

# 高速度での堆積岩への クレーター形成実験

CPS衝突実験実習成果報告会

2012/12/11

B班：木内 真人、河本 泰成、松本 恵里  
(神戸大)

# 背景

- 惑星や衛星は形成過程において、様々な衝突イベントを経験している
  - ▶ 衝突クレーターを形成
- 衝突クレーターを解析してわかること
  - ▶ インパクターのサイズ、速度、軌道、数や頻度、また衝突前後の環境変化

- ◇ 多くの衝突クレーターは $45^\circ$ 以下で衝突すると考えられている
- ◇ 数mサイズのクレーター形成は、重力よりもターゲット強度が支配的である
- ◇ 小天体などの小さな重力場上で形成されるクレーターは、強度に支配されている

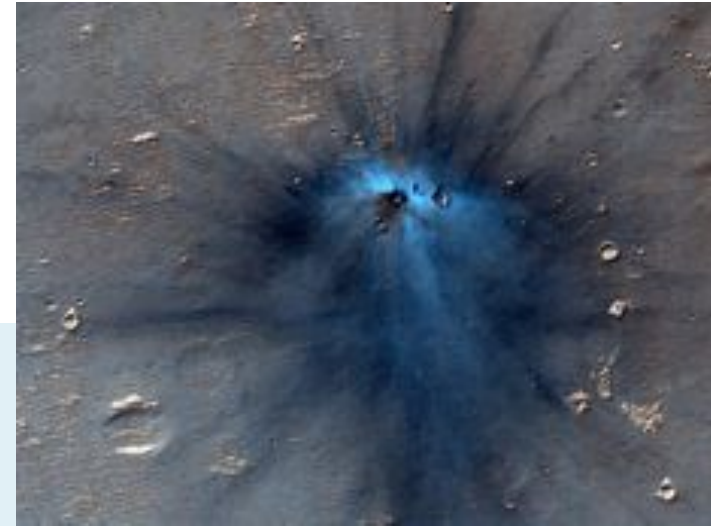


Image courtesy U. Arizona/[NASA](#)

↑衝突起源と考えられる  
火星クレーター

# 先行研究

- クレーター形成斜め衝突実験 (Goult, 1978)
  - 弾丸：アルミ球、パイレックス球、レクサン円柱
  - 標的：グラナイト、pumice powder、珪砂
  - 衝突速度：0.05~7.2km/s
  - クレーター形状、体積などに衝突角度依存性

- ◇ 実際の衝突は斜め衝突が支配的
- ◇ 火星において、広く堆積岩が確認されている
  - 探査や観測は着実に進歩している
  - 堆積岩を用いた（強度支配域の）実験は、多く行われていない



←キュリオシティが撮影した  
火星表面の堆積岩

Image courtesy MSSS/[NASA](#)

# 先行研究

- クレーター形成斜め衝突実験 (Goult, 1978)  
弾丸：アルミ球、パイレックス球、レクサン円柱  
標的：ガラス板、石英板、アルミ板、銅板

強度支配域での斜め衝突実験を行い、  
形成されたクレーターやエジェクタを観察、  
 $\pi$ スケーリングを用いて過去のデータと比較する

堆積岩を用いた（強度支配域の）実験は、多く行われていない

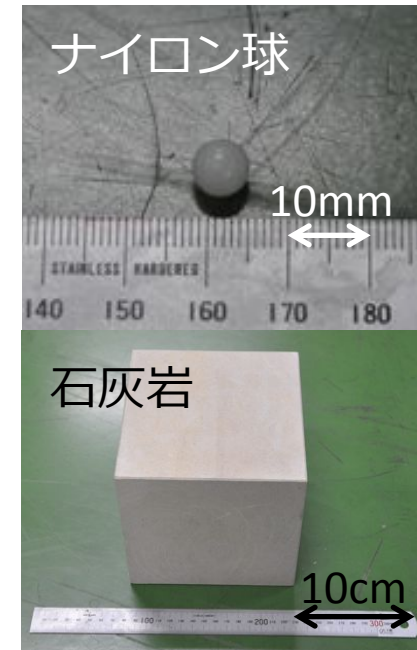
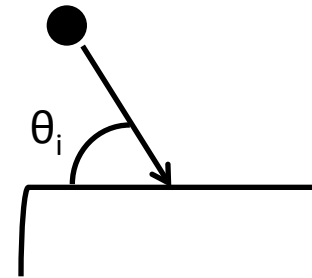


←キュリオシティが撮影した  
火星表面の堆積岩

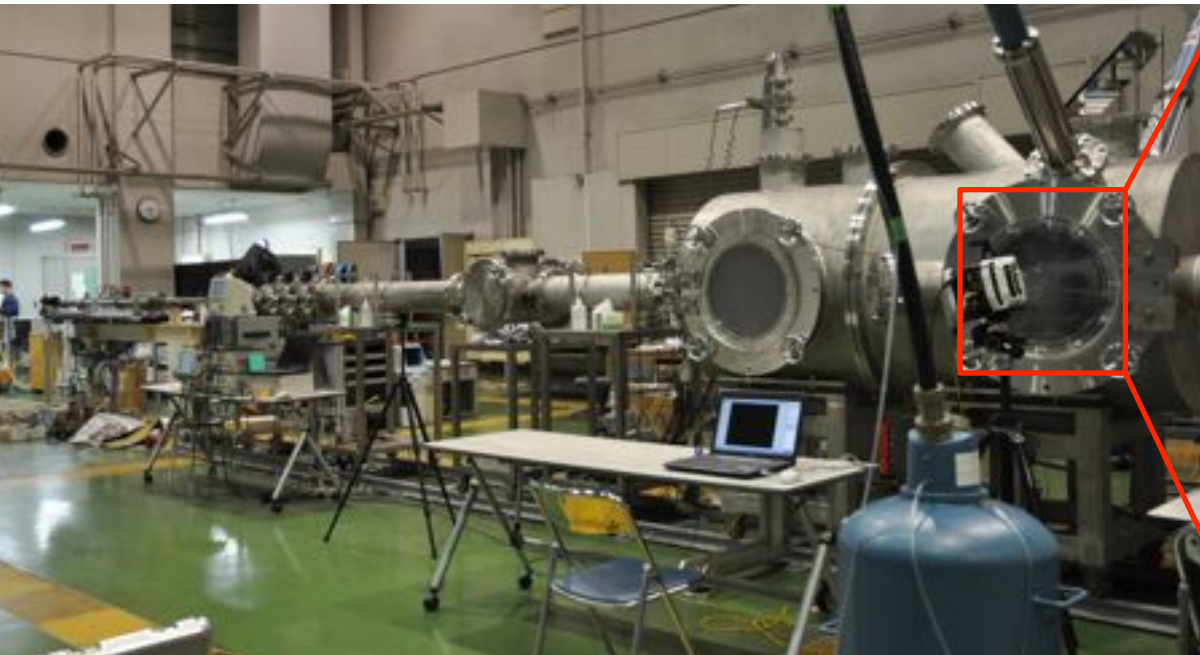
Image courtesy MSSS/[NASA](#)

# 実験方法

- 弾丸：直径7mmナイロン球(密度 $1.13\text{g/cm}^3$ )
- 標的：15cm立方体石灰岩(密度 $2.24\text{g/cm}^3$ )
- 衝突速度 $v_i \sim 2.5\text{km/s}$
- 衝突角度 $\theta_i = 90^\circ$ (正面衝突),  $45^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 5^\circ$
- 高速度カメラ：45016fps



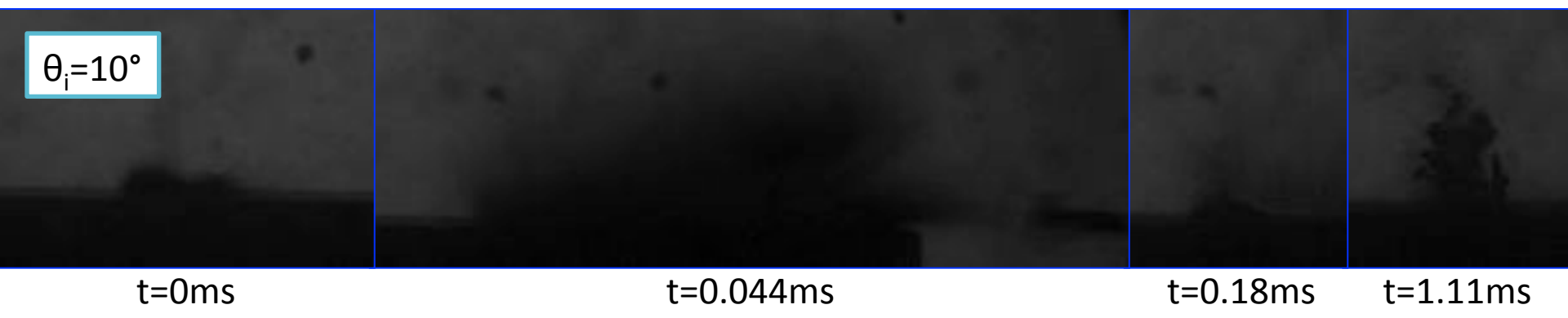
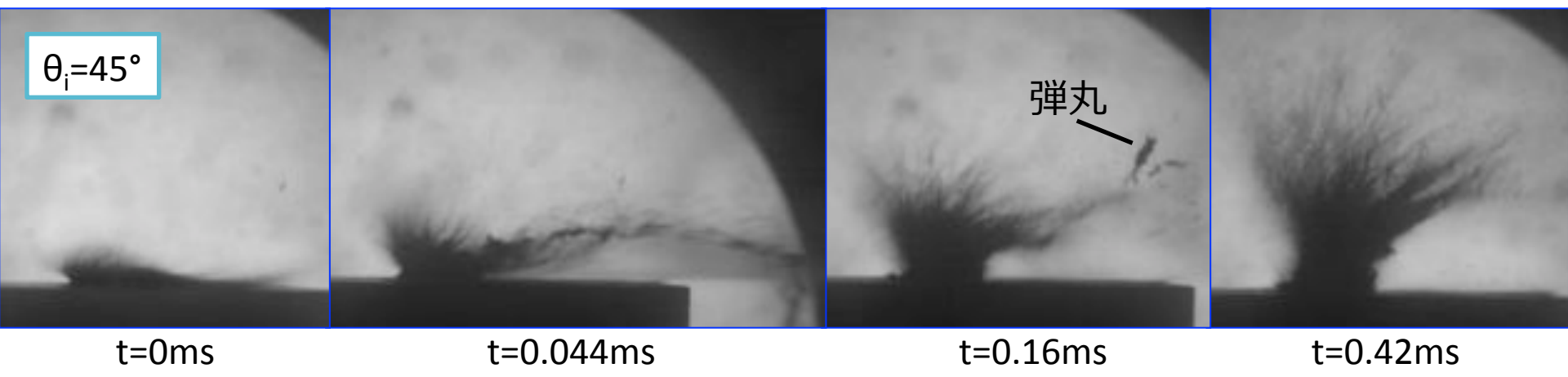
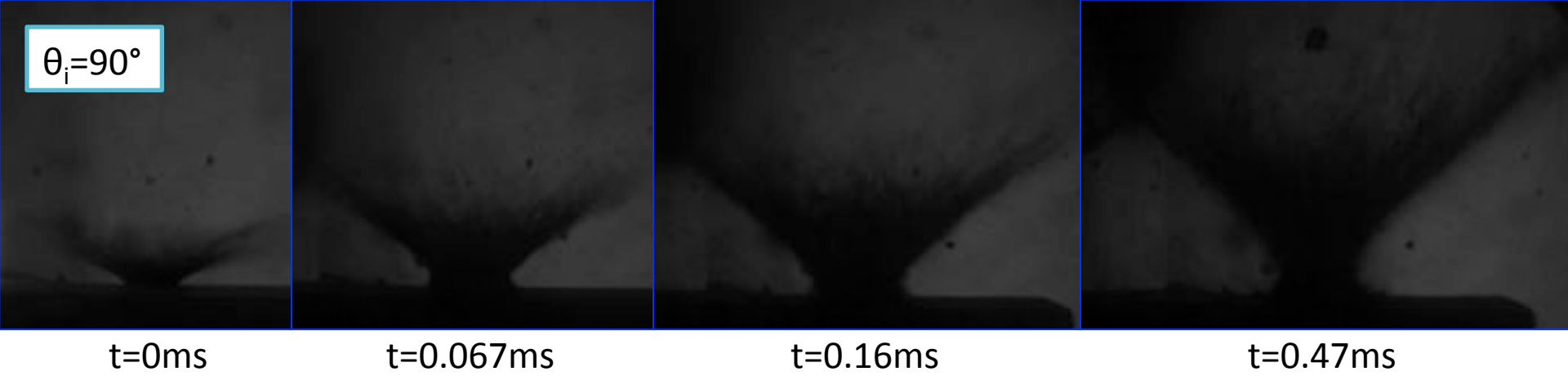
二段式軽ガス銃@宇宙研



