

# SCIからのサイエンス

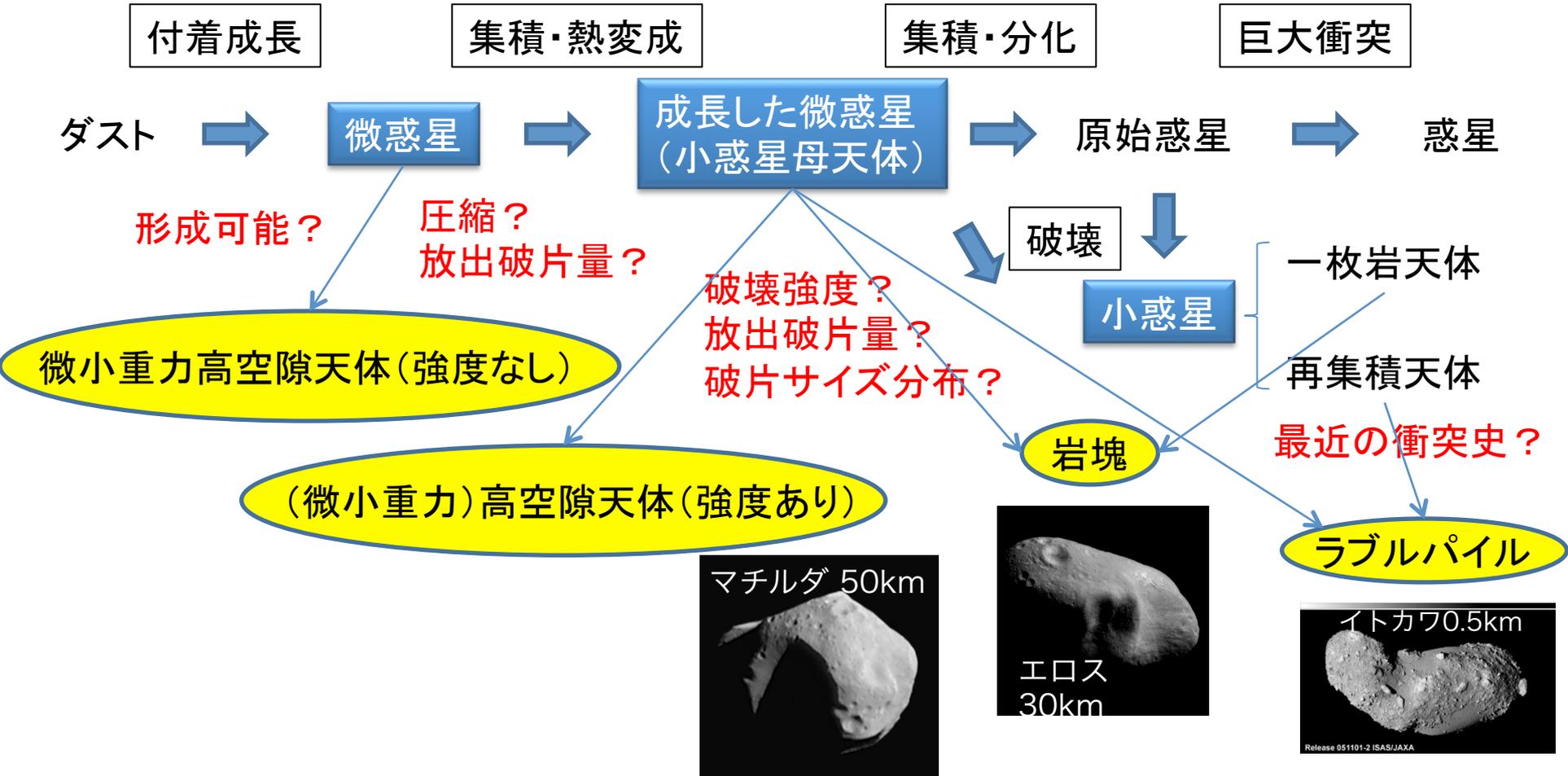
SCI サイエンスチーム

2011年12月15日



# 背景と目的

# 太陽系形成論と衝突進化史



- 各進化段階の天体における衝突物理が確立されていない
- 従来の研究は実証性を欠く。“本当の天体の衝突物性を知らない”

予想が外れた例: Deep Impact のクレーター径, LCROSSのイジェクタ量

# 1999JU3=「実験場」

イトカワの教訓

1999JU3クラスの小惑星の表面



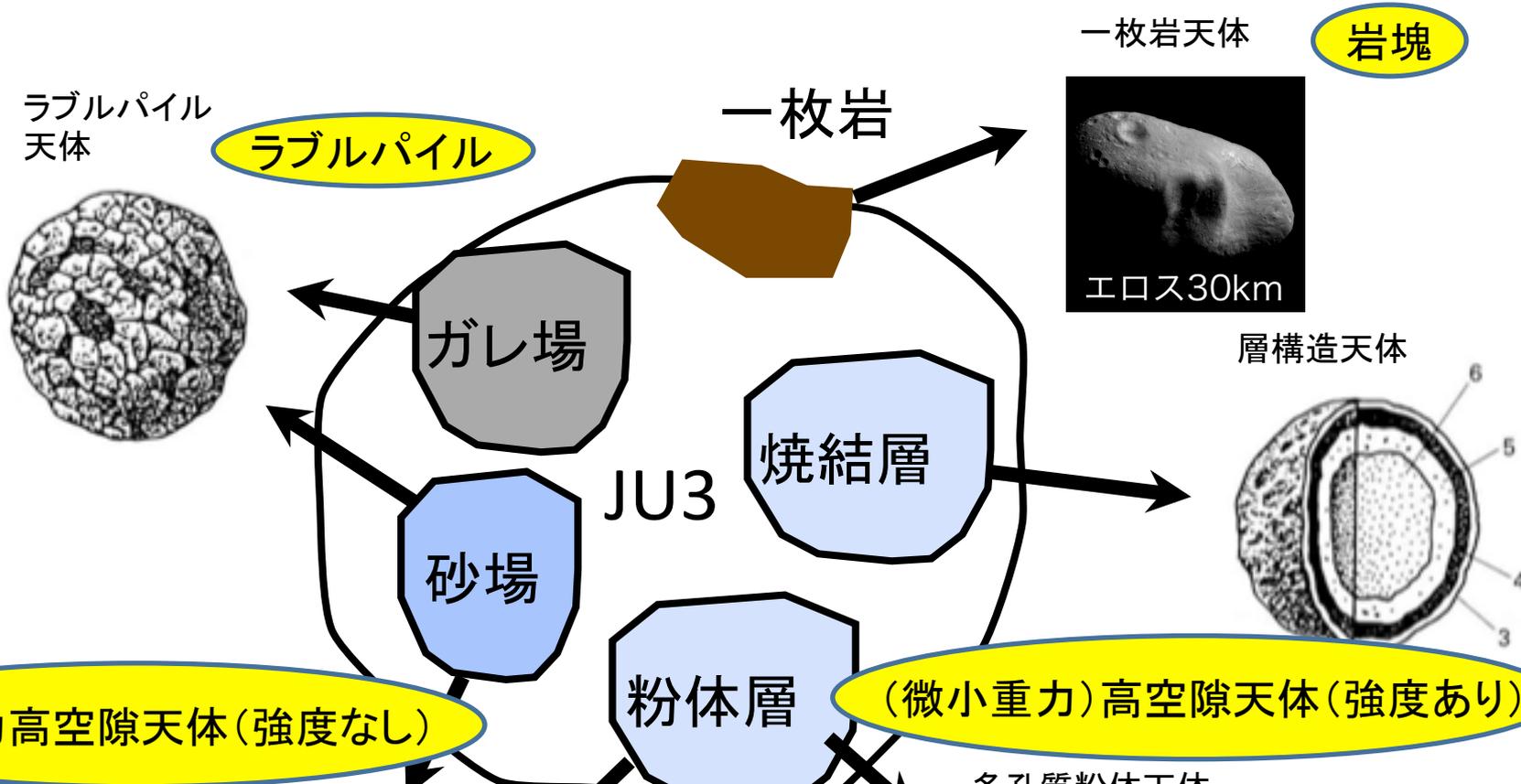
微小重力, ラブルパイル(表層の多様性:  
粉体層, 岩塊, 巨礫...)

