

# 衝突クレーターのスケージング解析とは？

## 参考論文

Scaling of oblique impacts in frictional targets:  
Implications for crater size and formation  
mechanisms

Dirk Elbeshausen, Kai Wunnemann, Gareth S. Collins  
Icarus 204 (2009) 716-731

- 太陽系天体の起源と進化にとって衝突過程は非常に重要
- 衝突天体、標的、クレーターサイズの関係
  - スケーリング則
  - 実験室スケールでの衝突結果を惑星スケールに外挿する
- 衝突には様々なパラメータが複雑に関わっている
  - それぞれの関わりを調べるのには次元解析が有効
  - 最も成功しているものが $\pi$  スケーリング

# $\pi$ スケーリング

- クレーター体積 $V$ に関する量  
→衝突速度 $U$ 、標的密度 $\rho$ 、弾丸密度 $\delta$ 、強度 $Y$ 、重力加速度 $g$ 、弾丸質量 $m$   
→ $V=F(U, \rho, \delta, Y, g, m)$  : 7つの物理量
- $[kg], [m], [s]$ の3つを基本単位とすると  
7 - 3 = 4つの無次元数 ( $\pi_v = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4)$ ) ができる

$$\pi_v = \rho V / m$$

$$\pi_2 = 1.61 g L / U^2$$

$$\pi_3 = Y / (\delta U^2)$$

$$\pi_4 = \rho / \delta$$

規格化クレーター体積

規格化弾丸直径

規格化強度

規格化密度

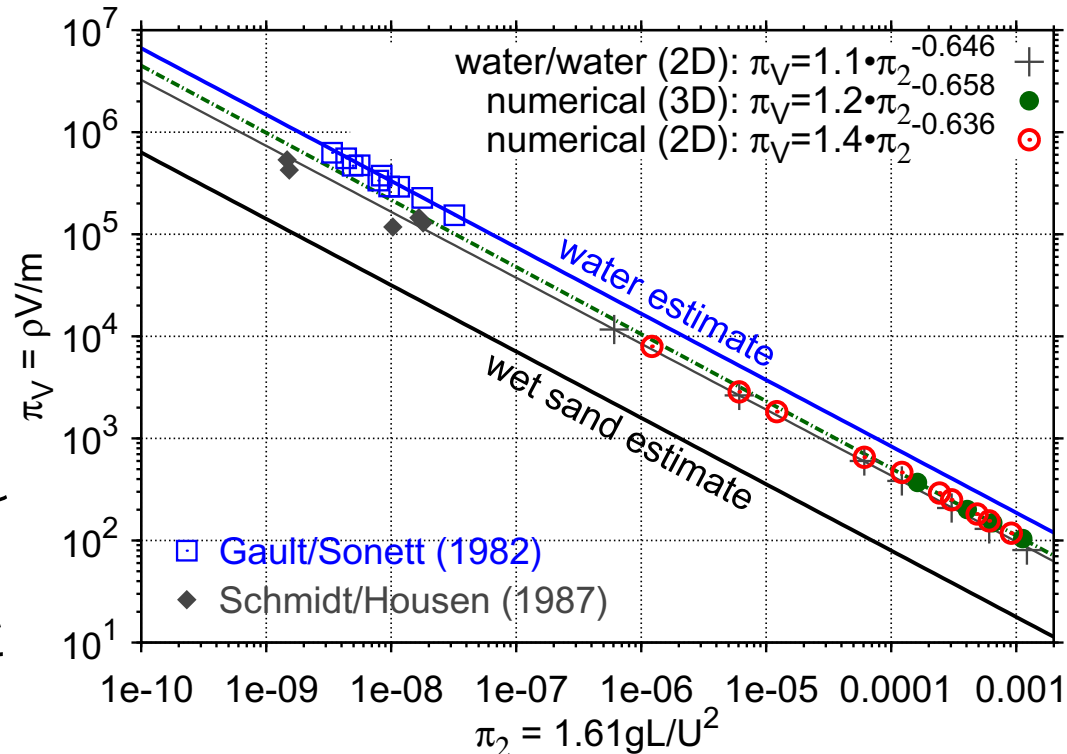
- $\pi_2$ と $\pi_3$ を比較する ;  $\pi_3 / \pi_2 = Y / \rho g L$   
→ $Y \gg \rho g L$  : 強度支配域  
→ $Y \ll \rho g L$  : 重力支配域