衝突の様子

$v_i \sim 2.5 \text{ km/s}$

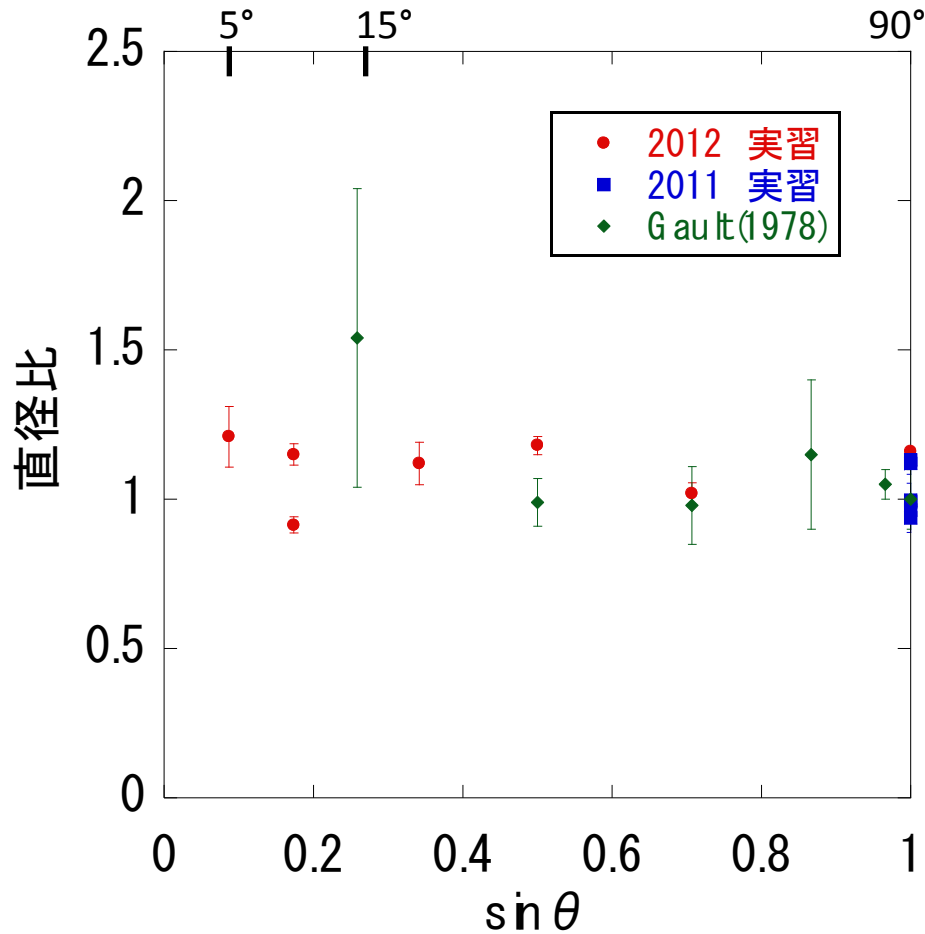
動画は省略します



クレーターの写真が並んでいたスライドですが  
容量が大きすぎて添付できませんでしたので  
省略致します



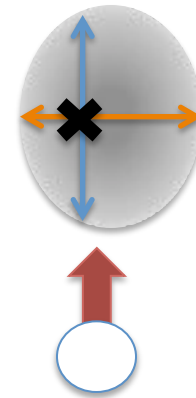
# クレーター直径比



- ◆ 直径比・・・進行方向 / 直交方向
- ◆ 衝突角度が浅くなっても直径比は大きく変わらない( $\theta=5^\circ$ で1.2)
- ◆ 2011年の実習での砂岩への垂直衝突実験のデータより、 $\theta=90^\circ$ では0.95～1.15
- ◆ Gault(1978)のデータと比較
  - 標的・・・グラナイト( $2.56\text{g/cm}^3$ )
  - 弾丸・・・アルミニウム球( $2.7\text{g/cm}^3$ )
  - 衝突速度・・・2.1～7.0km/s
  - ⇒ $\theta=15^\circ$ で円形から逸脱
  - ⇒プロジェクトイルの違いが原因?

# クレータープロフィール

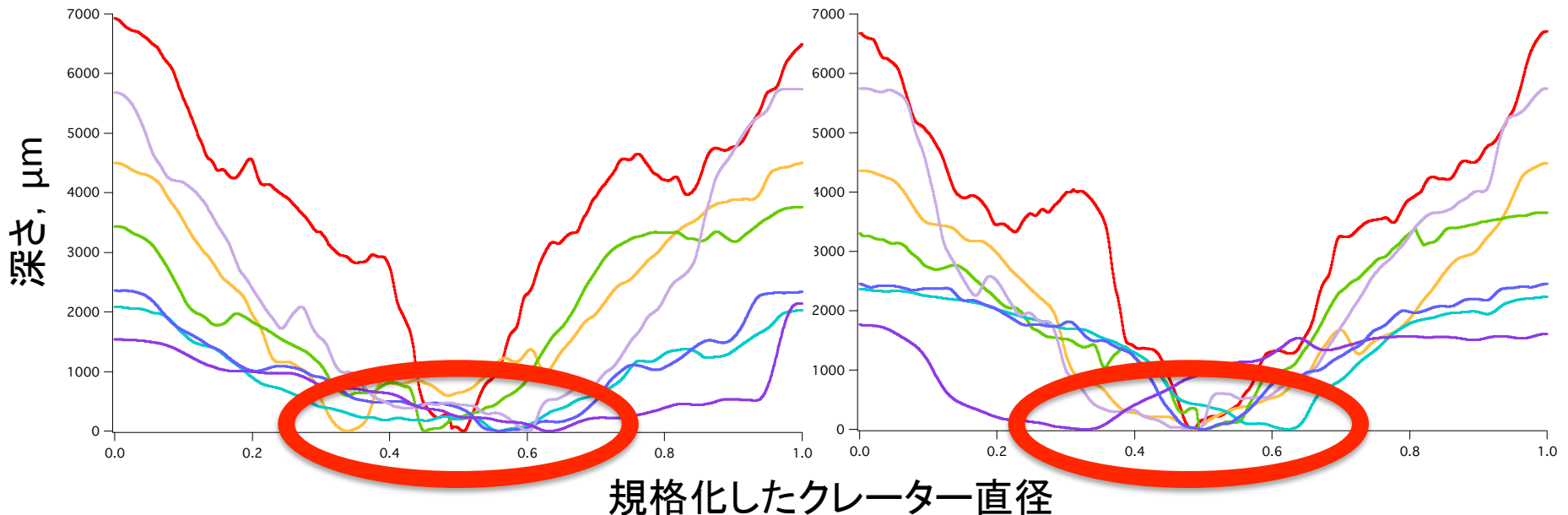
- クレーターにおいて、最も深い点でのプロフィールを測定
- 下図は最深点を通るような直径を1として規格化している
  - 進行（横）方向直径とは必ずしも一致しない
- 衝突角度の減少に伴って、深さも浅くなっている



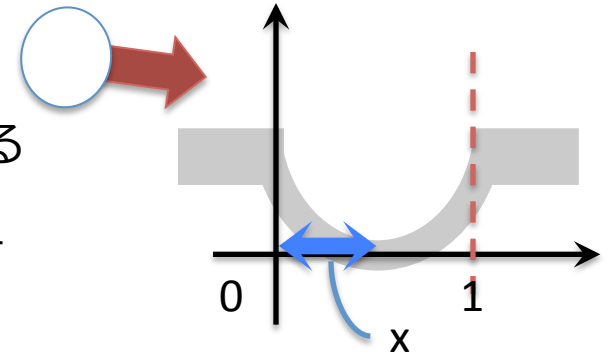
- 90°
- 30°
- 20°
- 10°
- 10°
- 45°
- 5°