1999JU3クラスの小惑星表層は, 過去から現在までの衝突進化天体構造・物性を模擬できる恰好の

## 実験場

# 1999JU3=「実験場」

過去から現在までの衝突進化天体構造・物性を模擬できる恰好の実験場



不完全な模擬かもしれないが、実際の天体物性であることに価値がある

地上室内実験では困難な実験環境(微小重力, スケール, ...)に価値がある

各進化段階の天体における衝突モデルの構築を目指す

# C型小惑星：1999JU3

- C型小惑星～Cコンドライトなら
  - 岩石学的タイプ3以上はほとんどない
  - 圧密焼結度が低い→構成岩石は強度が弱い

- 低強度天体の衝突物理

- ラブルパイル天体なら

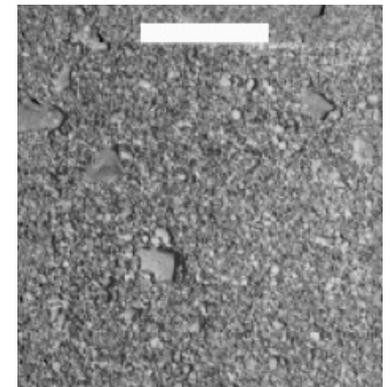
- (微小)隕石の衝突で容易に細粒化

- イトカワのムーゼスの海のような平原が期待される→**クレーター形成に対する微小重力の効果を見るのに最適. 有機物の付着効果を調べることも可能.**



(Image courtesy of Mike Zolensky, NASA JSC)

タギシュレーク隕石



イトカワ

# Small Carry-on Impactorを用いた 「宇宙衝突実験」

弾丸：銅製ライナ 2kg（最終径～14cm）

衝突速度：2km/s

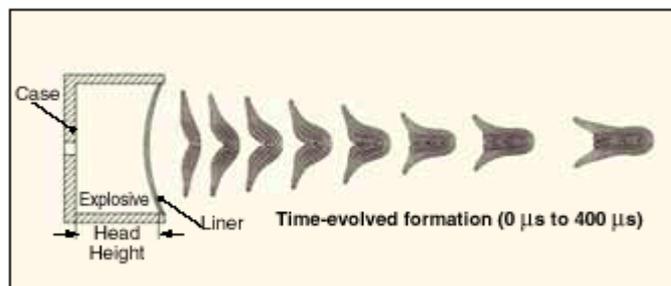
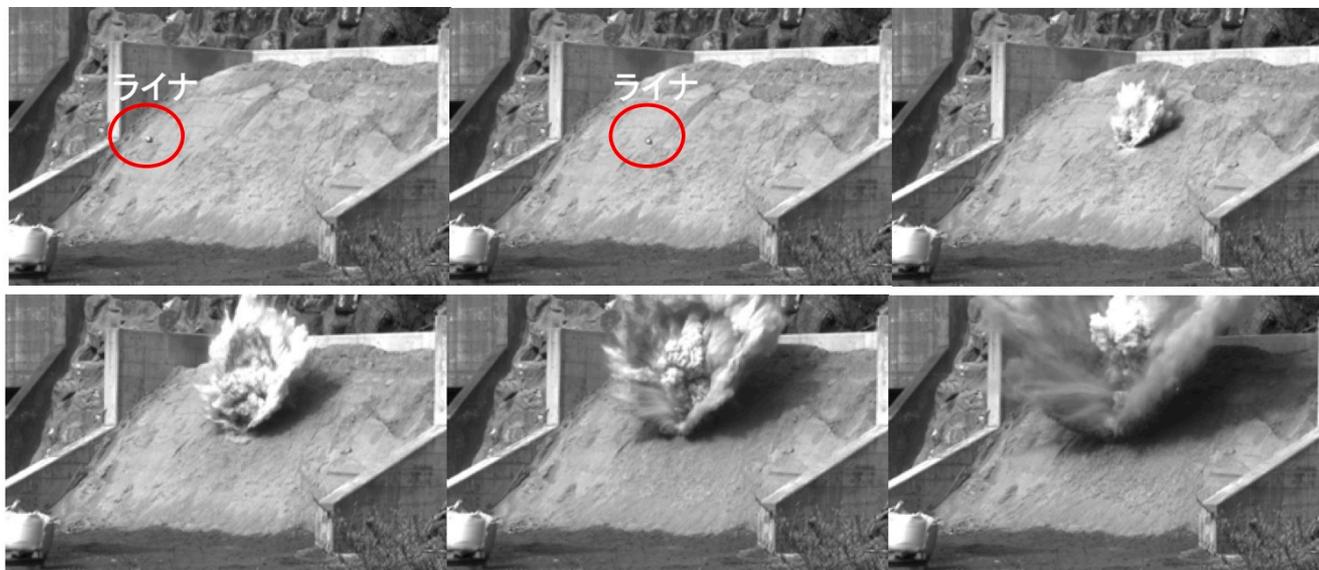


Figure 1. Formation of an EFP warhead

衝突装置は、小惑星表面に人工クレータを生成する目的で搭載される。本機器は、小惑星上空(高度数100m)で分離されたのち、作動し、爆薬のエネルギーにより金属ライナを高速で飛翔させ、小惑星表面に衝突させる。また、衝突の様子を分離カメラによって撮像する。 **空間分解能 10m/pixel: サイエンスは難しい。**



神岡鉱山跡地での実爆実験

# SCIのサイエンス目標

## JU3表面での衝突実験により

- 微惑星や隕石母天体など各進化段階の天体における衝突物理モデル(スケーリング則)の構築. そのためのアンカーをうつ.
- 小惑星1999JU3の物性・構造モデルの構築
- 1999JU3表層に刻まれた衝突史の読み解き＝クレーター年代学の構築と表層レゴリス更新過程の理解