- クレーター形成は弾丸の直径L、速度U、密度 $\delta$ に個別に依存するのではなく、それらを組み合わせた量に依存  
→カップリングパラメータ： $C=LU^\mu\delta^\nu$  (Dienes and Walsh, 1970)
- この変数を導入すると $V=F(C, \rho, Y, g)$   
→重力支配域( $\pi_3$ 無視)で、弾丸標的密度比( $\pi_4$ ) $\sim 1$ として次元解析

$$\pi_V = C_V \pi_2^{-\gamma} \quad \dots(\ast)$$

$C_V$ ：標的により異なる量  
 $\gamma = 3\mu / (2 + \mu)$

- 衝突では様々な $\gamma$ の値  
乾燥砂への衝突： $\gamma = 0.507$   
湿った砂、水： $\gamma = 0.65$
- $\pi$ スケーリングに組み込まれていない標的の性質で $\gamma$ を変化させうるのは内部摩擦と空隙率(Wunnemann, 2006)



- これまで、これらはスケーリング則で考慮されていない

- 実際には斜め衝突は支配的
  - クレーター体積は衝突角度とともに正弦関数的に減少  
(Gault and Wedekind, 1978)
  - この関係はある一定の弾丸標的組み合わせでしか  
成り立たないかもしれない
- 衝突速度の垂直成分のみを使用して、衝突角度の影響をスケールリング則に組み込む(Chapman and Mckinnon, 1986)
  - 砂への室内実験を除いて、適切に試されていない
- 衝突角度とクレーターサイズの関係はまだ確立されていない
- 特に、斜め衝突での摩擦係数の影響がよくわかっていない

