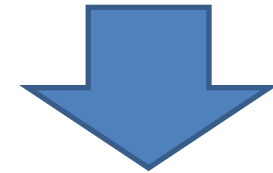
第一段階

～今回の実験結果より～



$$\begin{aligned} \pi_1 &= A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha \\ &= \boxed{A \cdot \pi_3^\alpha} \cdot \pi_4^{\alpha\beta} \\ &\quad \parallel \\ &\quad \text{Const.} \end{aligned}$$

よって $\alpha \cdot \beta$ は

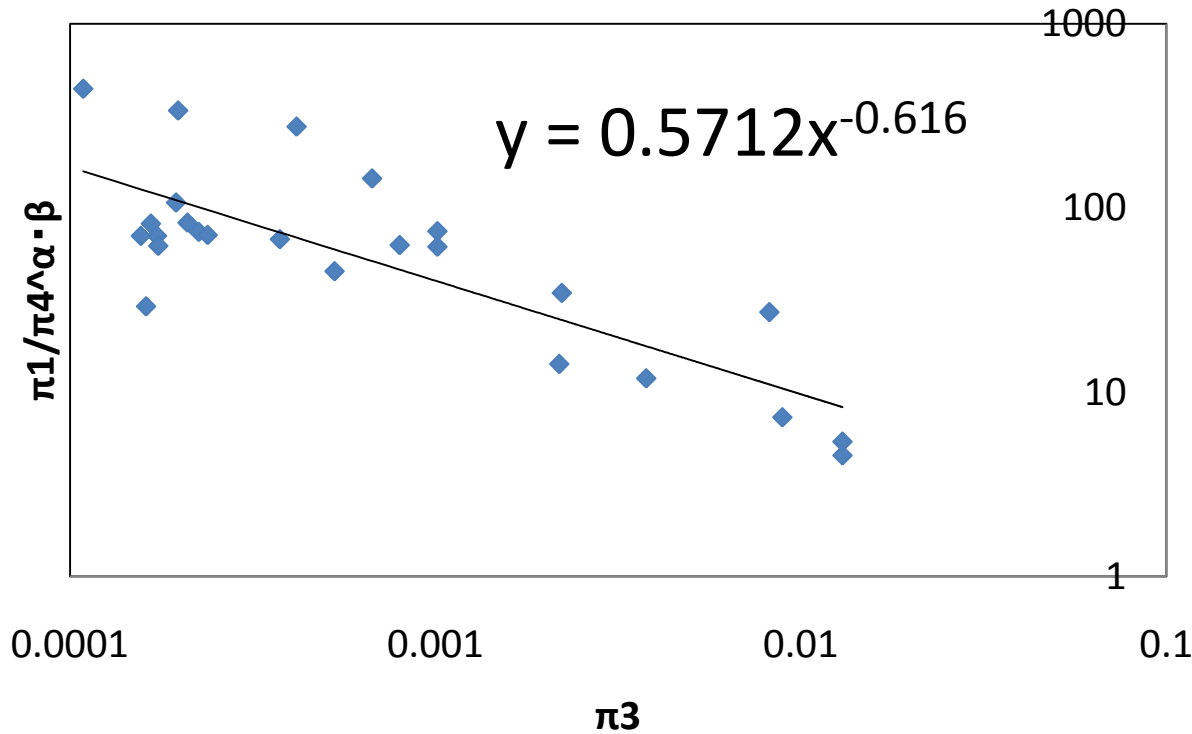


$$\alpha \cdot \beta = 0.5241$$

こちらの方が近似はうまくいく

第二段階

～全部の実験結果より～



$$\pi_1 / \pi_4^{0.2914} = A * \pi_3^{\alpha}$$



よって

$$\alpha = -0.616$$

$$\beta = -0.851$$

$$A = 0.5712$$

考察

• 金属スケーリングとの比較

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta)^\alpha = A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^\gamma \quad \text{とすると} (\gamma = \alpha \cdot \beta)$$