# ただし，制約がある実験

- たった1回の実験
- どこに当たるかもわからない(精度は半径200m)
- 衝突点の物性も定かではない
- 安全退避のため母船からは観測できない

# 制約下の衝突実験

- 一回きりの衝突実験であるから、地上実験，理論（数値シミュレーション）の研究成果と合わせる必要がある
- どこに当たっても，衝突地点に応じて，各進化天体いずれかにおける衝突物理過程を調べられる
- 「実験」であるからには，衝突条件（弾丸，標的ともに）の明確化は必須
  - 少なくとも，弾丸の衝突条件は明確に！（実は衝突角度に不確定性）
- スケール則の構築には「その場観測」が必須
  - 衝突後にのみ衝突地点を訪れても衝突痕の判別困難（Deep Impactの教訓）

# ミッション目標

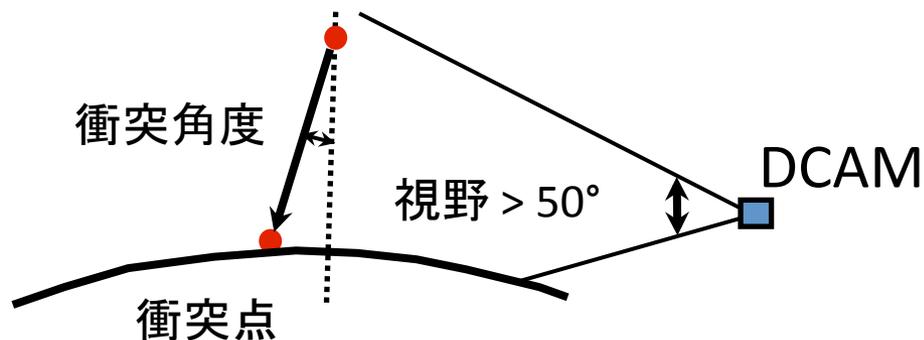
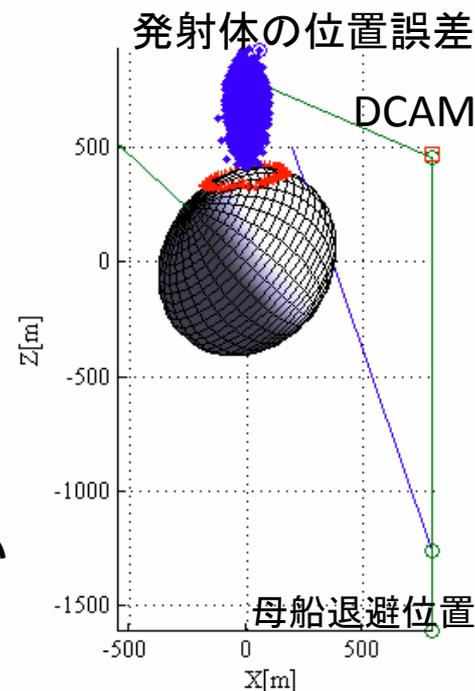
1. 弾丸の衝突条件の明確化
2. 標的状态の明確化 & 1999JU3の表層構造推定
3. イジェクタスケーリング則の検証と改訂
4. クレーター径スケーリング則の検証と改訂
5. 岩塊衝突だった場合の破片分布,  $Q^*$ の推定
6. 1999JU3に刻まれた衝突痕の読み解き
  1. クレーター年代学の構築
  2. 衝突を含めた表層更新過程の理解
7. 衝撃変成作用の理解

# 各ミッション目標

# ミッション目標1: 弾丸の衝突条件の明確化

物性 = 銅  
質量 = 2kg  
サイズ = ~ 径14cm  
衝突速度 = 2km/s  
衝突角度は？

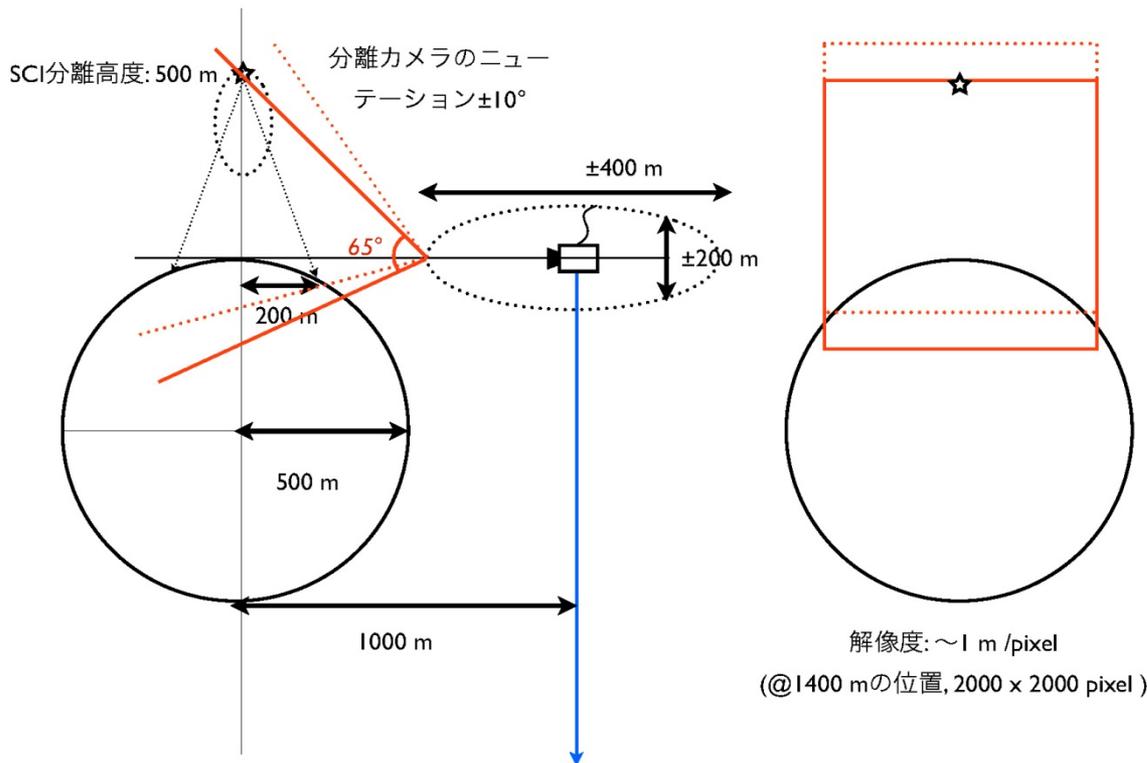
- SCIはニューテーションにより衝突角度に $\pm 20^\circ$ の誤差
- 衝突点のローカルな傾きを考慮するとこの誤差は無視しえない