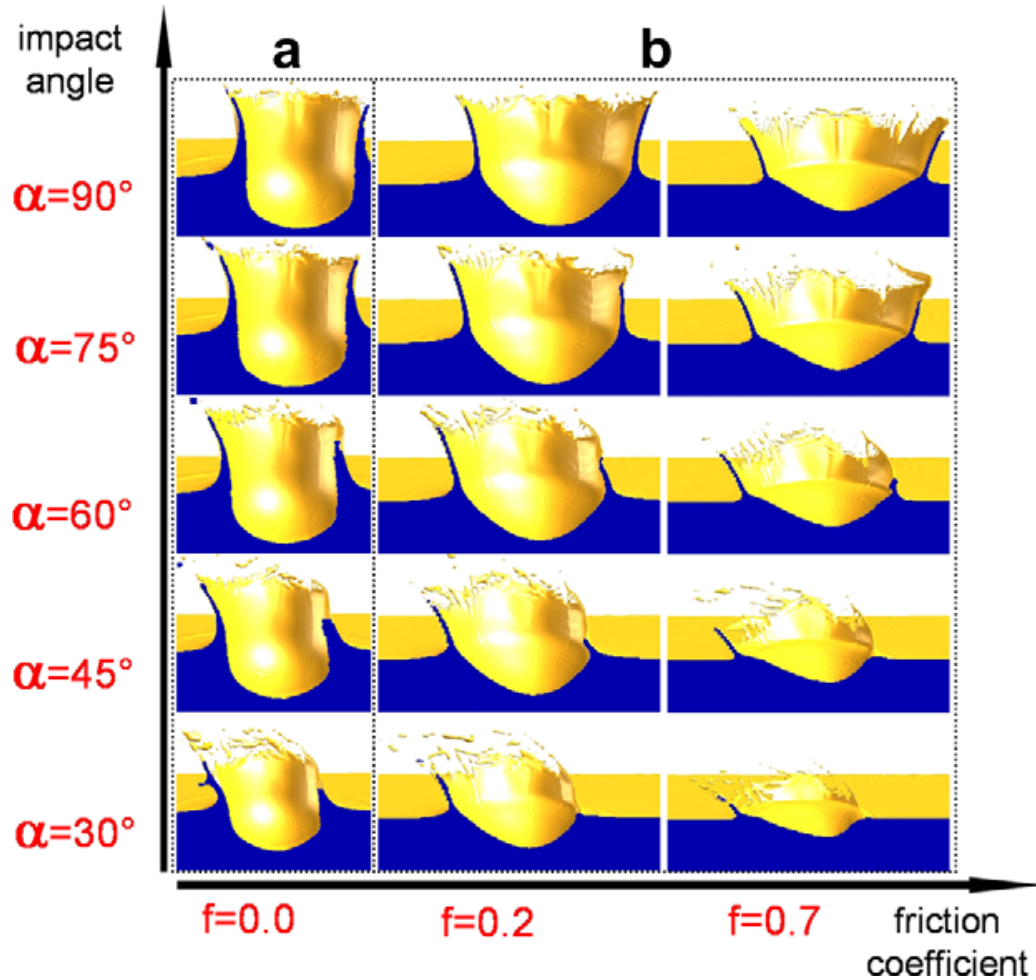
# 数値モデル

- 斜め衝突のモデル化には3つの空間座標が必要
- クレーター形成過程全体をシミュレーションするため、広範囲でのかなりの数のシミュレーションが必要
- 非常に効率的な計算コードが必要
  - iSALE-3Dを開発
  - 多様な物質をシミュレーションできる

## 数値実験条件

- 地球のような重力条件
- 衝突速度6.5km/s
- 衝突角度30-90°
- 結合強度0
- 摩擦係数0, 0.2, 0.7(典型的な砂の値)
- 弾丸直径430m-3km