$$\alpha_{\text{金属}} = -0.709 < \alpha_{\text{堆積岩}} = -0.616$$

$$\beta_{\text{金属}} = -0.738 > \beta_{\text{堆積岩}} = -0.851$$

$$\gamma_{\text{金属}} = 0.523 \approx \gamma_{\text{堆積岩}} = 0.5241$$

α の金属と堆積岩の大小関係は先ほどと同じ

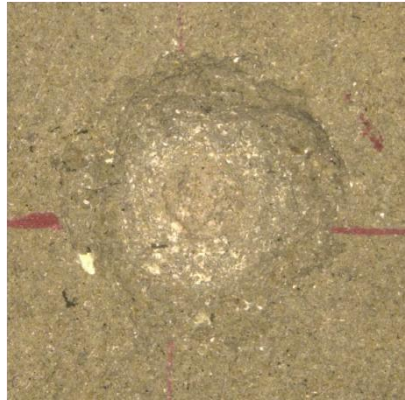
γ はほぼ同じ値だが α が異なるため β も金属と堆積岩で値が異なる



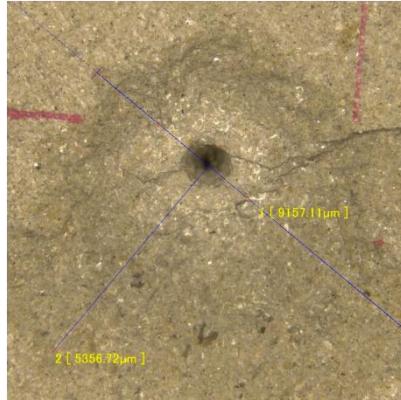
$$\pi_1 = A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^\gamma$$