進行方向のプロファイル

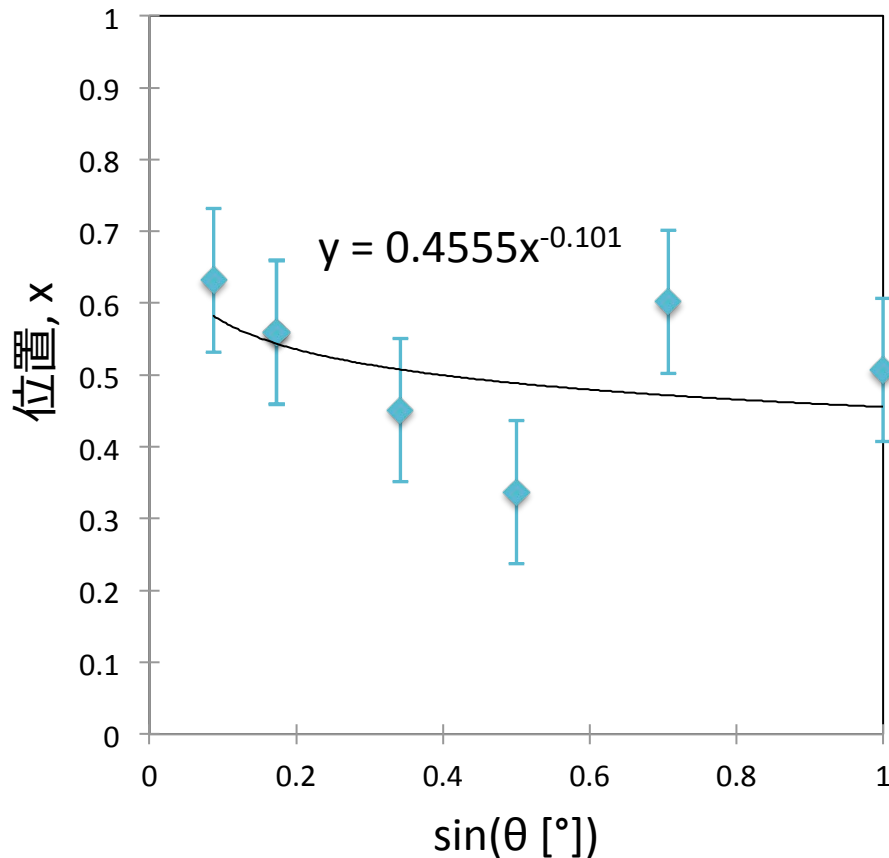
垂直方向のプロファイル



- 90°での衝突クレーターは中心が最も深い
- 横方向：ほとんどの角度で中心が最深となっている
- 進行方向：角度が低くなると、xが増加
  - Gault [1978] の実験では、進行方向について角度が低くなるとxも共に減少した

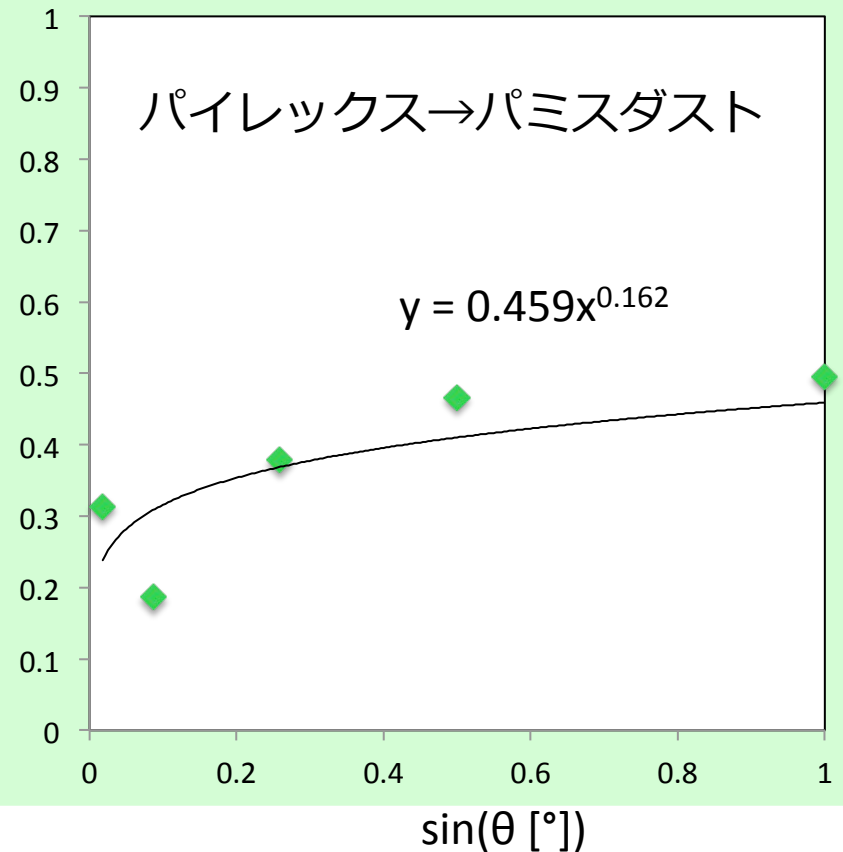


進行方向プロファイルの最深

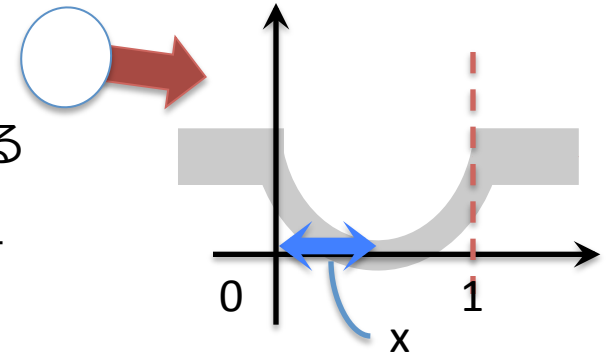


Gault [1978]

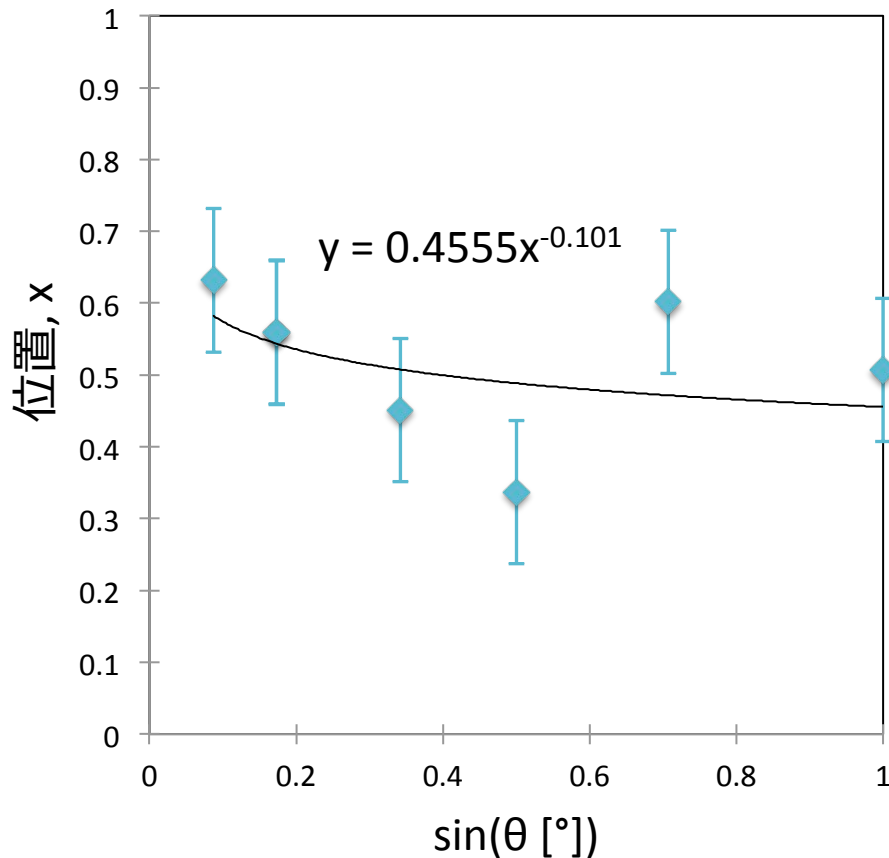
パイレックス→パミスダスト



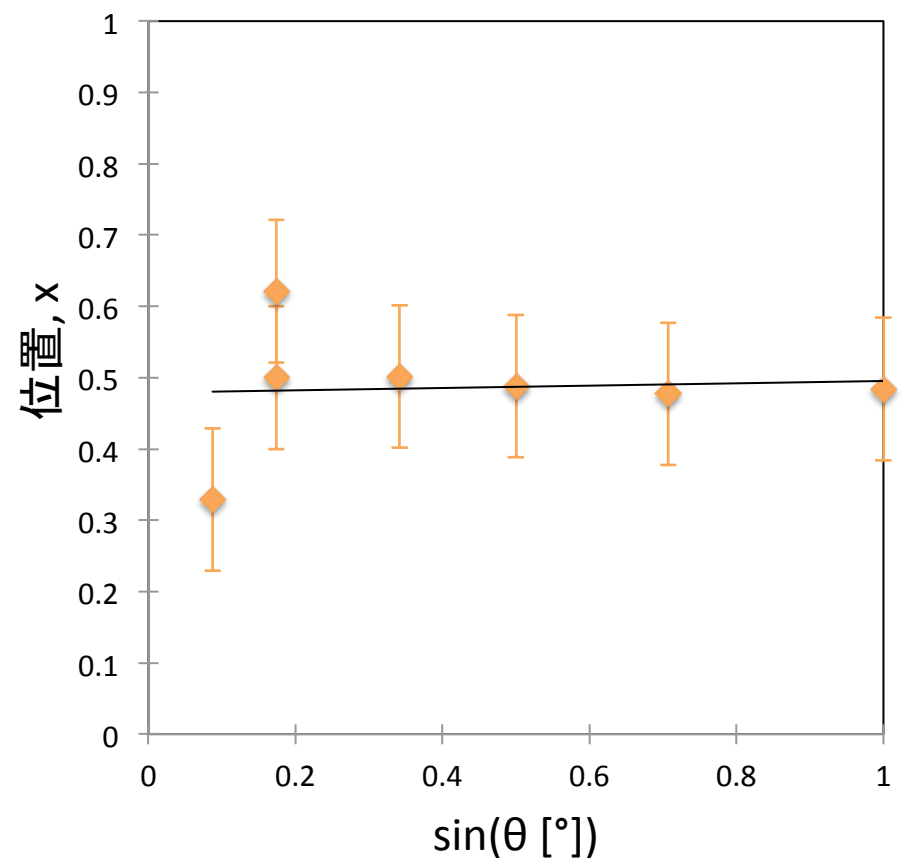
- 90°での衝突クレーターは中心が最も深い
- 横方向：ほとんどの角度で中心が最深となっている
- 進行方向：角度が低くなると、xが増加
  - Gault [1978] の実験では、進行方向について角度が低くなるとxも共に減少した