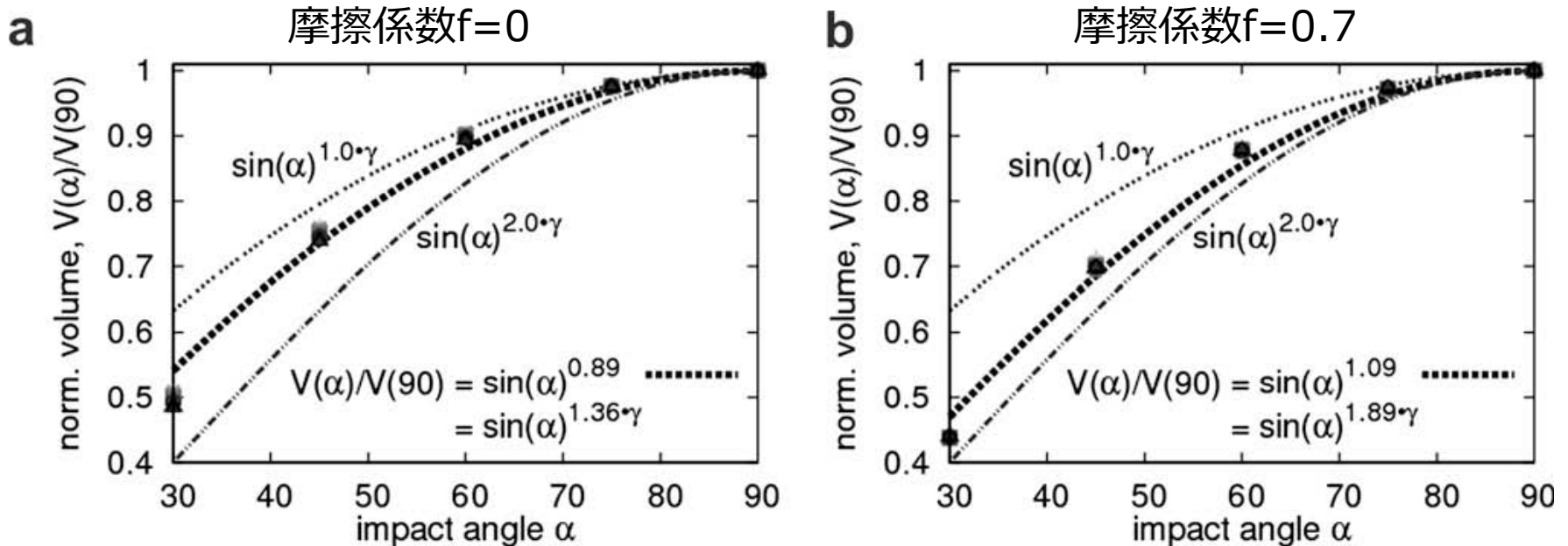
# クレーター形状への衝突角度の影響



- $f=0$  :  $30^\circ$ でもほぼ対称
- $f$  増加 : 衝突角度の影響が高まる

- 明らかに非対称だが、すべてのモデルでクレーターの楕円率は1.01以下  
→ 円形クレーター

# クレーター体積への衝突角度の影響

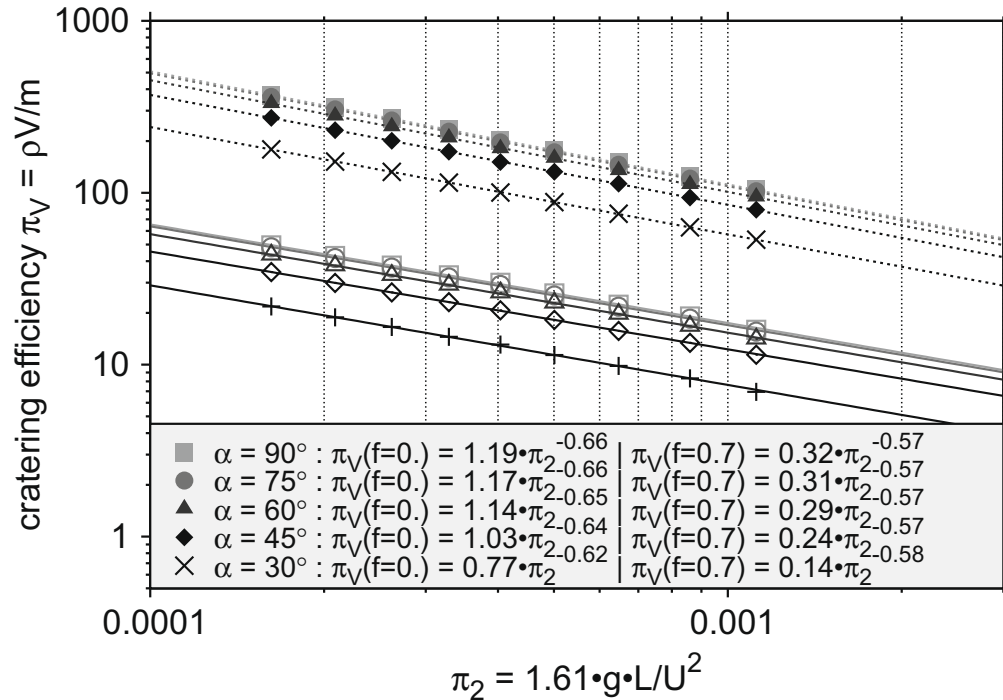


異なるサイズの弾丸で  $\pi_2$  の値を変えた、衝突角度と規格化クレーター体積の関係

- どちらの場合も、クレーター体積は衝突角度の  $\sin$  におおよそ比例する
- $\pi_2$  にはほとんど依存しない
- $f=0.7$  の場合、衝突速度の垂直成分だけがクレーター体積を決める とした場合（規格化クレーター体積が  $\sin(\alpha)^{2\gamma}$  に比例）に近い