スケーリング則を上記の表現の仕方にするるとターゲットが金属であろうが堆積岩であろうが π_4 (密度比)にかかる乗数は同じでよい

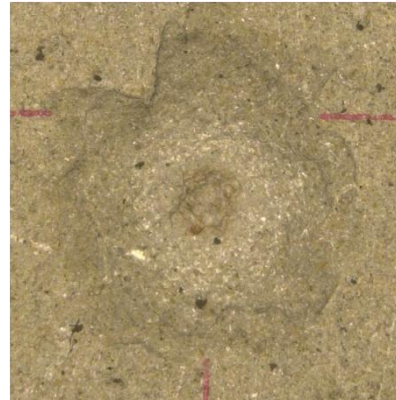
今後の課題



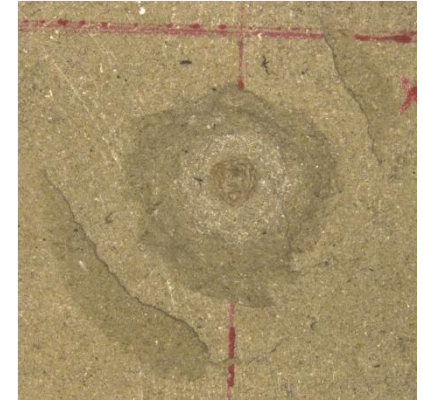
shot2 ナイロン



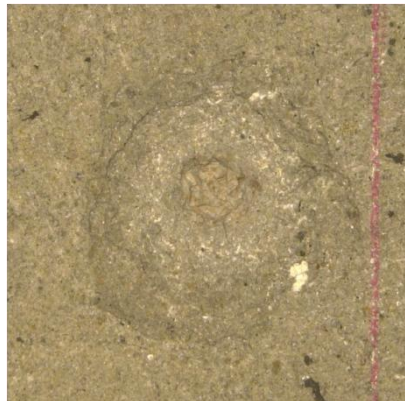
shot3 WC



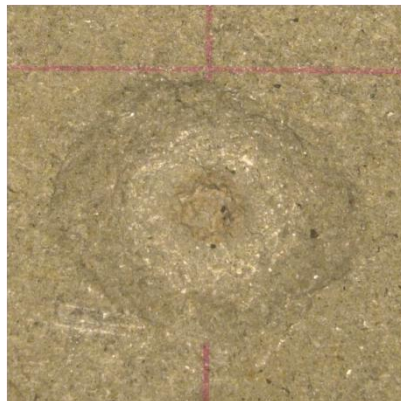
shot4 アルミナ



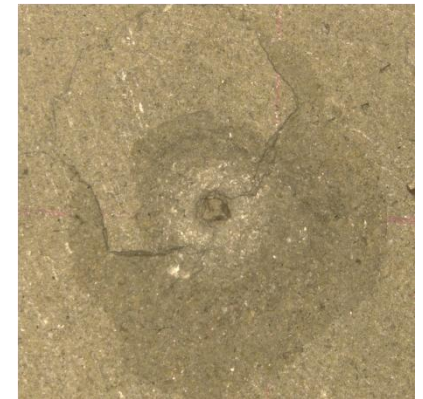
shot5 SUS304



shot6 ガラス

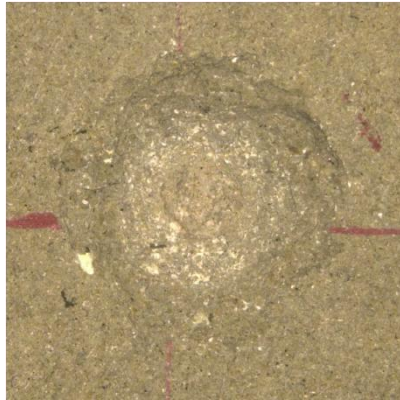


shot7 チタン



shot8 SUS304

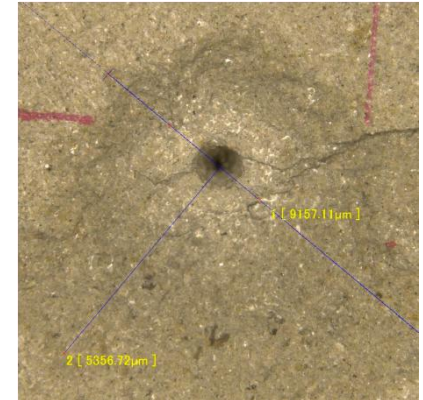
今後の課題



shot2 ナイロン



shot8 SUS304



shot3 WC

弾丸強度

- ナイロン → スポレーションを起こさない
- SUS304 → スポレーションを起こしかけ
- WC → 弾丸による掘削

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\beta \cdot \pi_5^\eta)^\alpha$$

弾丸の強度の項をスケーリング則に組み込む必要性がある

実験手順

～今回の実験データより～

まず、 $\alpha \cdot \beta$ を求める。

$$\pi_1 = 0.458(\pi_3 \cdot \pi_4^{-0.738})^{-0.709}$$

$$\pi_1 = A(\pi_3 \cdot \pi_4^\alpha)^\beta$$

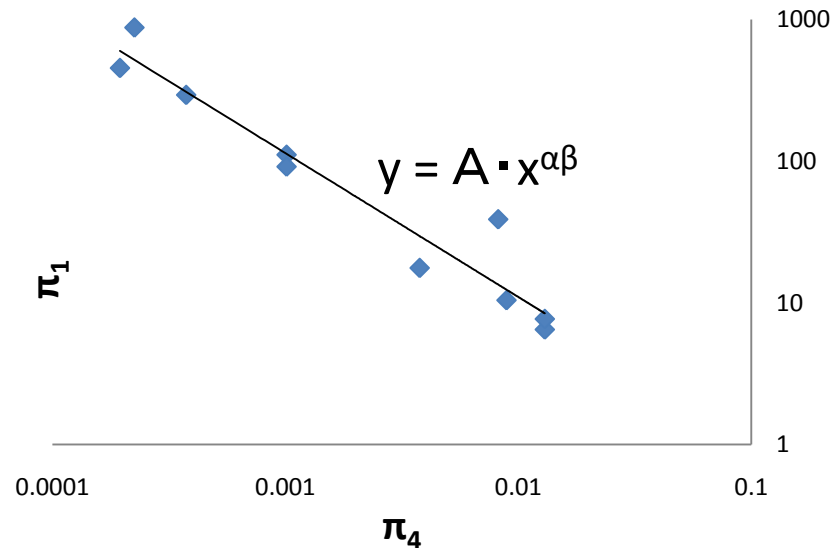
$$= A \cdot \pi_3^\alpha \cdot \pi_4^{\alpha\beta}$$

||
Const.