# ミッション目標1： 弾丸の衝突条件の明確化

観測項目：SCI発射点をDCAMで観測することにより $\pm 5^\circ$ の精度で衝突角度を決定

SCIによる太陽反射光を捉える！



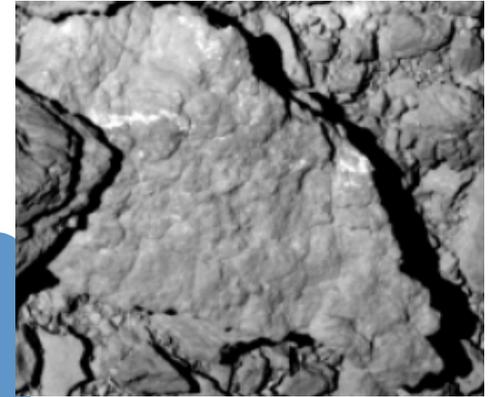
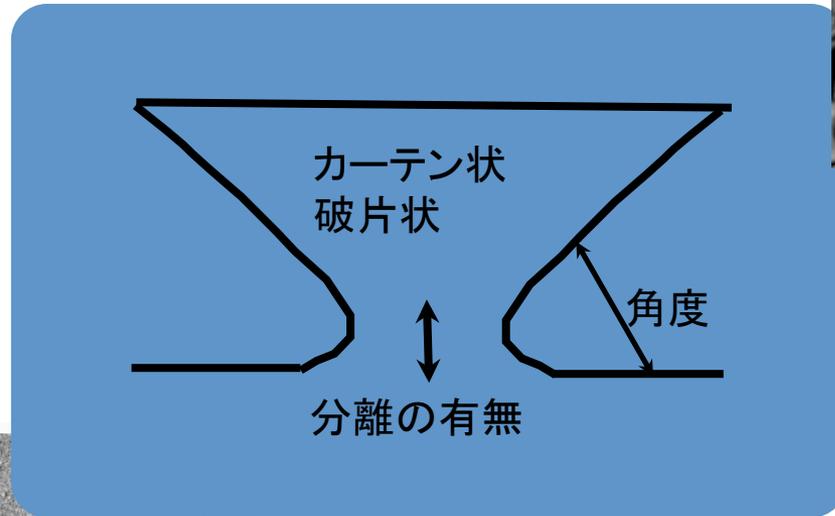
# ミッション目標2:

## 標的状态の明確化 & 1999JU3の表層構造推定

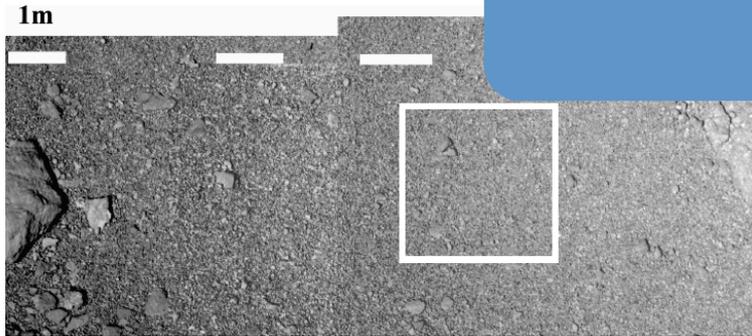


粉体層, 焼結層

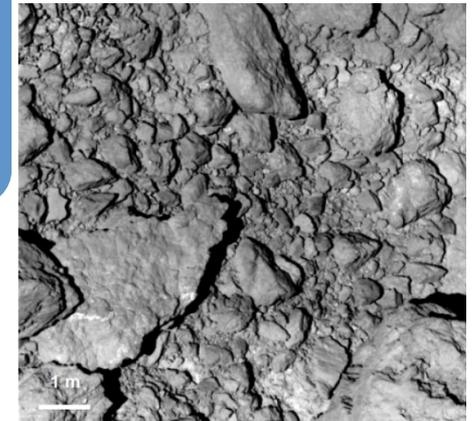
イジェクタ観測から表面  
構造の分類を行う



一枚岩



砂場, 小石場



ガレ場

# ミッション目標2:

## 標的状态の明確化 & 1999JU3の表層構造推定

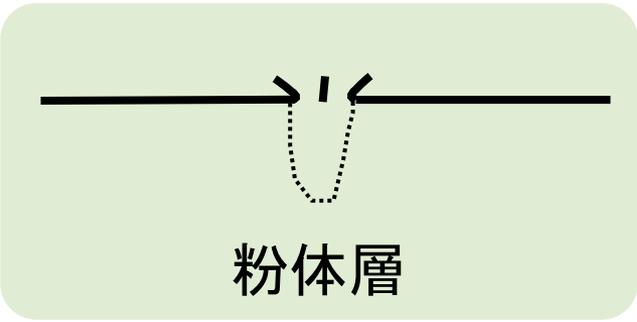
- DCAMによるイジェクタのその場観測 (10cm-1m/pixel)
  - イジェクタの有無
  - イジェクタ放出角度(イジェクタカーテン角度)
  - イジェクタのデタッチメント
  - 個別破片の確認
  - クレーターサイズ
  - DCAM搭載(予定)のLEDまたはマイクロフォンでイジェクタ粒子の検出
- ONC, TIR, NIRS3による事前事後の詳細画像撮影・データ取得 (~cm/pixel)
- LIDARによる重力場推定(有効数字1ケタ程度)
- LIDARとONCによるグローバルな密度, 空隙率推定
- リターンサンプルの音速測定, 強度測定

# イジェクタ

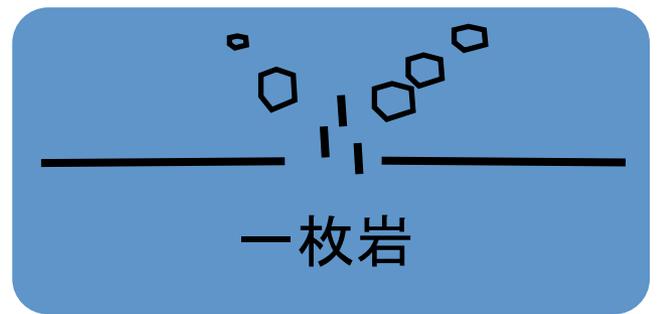
DCAM分解能  
← 1m/pixel  
←····· 10cm/pixel