# クレーター体積への衝突角度の影響



モデル結果を(\*)式でフィッティング

$$\pi_V = C_V \pi_2^{-\gamma}$$

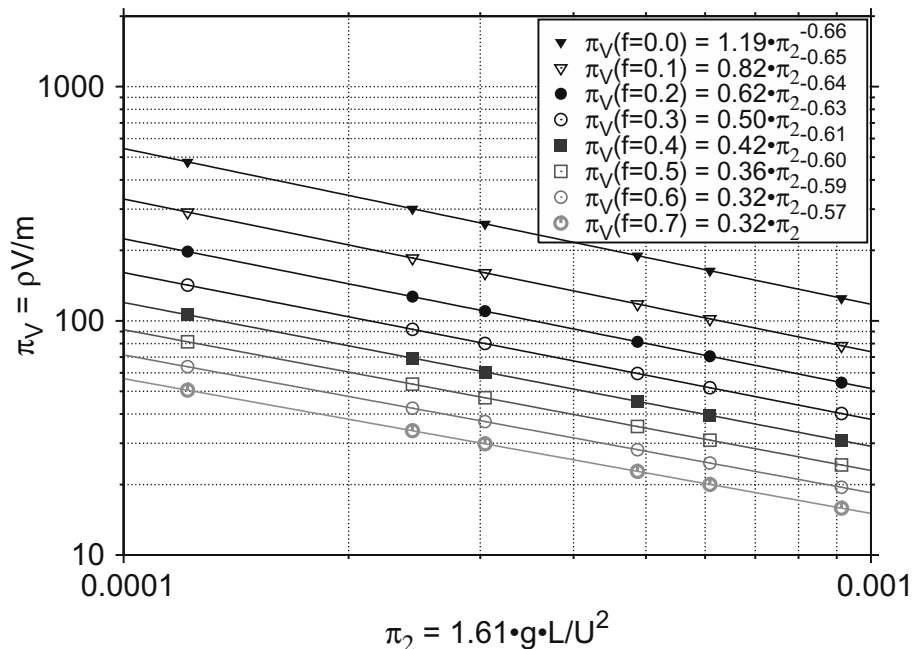
- 衝突角度減少  
→  $\pi_V$  減少

- 摩擦係数増加  
→  $\pi_V$  減少

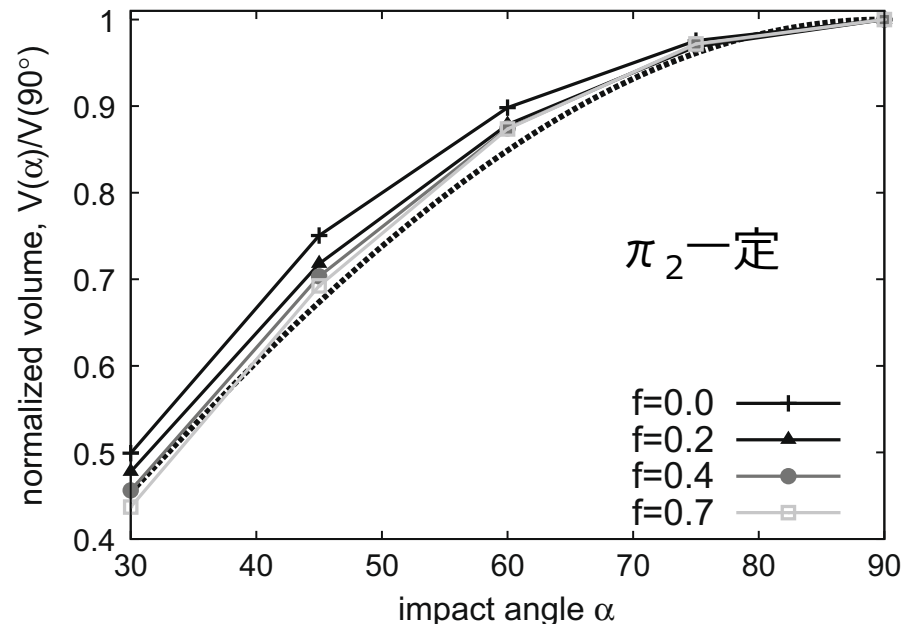
- 近似直線はほぼ平行  
→ クレーター体積への  
衝突角度の影響は  
 $\pi_2$  によらない

$\alpha$	$f$	$C_V$	$\gamma$
90	0.0	1.19	0.66
75	0.0	1.17	0.66
60	0.0	1.14	0.65
45	0.0	1.03	0.64
30	0.0	0.77	0.62
90	0.7	0.32	0.57
75	0.7	0.31	0.57
60	0.7	0.29	0.57
45	0.7	0.24	0.57
30	0.7	0.14	0.58