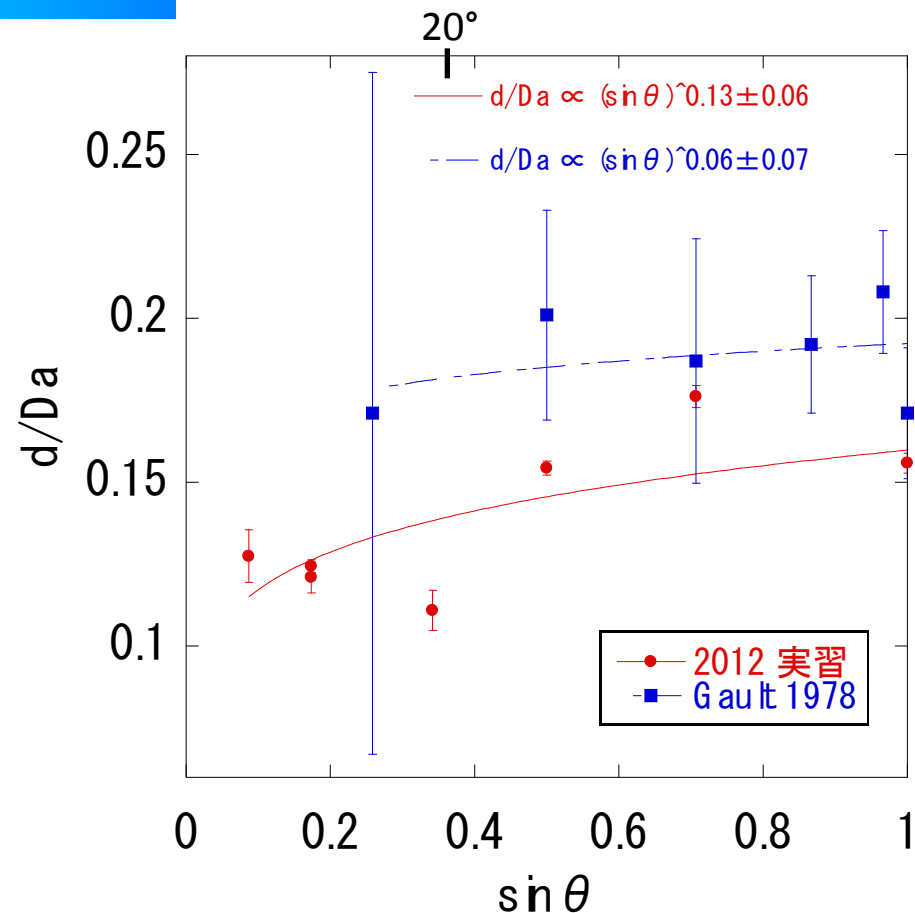
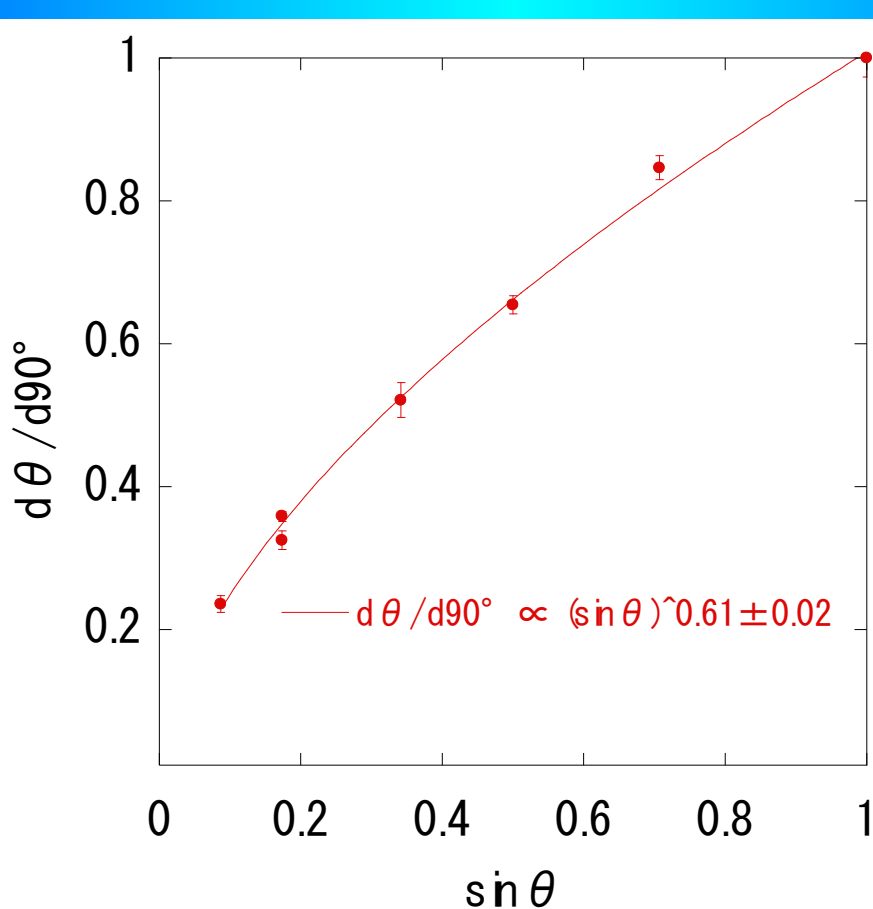
進行方向プロファイルの最深



横方向プロファイルの最深

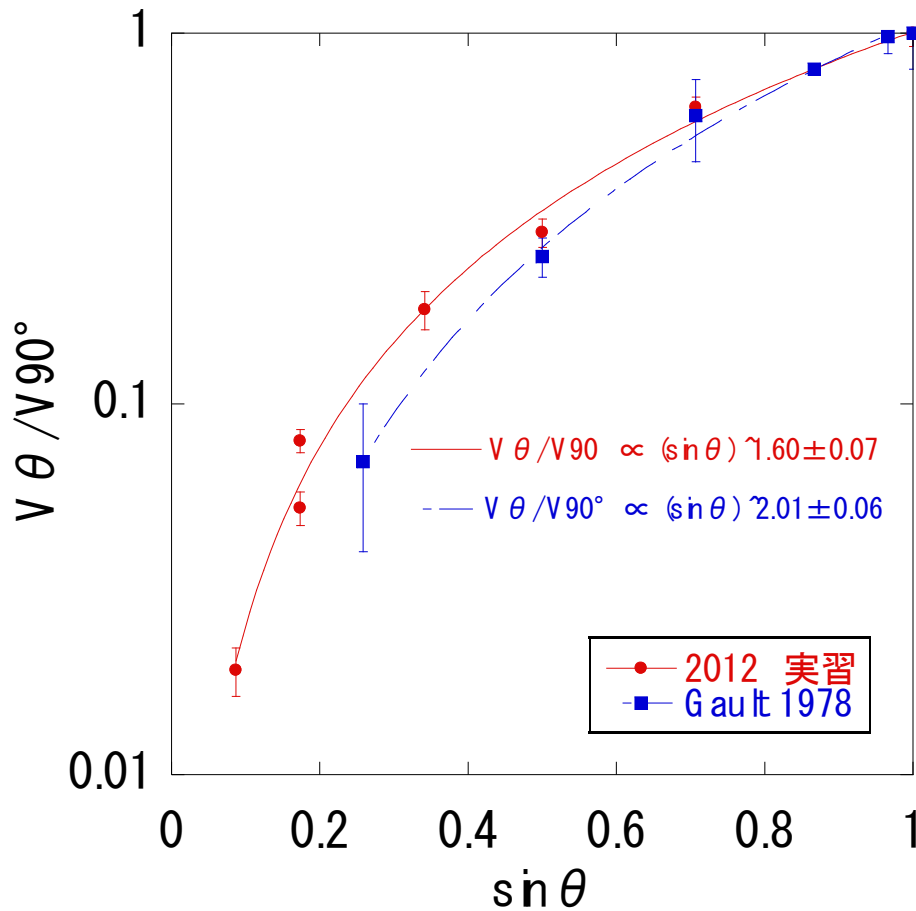


# クレーター深さ



- ◆クレーター深さは、衝突角度が小さくなるにつれて浅くなる(左図)
- ◆深さ $d$ を平均直径 $D_a$ で規格化(右図)  
 $D_a = (\text{進行方向直径} + \text{直交方向直径})/2$
- ◆直径に対する深さは $\theta=20^\circ$ 以下で小さくなるが、Gault(1978)ではほぼ一定

# クレーター体積



◆  $\theta=90^{\circ}$ のクレーター体積で規格化

◆ 衝突角度が小さくなると減少  
 $\Rightarrow (\sin \theta)^{1.60}$ に比例して減少

◆ Gault(1978)の結果に近い

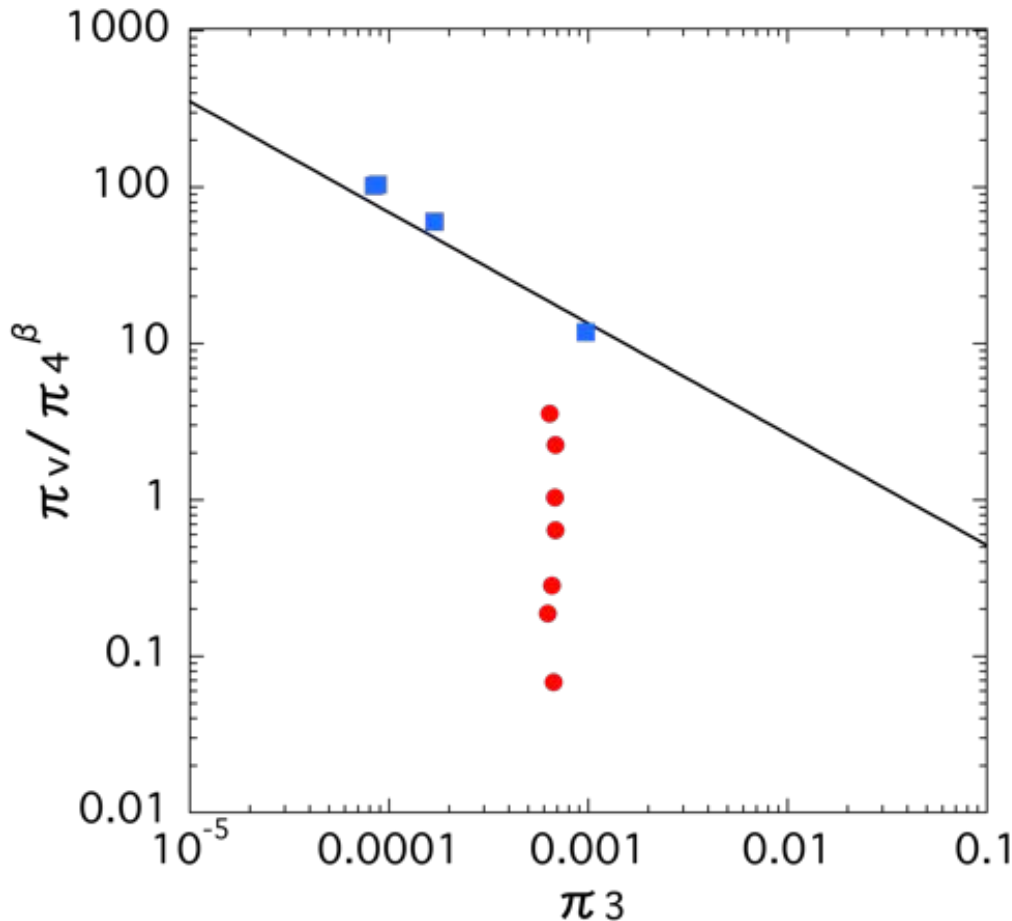
# πスケーリング

クレーター効率 :  $\pi_v = V\rho_t/m_p$

規格化強度 :  $\pi_3 = Y/\rho_p v_i^2$

規格化弾丸密度 :  $\pi_4 = \rho_t/\rho_p (=const.)$

- 衝突角度が浅くなるにつれて、クレーター体積も減少
- suzuki et al., 2012のデータと比較すると1桁小さい
  - クレーター効率悪い



	今回	suzuki et al.
$V_i$ [km/s]	2.4~2.5	2~6.9
弾丸直径 [mm]	7	1~3.2
$\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.24	2.3
$Y$ [MPa]	4.6	4.6
ターゲット	石灰岩	砂岩