無

有



スポール破片



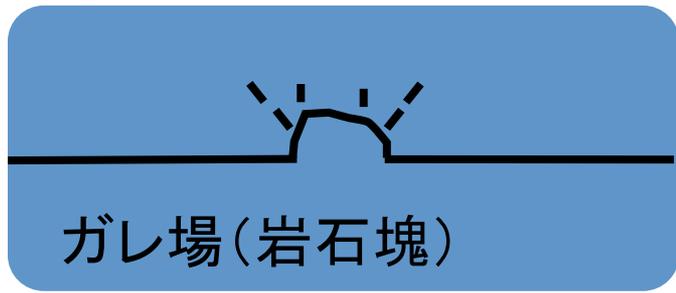
角度

破片

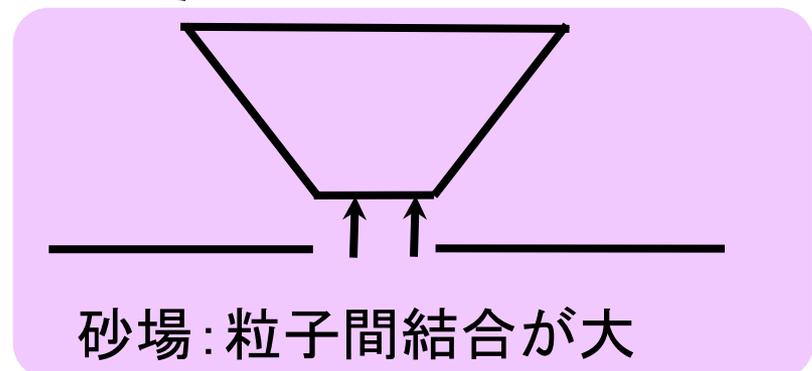
その他

45°

細粒破片



デタッチメント  
の有無

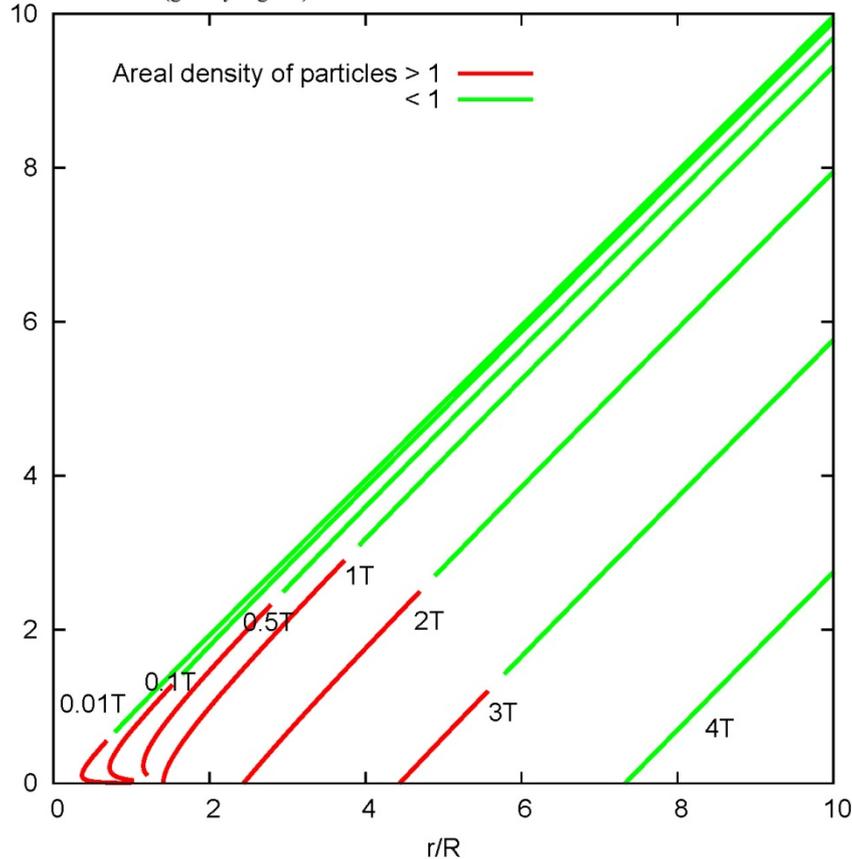


# イジェクタカーテンで $\tau > 1$ となる部分

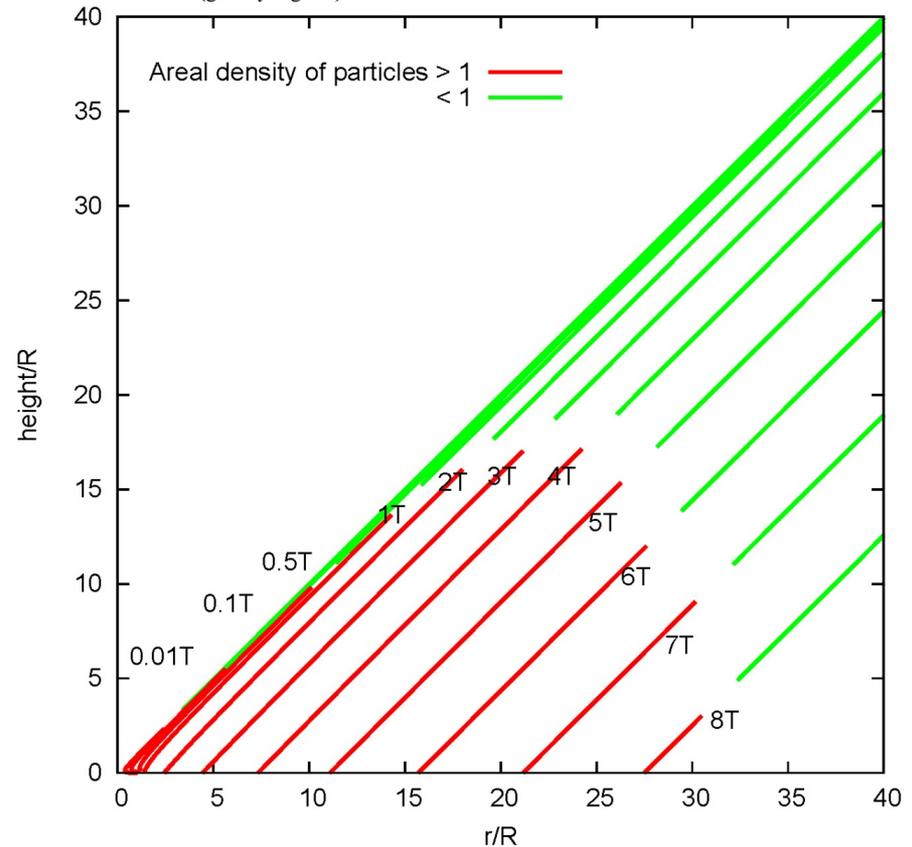
- イジェクタカーテンの根元は十分厚く観測可能
- 粒子サイズに反比例するので、粒子が小さいほど光学的に厚くなる