$$\pi_1 = \rho_t \cdot V / m_p$$

$$\pi_3 = Y / \rho_p \cdot U^2$$

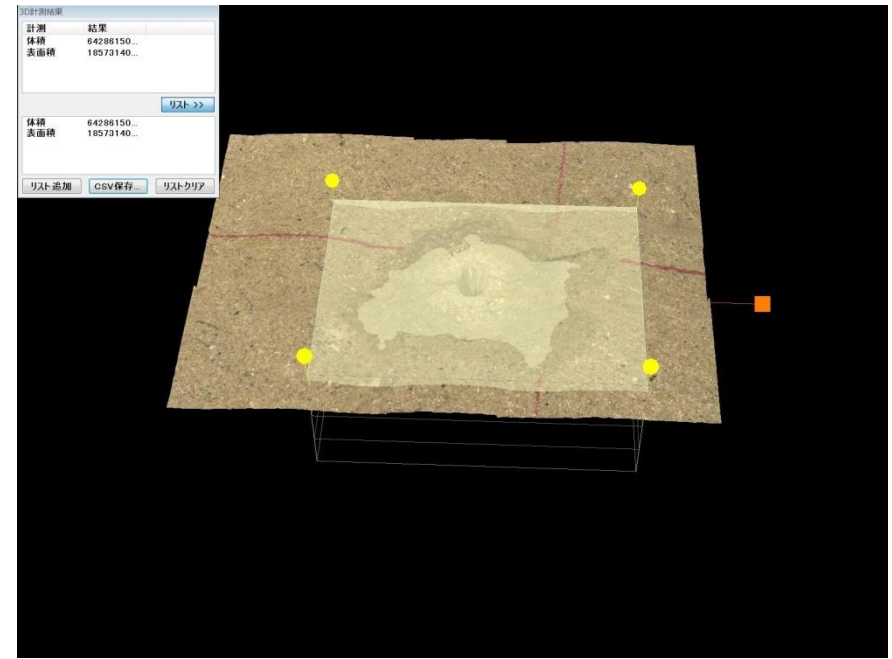
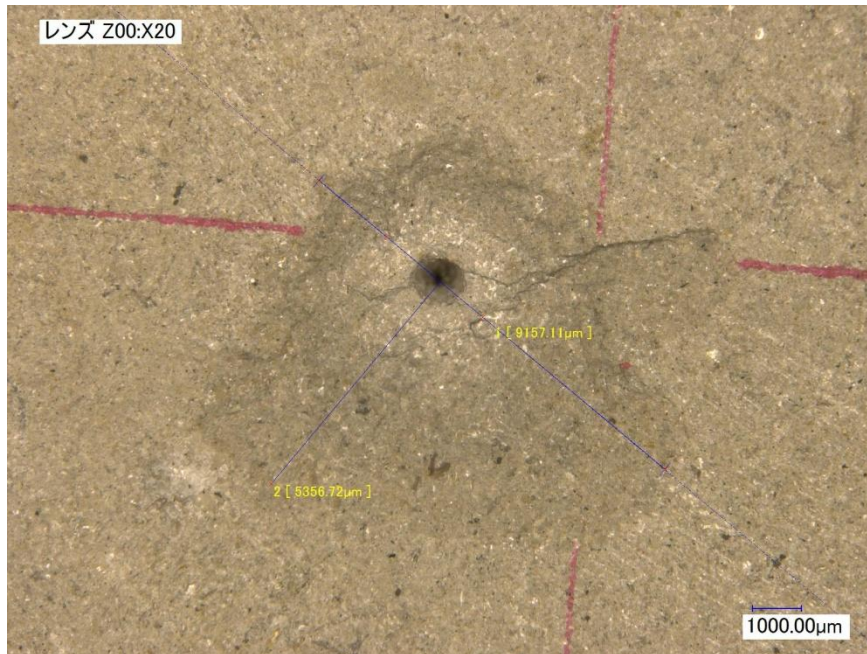
$$\pi_4 = \rho_t / \rho_p$$