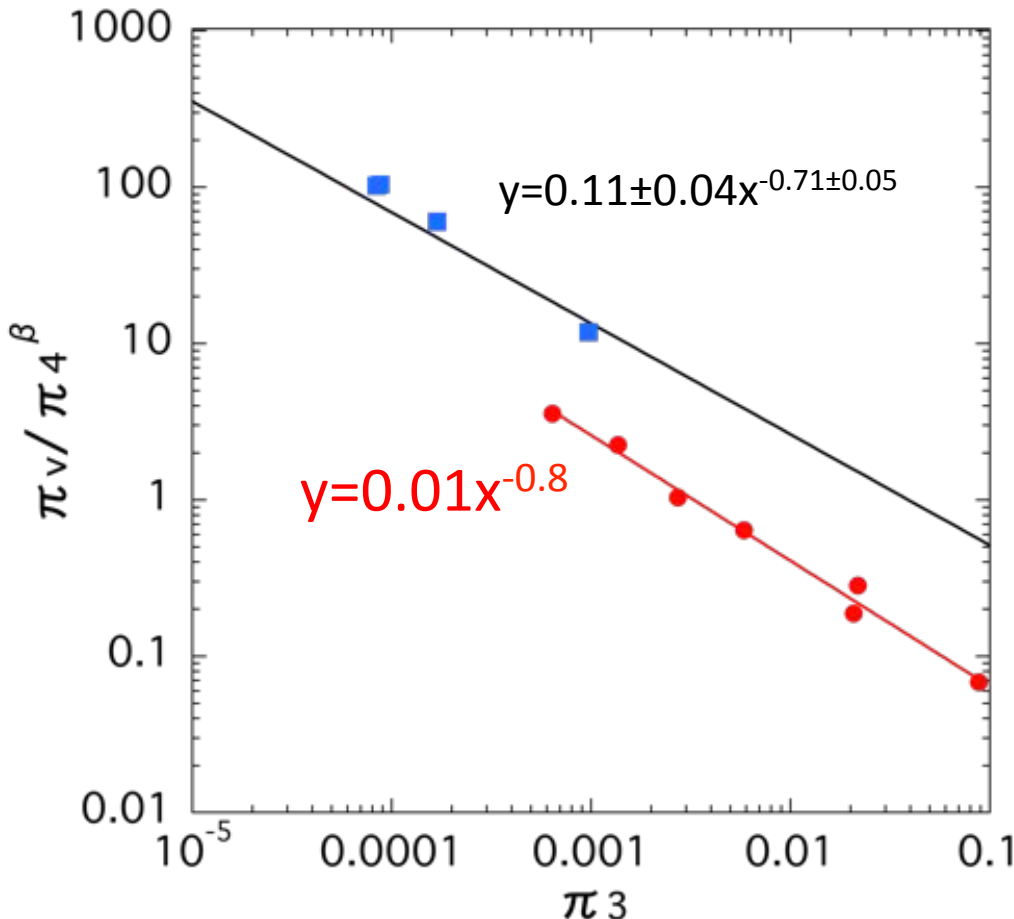
- 弾丸の直径及び衝突速度
- 揮発性物質が影響?

●, — 今回の実験  
 ■ suzuki et al., 2012 ナイロン弾丸  
 — suzuki et al., 2012 fitting line

# πスケーリング

クレーター効率 :  $\pi_v = V \rho_t / m_p$   
 規格化強度 :  $\pi_3 = Y / \rho_p (v_i \sin \theta_i)^2$   
 規格化弾丸密度 :  $\pi_4 = \rho_t / \rho_p (= \text{const.})$

- 衝突角度が浅くなるにつれて、クレーター体積も減少
- suzuki et al., 2012のデータと比較すると1桁小さい
  - クレーター効率悪い



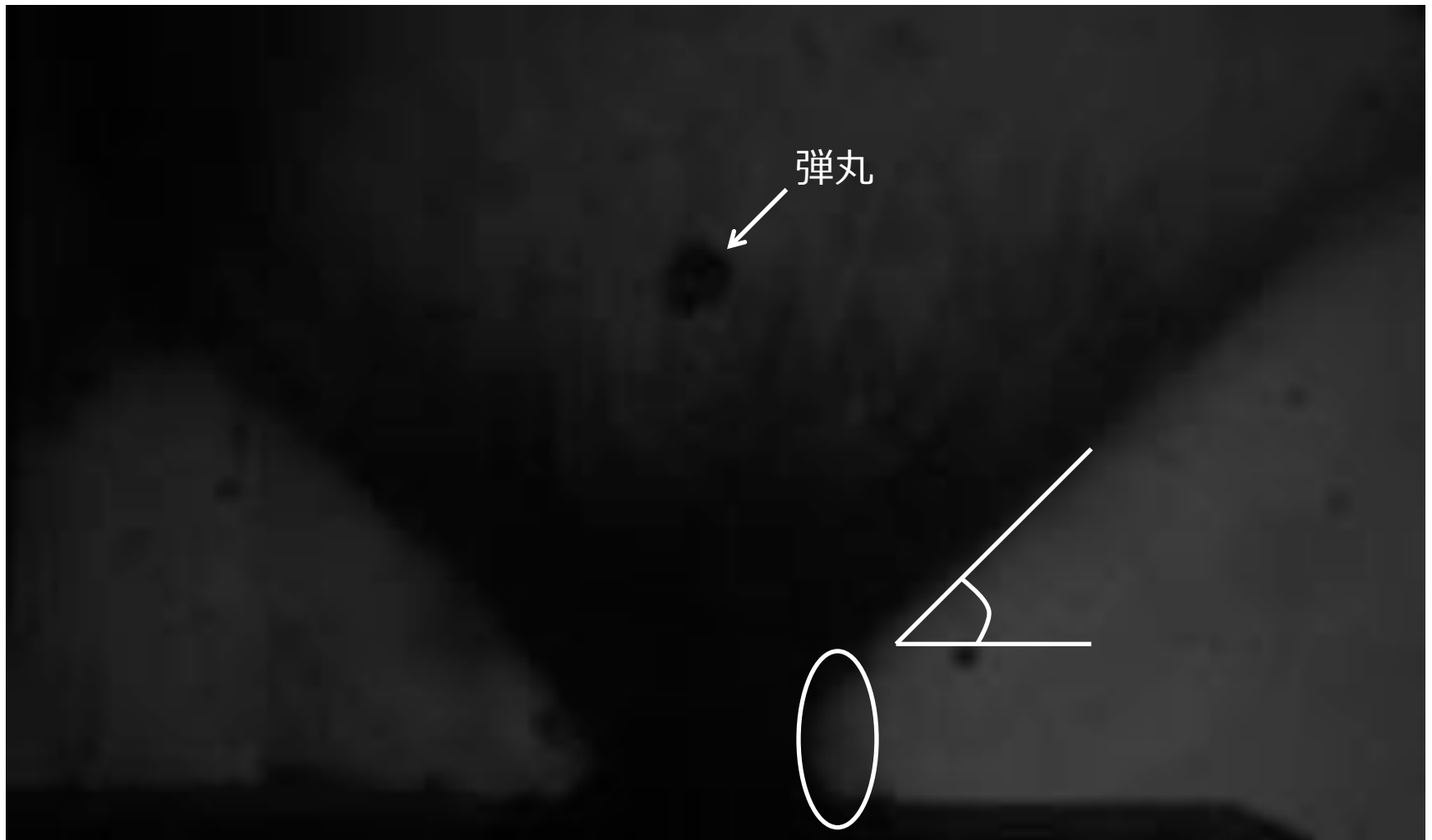
	今回	suzuki et al.
$V_i$ [km/s]	2.4~2.5	2~6.9
弾丸直径 [mm]	7	1~3.2
$\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.24	2.3
$Y$ [MPa]	4.6	4.6
ターゲット	石灰岩	砂岩

- 弾丸の直径及び衝突速度
- 揮発性物質が影響?