重力支配領域の場合（クレーター形成時間 $T=128$ 秒）

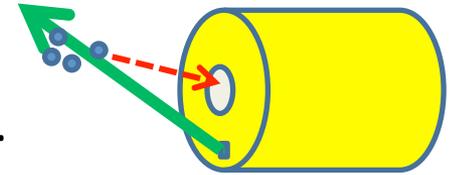
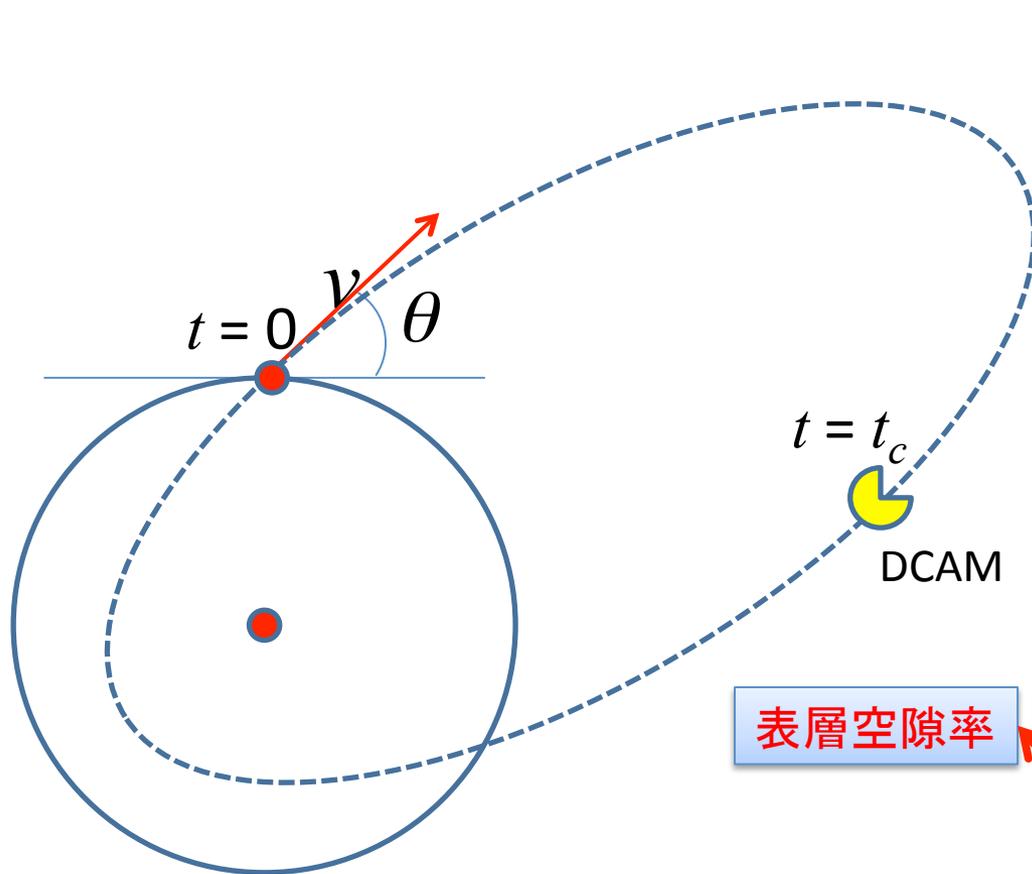
$\alpha=1\text{mm}$ ,  $\theta=45\text{deg}$ ,  $T=0.92(R/g)^{1/2}=128\text{sec}$  for  $g=2.6\text{e-}4\text{ m/s}^2$ ,  $R=5\text{m}$   
sand (gravity regime)



$\alpha=10\mu\text{m}$ ,  $\theta=45\text{deg}$ ,  $T=0.92(R/g)^{1/2}=128\text{sec}$  for  $g=2.6\text{e-}4\text{ m/s}^2$ ,  $R=5\text{m}$   
sand (gravity regime)



# DCAM搭載LEDでイジェクタ粒子検出



原理的には...

焦点, 初期位置,  
検出位置, 検出時刻



楕円軌道が決まる

(軌道面, 離心率,  
軌道長半径, 近点方向)



(自転による初速度補正後)

✓  $v, \theta$  決定

✓ 検出時の速度  $v_c$  も決定

✓ 運動量も測定できれば  
粒子サイズも決定可能

要求仕様・精度:

DCAMの位置を200m以内の誤差で決定すること  
DCAMのバッテリーを2時間以上保たせること  
雑電流を極力抑えること

# ミッション目標3: イジェクタスケーリング則の検証と改訂

- DCAMによるイジェクタカーテンのその場観測
    - イジェクタ放出角, 放出速度
      - 重力支配域(砂), 強度支配域(岩石, 焼結層)におけるイジェクタ速度分布パラメータの推定
        - 強度支配域の場合, 強度推定必要→リターンサンプルで計測
      - Z-モデルのZ値推定
    - トランジェントクレーター孔の大きさ推定
-  要求精度 : 0.1~<1m/pixelの解像度, 1(衝突直後)~0.01fps
- 事前事後画像詳細比較による堆積イジェクタ量・分布の測定
-  要求精度 : 半径200m内の領域を<cm/pixelで事前事後に撮像

# ミッション目標3: イジェクタスケーリング則の検証と改訂

砂: 重力支配域

岩石: 強度支配域

$$\text{Gravity regime: } \frac{v}{\sqrt{gR}} = C_2 \left(\frac{x}{R}\right)^{-1/\mu}$$

$$C_2 = C_1 \left( (4\pi/3)^{1/3} H_1 \right)^{-(2+\mu)/2\mu}$$

イジェクタ速度分布

$$\text{Strength regime: } v \sqrt{\frac{\rho}{Y}} = C_3 \left(\frac{x}{R}\right)^{-1/\mu}$$

$$C_3 = C_1 \left( (4\pi/3)^{1/3} H_2 \right)^{-1/\mu}$$

イジェクタカーテン移動速度

イジェクタ分離速度

放出角度  
Zモデル: Z値

$$\text{強度: } Y = \rho_t C_t v_e / 2$$

スポール破片速度

$$R \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = H_1 \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{(2+\mu-6\nu)/[3(2+\mu)]} \left[\frac{ga}{U^2}\right]^{-\mu/(2+\mu)}$$

$$R \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = H_2 \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{(1-3\nu)/3} \left[\frac{Y}{\rho U^2}\right]^{-\mu/2}$$