# 衝突角度と摩擦係数の組み合わせ



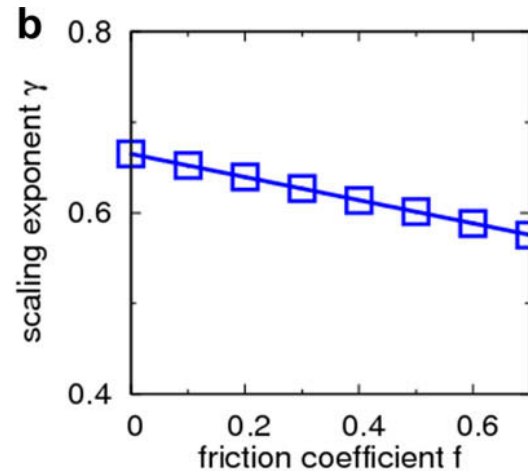
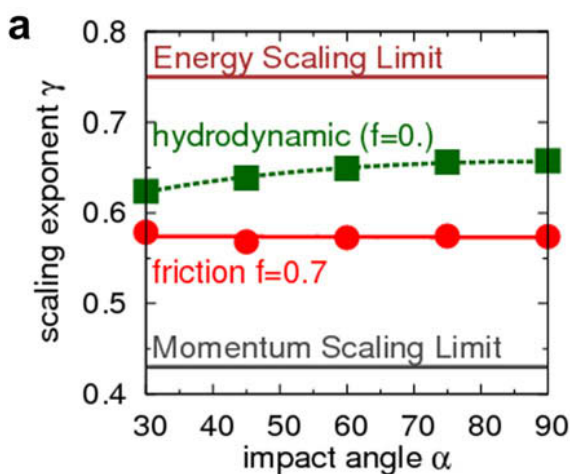
異なる摩擦係数に対する垂直衝突



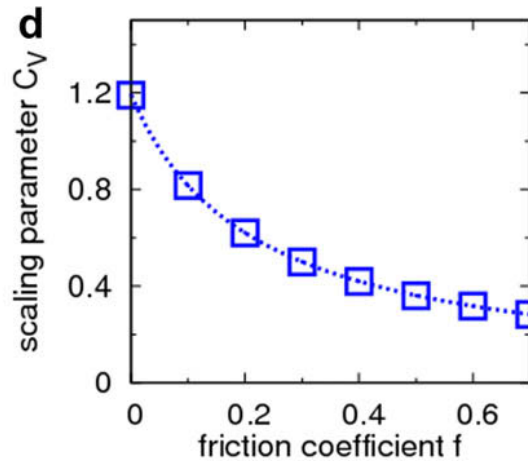
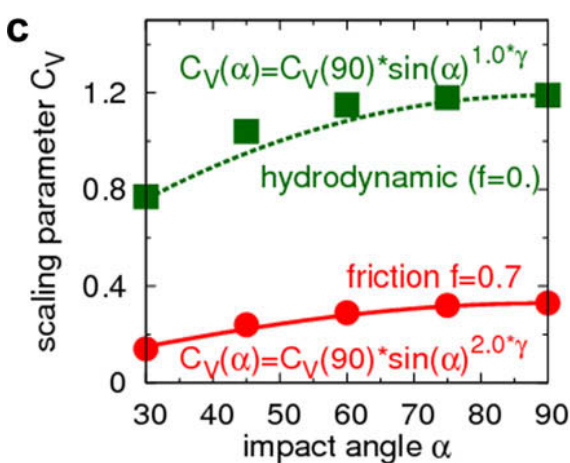
異なる摩擦係数に対する  
衝突角度とクレーター体積の関係

- 左図：摩擦係数増加 →  $C_V$ と $\gamma$ 減少
- 右図：衝突角度のクレーター体積への影響は  
摩擦係数にわずかに依存

# 摩擦係数と衝突角度のスケーリング則への組み込み



- 図a :  $f=0.7$   
衝突角度によらず  $\gamma$  一定
- $f=0$   
わずかに減少
- この結果が重要かどうかはまだわからない



- 図c :  $f=0.7$   
 $C_V \propto C_V(90) \sin(\alpha)^{2\gamma}$   
→ 衝突角度の垂直成分仮定に一致
- 低い  $f$  では一致しない

- 摩擦係数に伴う  $C_V$  と  $\gamma$  の減少 (図b,d)  
→ 摩擦係数はクレータースケーリングに影響する重要なパラメータ

# まとめ

クレーター形成における衝突角度と標的摩擦係数の影響を調査した

- 標的表面への $30^\circ$ 以上での衝突は円形クレーターを作る
- 衝突角度と摩擦係数は $\pi_v$ をはっきりと減少させる
- $f=0.7$ の標的への衝突では、クレーター形成に衝突速度の垂直成分だけが影響する
- $\pi$ スケーリングは $f=0.7$ で結合をほとんど持たない砂に似た性質を持つ物質への、惑星スケール斜め衝突に適用できる