●, — 今回の実験  
 ■ suzuki et al., 2012 ナイロン弾丸  
 — suzuki et al., 2012 fitting line



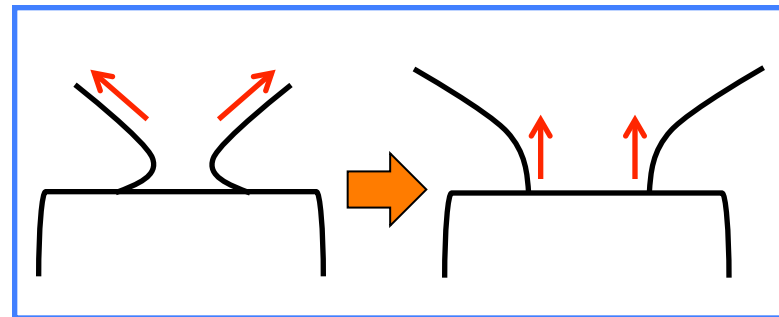
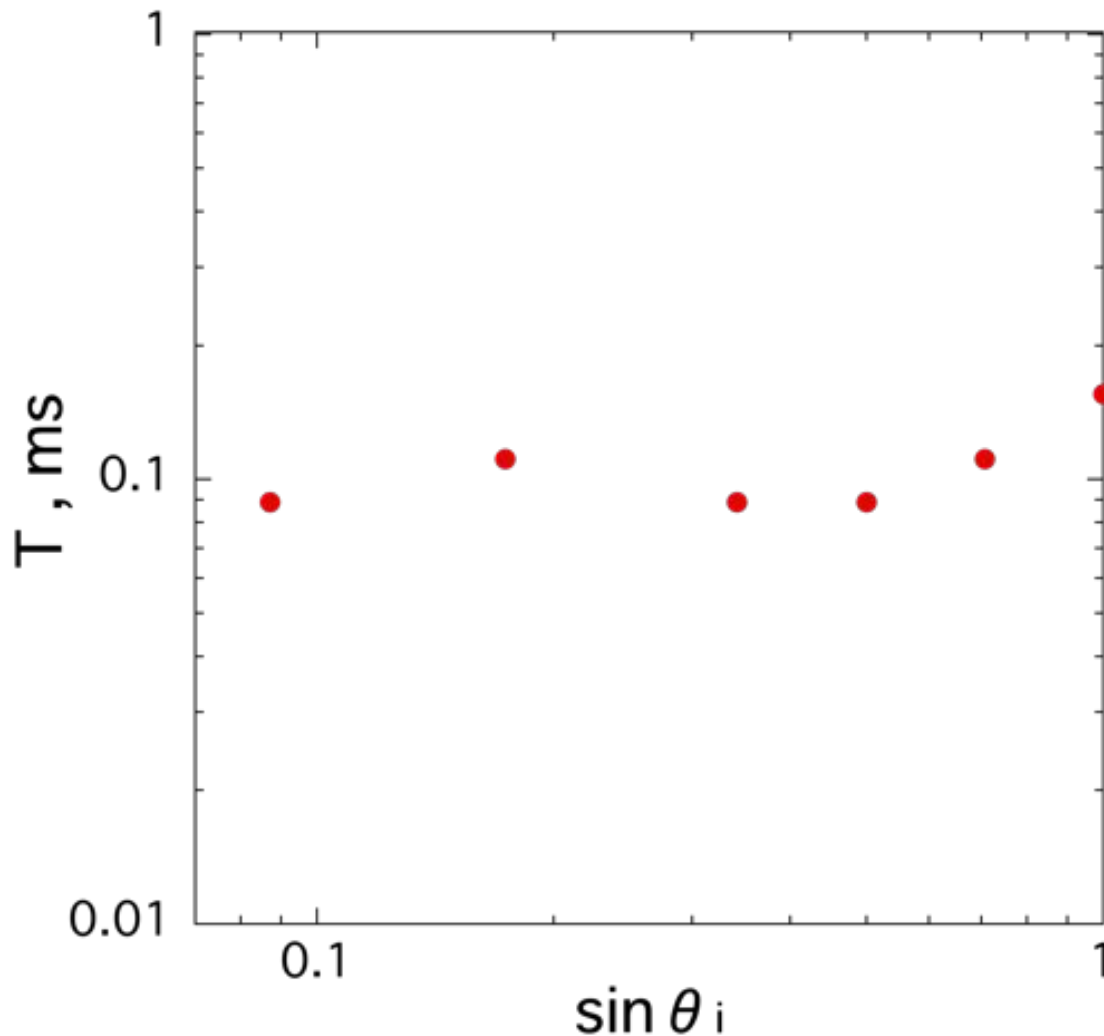
# 映像から測定したこと



- エジェクタコーンの角度の時間変化
- エジェクタが垂直に出始める時間
- 弾丸の跳ね返り速度、角度

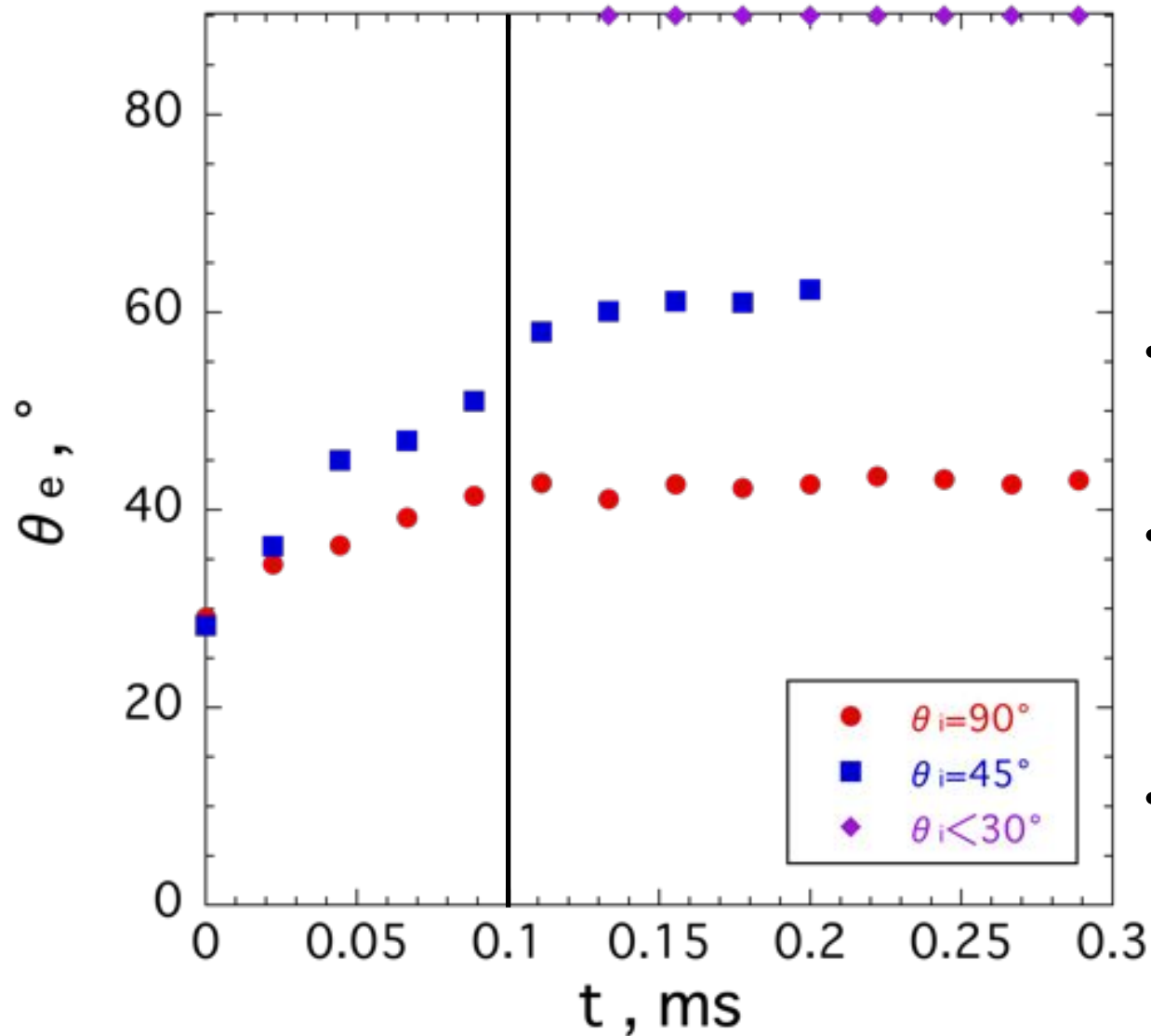
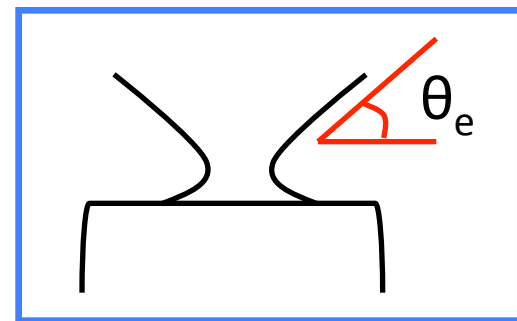
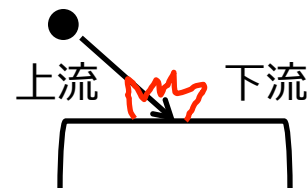
- エジェクタと標的表面がなす角度の時間変化 ( $\theta_i=90^\circ$ のみ)

# エジェクタが垂直に放出され始める時間 $T$



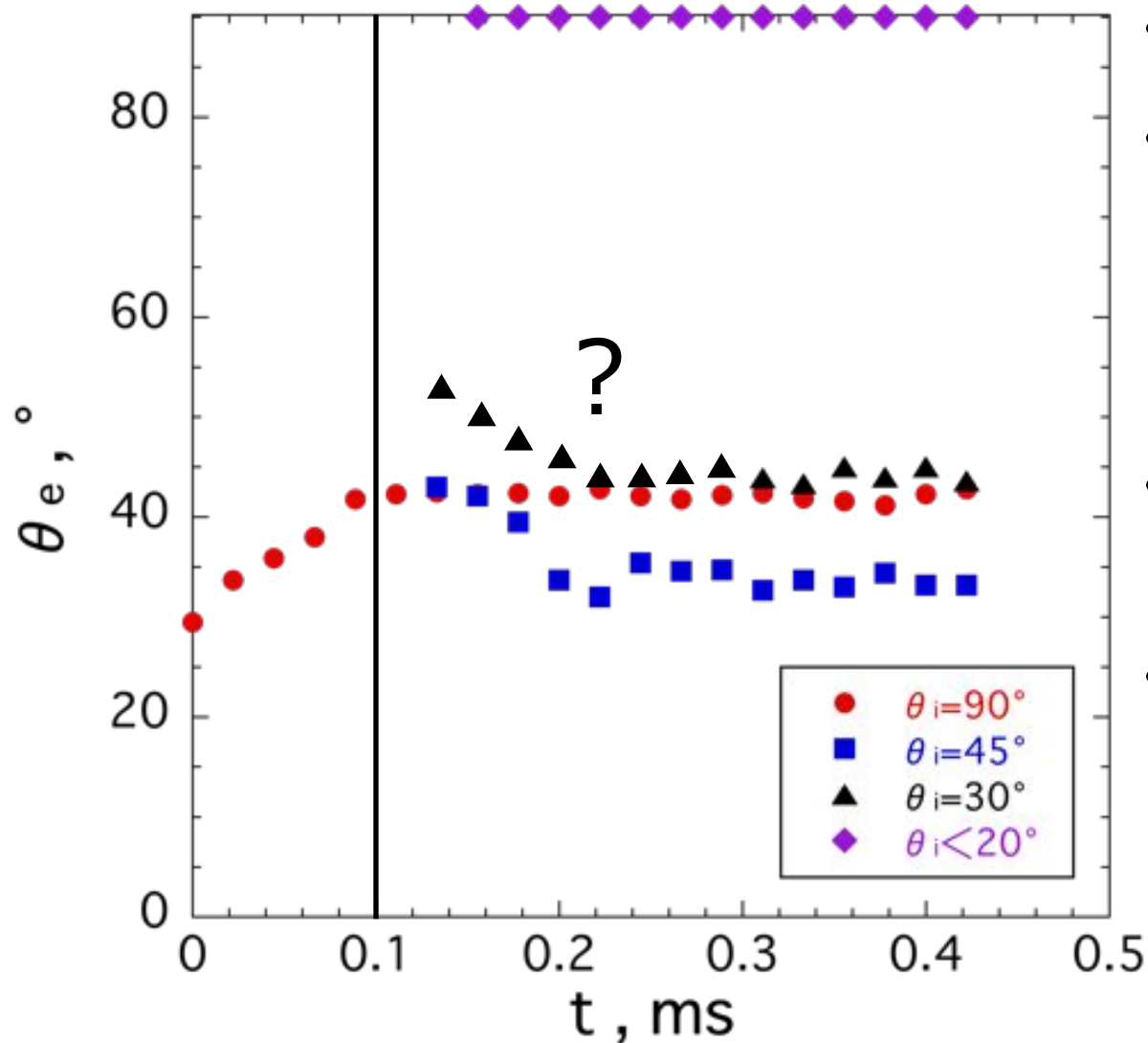
- $\theta_i$ によらず、 $T \sim 0.1 \text{ms}$ で一定  
→ クレーター直径決定時間は  $\theta_i$ によらず一定
- $\theta_i < 20^\circ$ では垂直にしか放出されなかった