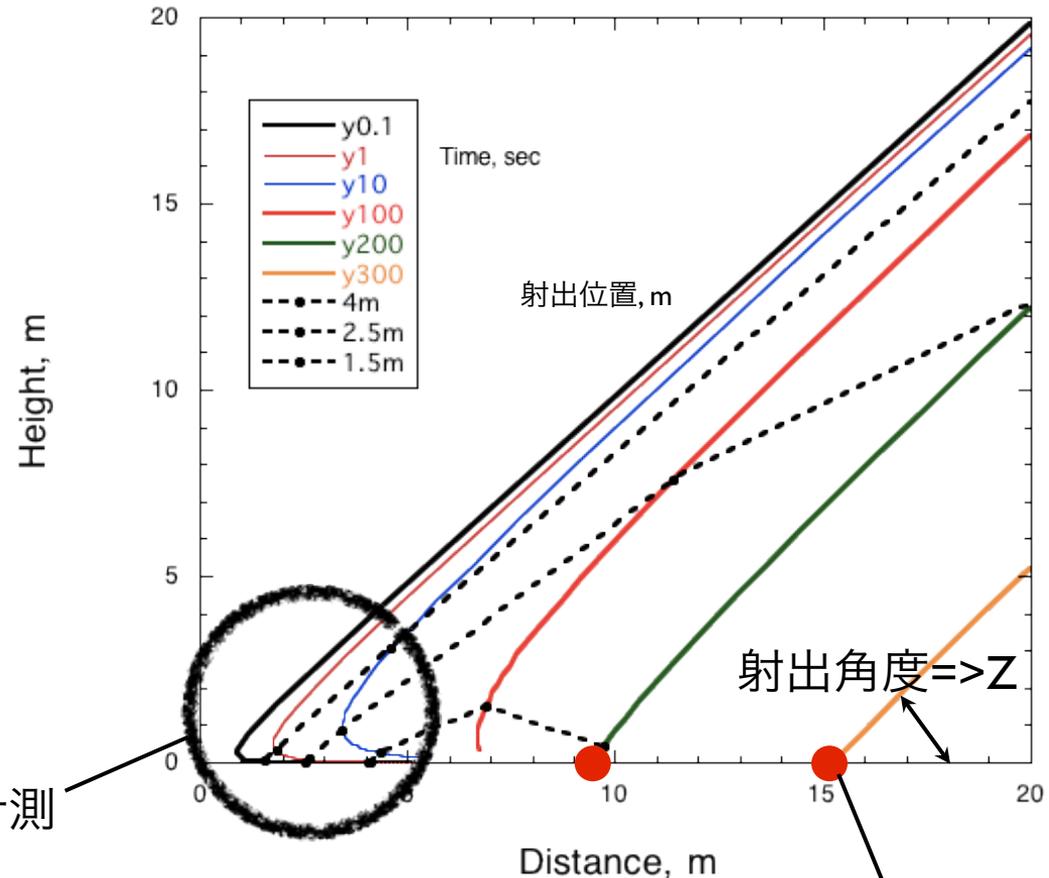
クレーターサイズ

# イジェクタカーテンの時間変化

クレーターサイズ:  $R=5.1\text{m}$  視野  $20 \times 20\text{m}$

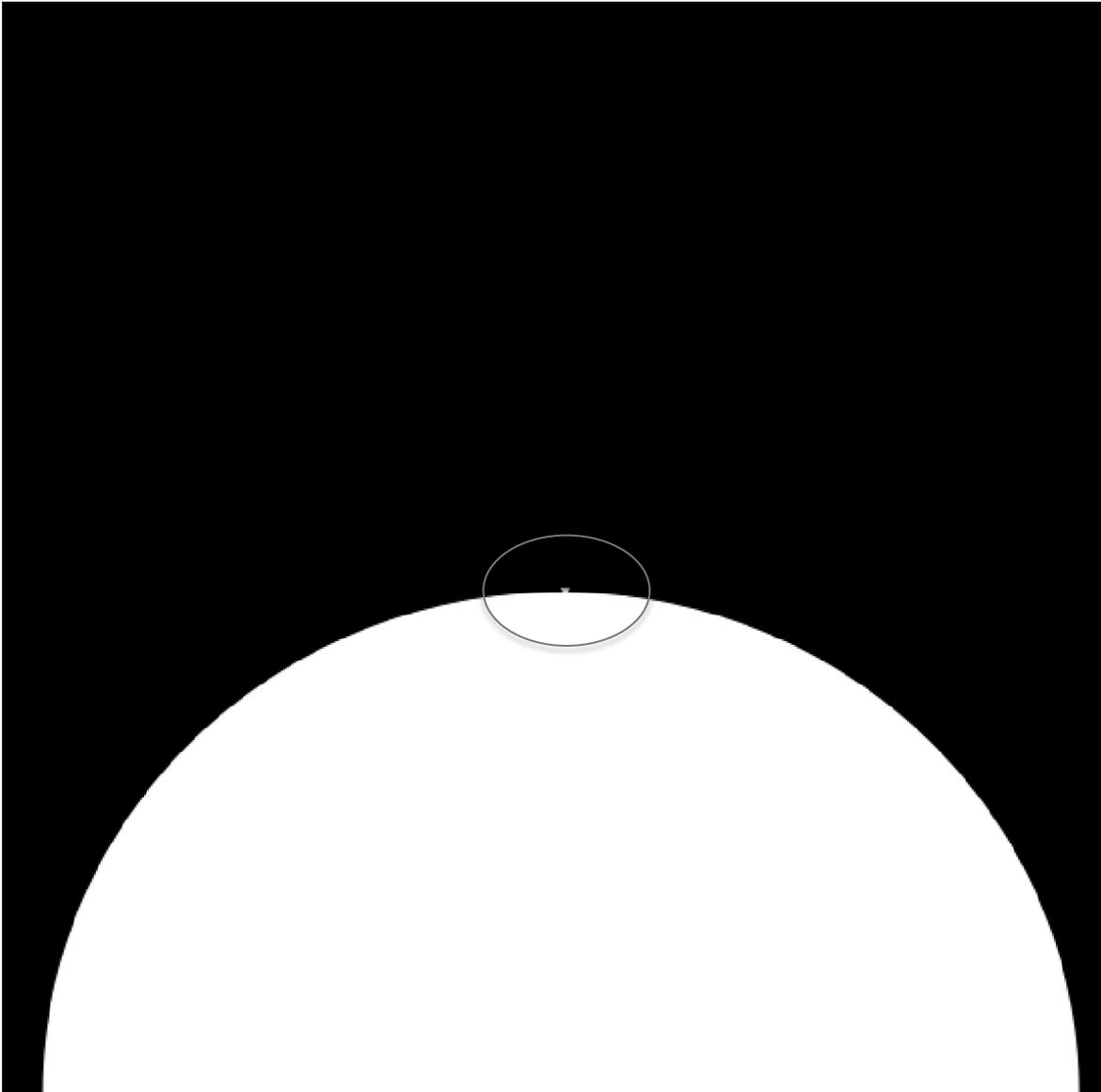
- 手法1はダイレクトな方法. 高空間分解能 (10cm/pixel) が必要.
- 手法2は経過時間から放出速度を求めて, エジェクタ根から初期位置を逆算する

\* 1 速度の位置変化を計測



\* 2 衝突時刻からの経過時間とエジェクタ根の距離の関係を計測

# 新DCAMの検討：想定画像



視野角  $65^{\circ} \times 65^{\circ}$

全体画像  $2000 \times 2000$  pixel, 4bit

距離 900mで 0.5m/pixel

小惑星

衝突点で  $i, e, \alpha = (40, 84.3, 44.3)$

0,0,0の0.8倍の明るさ

→ 反射率  $0.06 \times 0.05$

下に向かって暗くなるが省略

エジェクタ

最も明るい部分 0.01

4bit量子化想定で

小惑星 15, エジェクタ 14LSB)