$$\pi_1 = A \cdot \pi_4^{\alpha\beta}$$

→ A、 $\alpha\beta$

ターゲット



計測装置

～デジタルマイクロスコープ～

◆KEYENCE VHX-1000

- 2D画像処理
 - 画像上の距離や角度を測定。
- 3D画像処理
 - 2D画像を連結、3D図を作成。
 - 体積や寸法を測定。



実験手順

- キーエンスを用いて、クレータを計測
- 実測値より、 π_1, π_3, π_4 を求める
- π_3 は一定なので、 π_1 と π_4 の関係から $\alpha\beta$ が求まる
- 次に、昨年からのデータも用いて π_1/π_4^β と π_3 の関係からAと α が求まり、さらに β が求まる
- 金属スケーリング則との比較をする

サボ

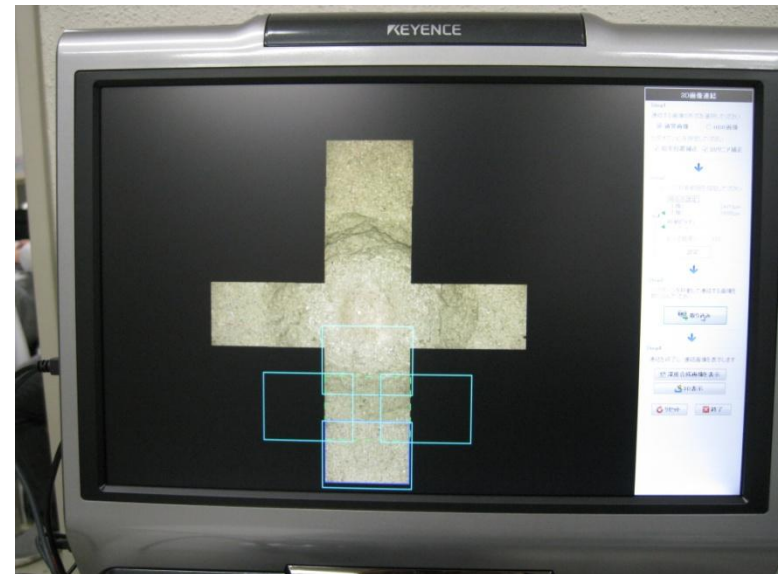
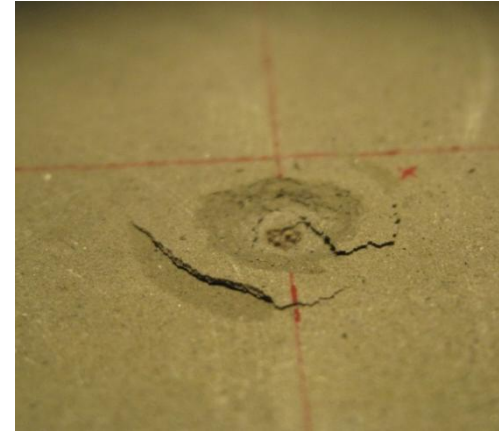


- 装弾筒
- 大口径の銃から小口径の弾丸を発射するための詰め物。
- 発射管の内部損傷を最低限に抑える。
- 途中で分裂し、プロジェクトイルのみを飛翔させる。
- 外径 : 7 mm

◆ 発射管内部で回転し、遠心力にてサボ分離。

(九州工業大学ではフリーフライト部にて空気抵抗でサボを分裂させている)

ターゲット



研究背景

- 太陽系の起源解明へのアプローチ

研究背景

- クレーター解析の方法
 - 惑星表面クレーターサイズの実験は不可能
 - スケーリング則を用いる
 - 1960年前後より50年ほど実験
 - 岩石や金属のデータあり
- 惑星表面の大部分を占めるのは堆積岩
 - データが少なく、速度域の拡大が必要

研究背景

- スケーリング則
 - 物理現象を説明する無次元量
 - 現象全てを実験により求めるのは不可能
 - スケーリング則を用いて、解析