# エジェクタコーンの角度 $\theta_e$ の 時間変化：上流



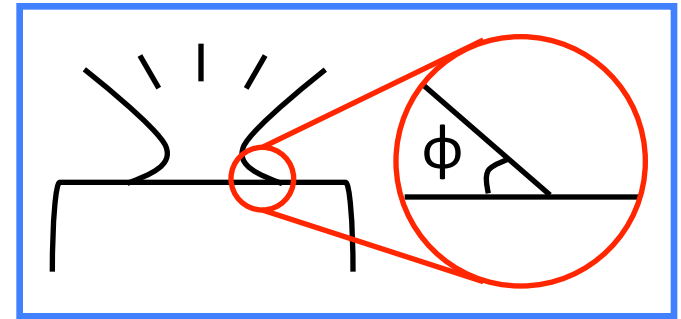
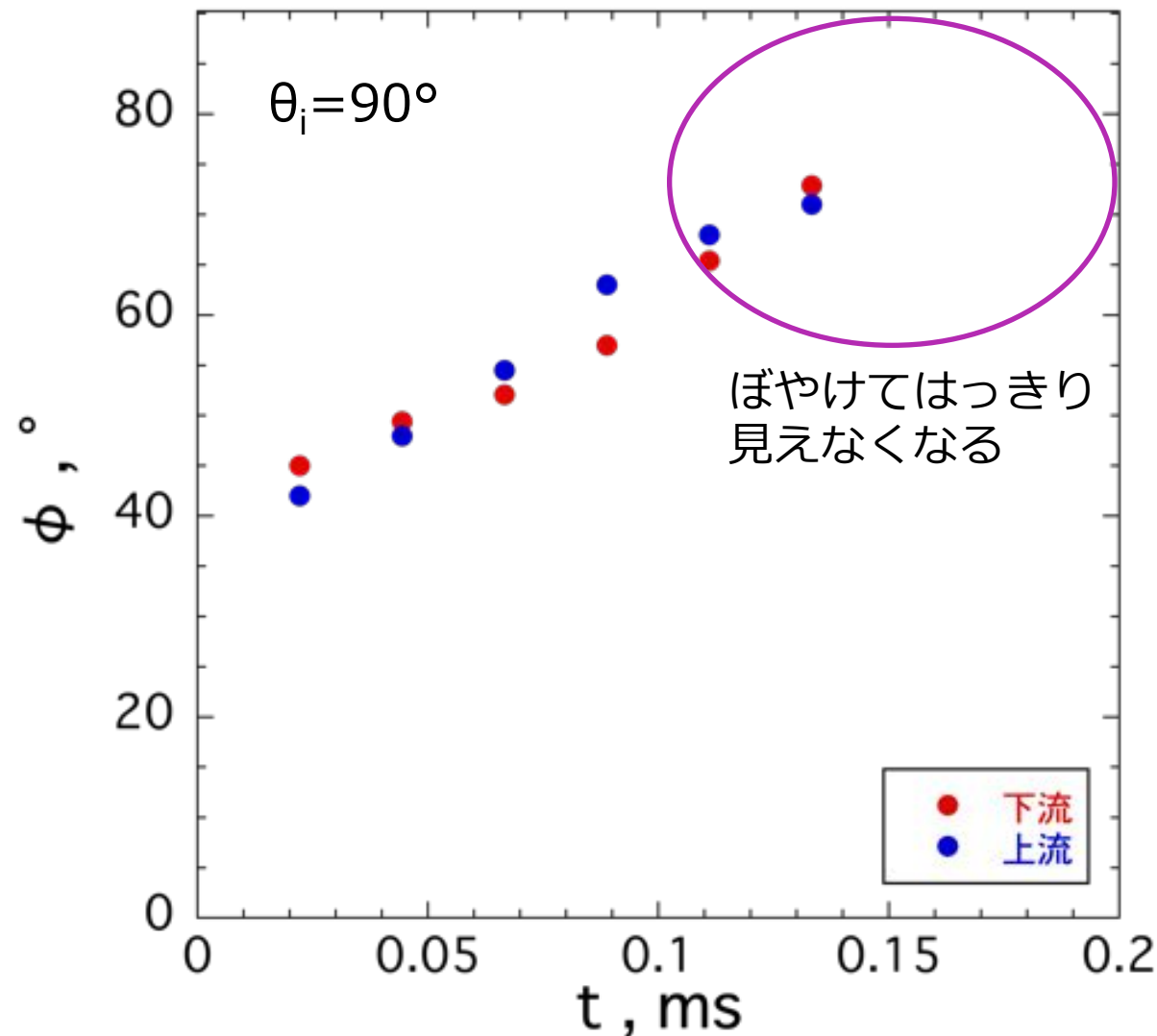
- $\theta_i$ 増加  
→ $\theta_e$ 増加
- $t > \sim 0.1 \text{ ms}$   
→ $\theta_e$ 一定  
→垂直になる時間と一致
- $\theta_i < 30^\circ$  : 垂直に放出  
→コーンができない

# エジェクタコーンの角度 $\theta_e$ の時間変化：下流



- $\theta_i = 90^\circ$  : 上流と同じ
- $\theta_i = 45^\circ$  :  $\theta_e$  減少  
→ 衝突後弾丸に水平方向に引っ張られた?  
→ その後一定に
- $\theta_i = 30^\circ$  : 初めは識別不能  
→  $\theta_i = 45^\circ$  と同じ傾向?
- $\theta_i < 20^\circ$  : 垂直に放出  
→ コーンはできない

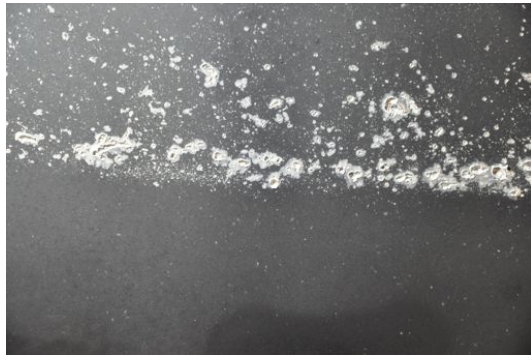
# 標的表面とエジェクタがなす角 $\phi$ の時間変化



- 時間とともに  
クレーターは広がり  
角度が立ってくる
- 垂直になる時間  
=クレーター形成時間？

# 水平方向のエジェクタ角度

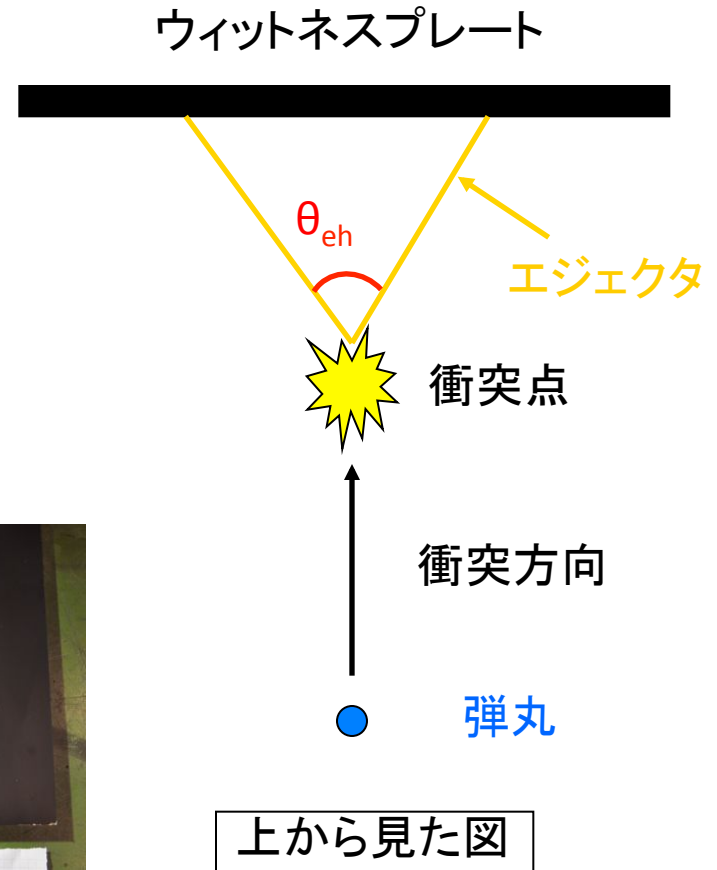
- ◆ 標的後方にウィットネスプレート(アルミ板)を置き、下流側へのエジェクタを衝突させて、エジェクタの広がりを観察
- ◆ 衝突角度によってどう変化するか



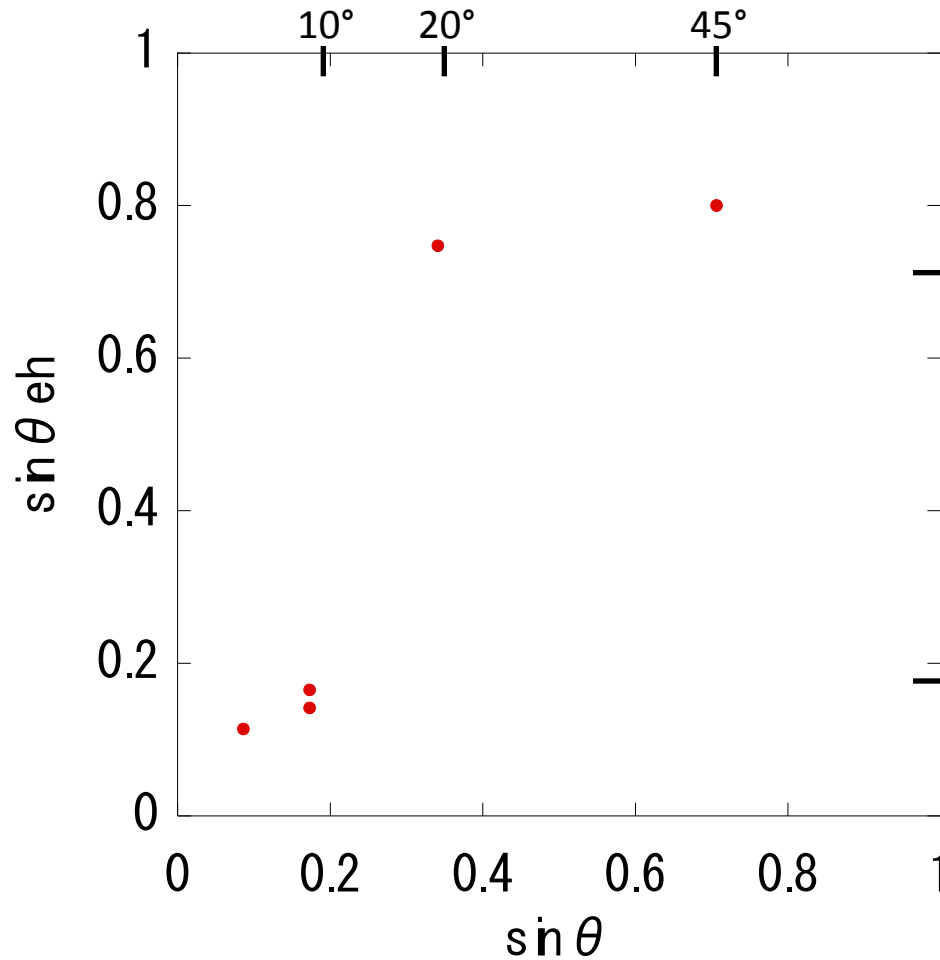
$\theta = 45^\circ$



$\theta = 5^\circ$



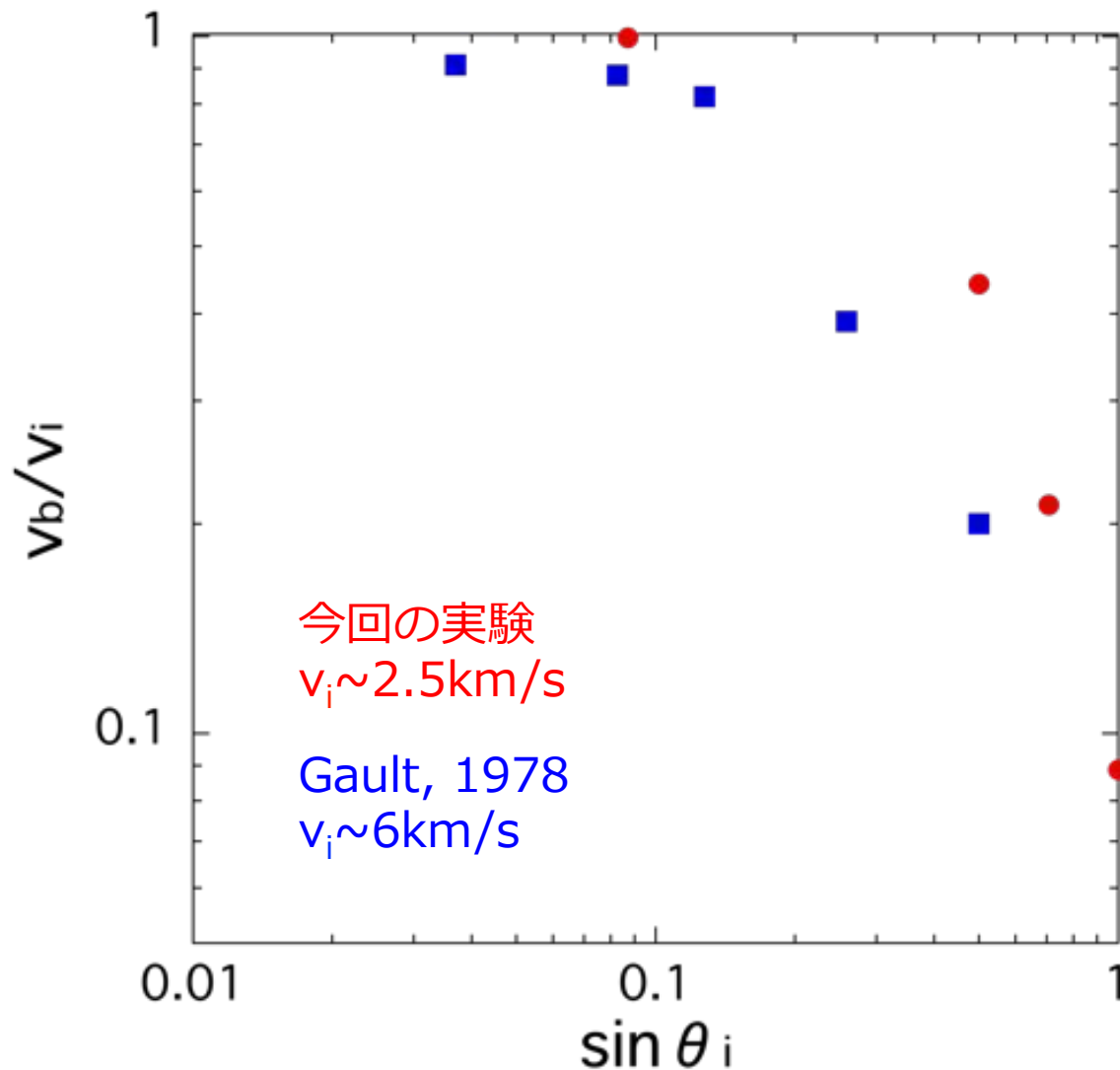
# 水平方向のエジェクタ角度



◆  $\theta$ が20°までは、エジェクタ角度 $\theta_{eh}$ はほぼ一定

◆  $\theta = 10^\circ$ 以下で、エジェクタ角度 $\theta_{eh}$ は大幅に減少  
⇒エジェクタはほとんど広がりを見せない

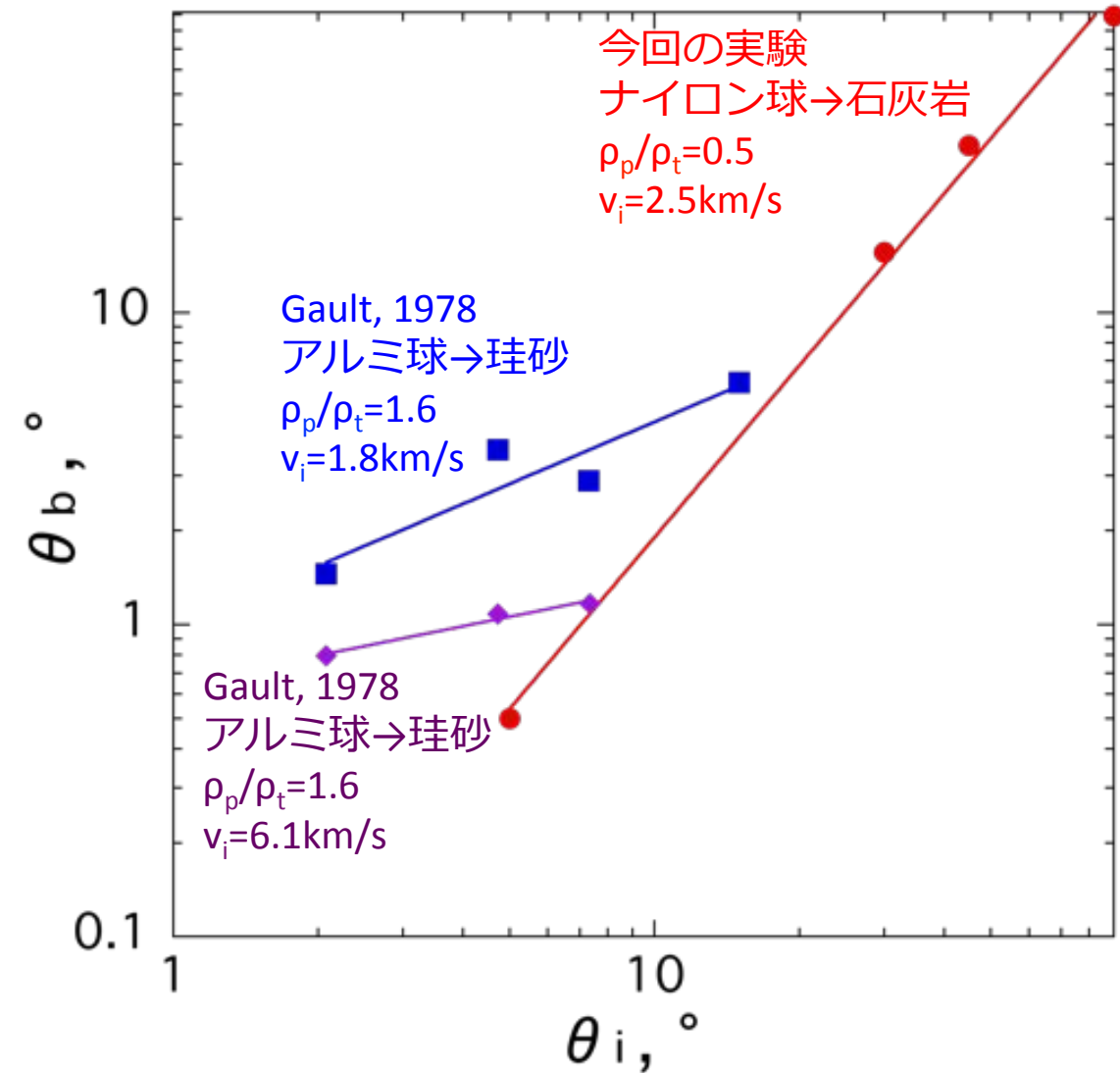
# 弾丸跳ね返り速度 $v_b$



- 細かな破片に隠れて測定できないものもあった
- Gault, 1978 : 見積もり値  
→ 垂直衝突とのクレーター質量差  
→ 衝突に使われなかったエネルギー  
→ 跳ね返り速度
- $\theta_i$  減少  
→  $v_b$  増加



# 弾丸跳ね返り角度 $\theta_b$



- $\theta_i$ 増加  
→ $\theta_b$ 減少
- 先行研究との傾きの違い  
→弾丸標的密度比の影響  
反発係数の違い

# まとめ

衝突角度	減少	90°
直径比	大きな変化はない	
深さ	減少	MAX
最深点(進行方向)	中心以遠	中心
体積	減少	MAX
エジェクタコーンの角度	減少, ~30°>ではできない	
エジェクタ-ターゲット角度	減少	
エジェクタ角度(水平方向)	10°以下で減少	20~90°で一定
弾丸のはね返り速度	増加	min
弾丸のはね返り角度	減少	MAX

# Special Thanks



長谷川 直さん



鈴木 絢子さん

門野 敏彦さん (写真募集中)



中村 昭子さん

黒澤 耕介さん

今回の実習を支えてくださったすべての方々  
本当にありがとうございました