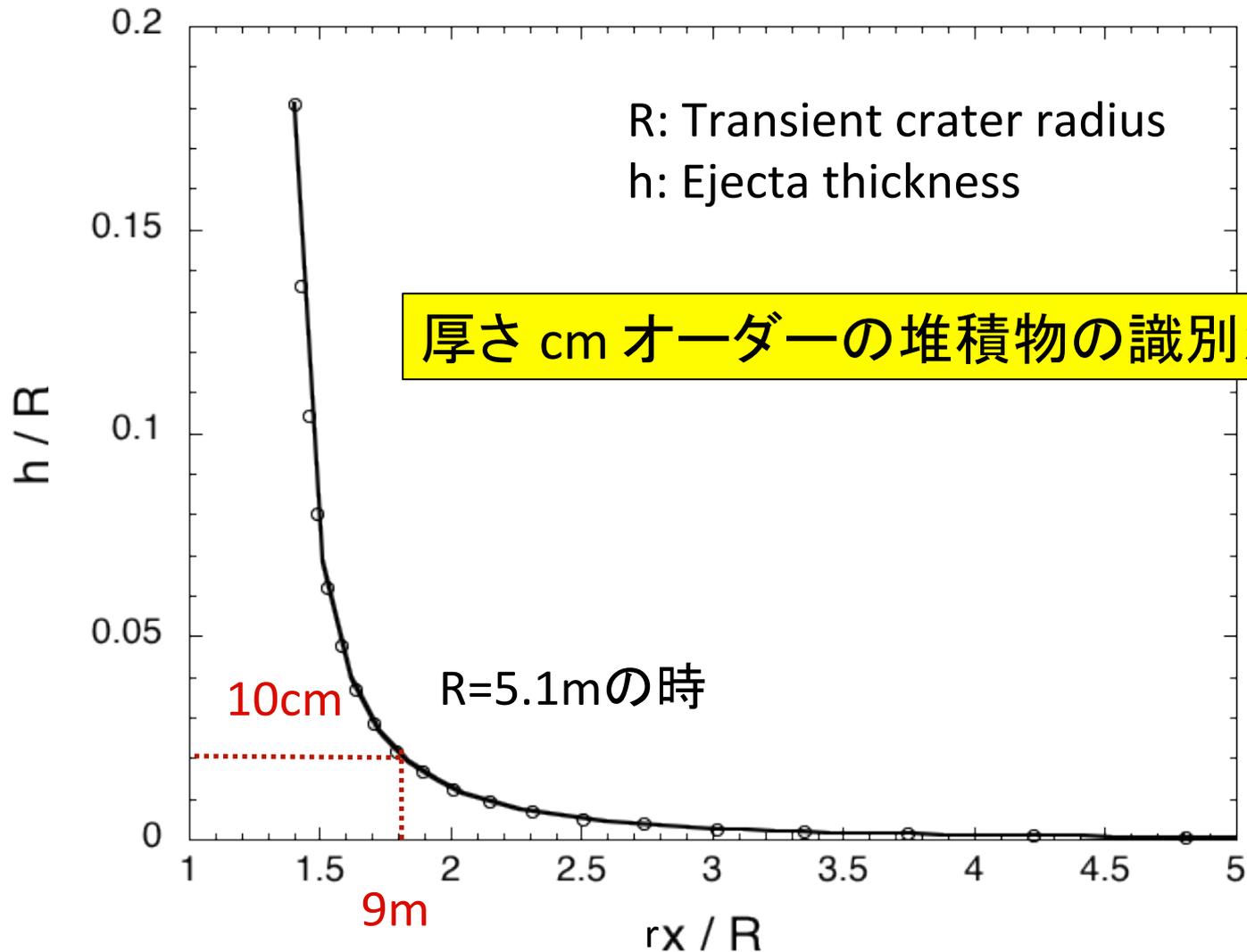
クローズアップ画像

20x8 pixel(実験画像から合成)



# エジェクタ堆積物の厚さと堆積距離の関係

(重力支配の場合. 強度支配では有意な堆積は期待できない)

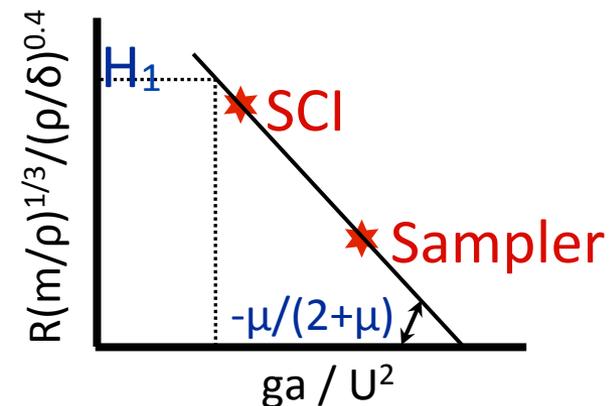


# ミッション目標4:

## クレーター径スケーリング則の検証と改訂

- DCAMによるイジェクタカーテンの根元観測でトランジェントクレーター径を推定 (10cm/pixel)
- 事前事後の詳細撮像
  - クレーター径, 深さ, 体積の計測(<cm/pixel)
  - ステレオ撮影による3D形状の測定
- サンプラーにより形成したクレーターの撮像:「点」→「線」
  - 異なる条件で形成したクレーターの測定
- リターンサンプルの強度測定
  - 強度支配領域だった場合に.

サンプル回収と同じ領域でSCI実験を行うことが重要



# クレーターサイズ予想：砂の場合

- 数値シミュレーション (AUTODYN) : 2m
- 土岐の落下カプセル内で行った微小重力衝突実験 (Takagi *et al.*, 2004) によるスケーリング則: 4m
- Holsapple & Housen による重力支配領域のスケーリング則: 10.2m

果たして正しいのは？

## ミッション目標5:

岩塊衝突だった場合の破片分布,  $Q^*$ の推定

- DCAMによるイジェクタ破片(スポール破片)画像計測
- 事前事後の詳細画像比較(<cm~10cm/pixel)
  - 破片を区別するために事前の表面撮像は不可欠

1.5m程度の岩塊なら破壊(最大破片サイズが元岩石の半分になる)

# ミッション目標6-1: 1999JU3におけるクレーター年代学

SCIで形成されたクレーター（衝突条件既知）

新たに得られたクレータースケールング則

1999JU3表層に見られるクレーター痕から衝突フラックスを推定する

1999JU3の軌道進化

1999JU3が漂ってきた領域，年代におけるクレーター年代学

# ミッション目標6-2: 表層レゴリス更新過程の理解

SCIで形成されたクレーター(衝突条件既知)

新たに得られたクレータースケーリング則

1999JU3表層に見られるクレーター痕から衝突による放出フラックスと攪拌効果(gardening effect)を見積もる

1999JU3の表層サンプルの太陽風暴露・銀河宇宙線年代

1999JU3の表層レゴリス更新過程(レゴリス寿命)の評価

# ミッション目標7: 衝撃変成作用の理解

- NIRS3, TIRによる衝突前後の詳細データ取得
  - 衝撃変成が見られるか？
- リターンサンプルによる衝撃変成作用の確認
  - サンプラーで採取した領域を狙ってSCIを衝突・採取すれば, SCIの衝突条件での変成作用が確認可能
  - これまでは室内衝突実験によって衝撃変成作用の分類が行われてきた. 微小重力・開放系における比較的大きな弾丸衝突による衝撃変成作用の確認が重要

# 必須観測要求

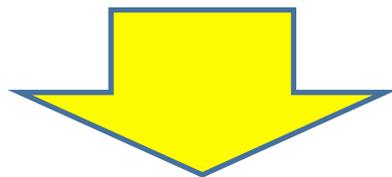
- 発射体の位置同定
- DCAMによる高解像度 (<0.5-1m/pixel) **その場観測**
- ONC等による衝突地点の**衝突前後の高解像度撮像**(<cm/pixel)

# まとめ

- 世界初の人工クレーターの詳細観測により、天体衝突に関するベンチマークを取得する
- 衝突のその場観測及び事後観測によりJU3表面の力学的分類を行う
- 衝突地域の表層に対する衝突スケール則を得る：クレーターサイズ，放出物速度分布，放出物質量，衝突破壊強度
- 得られた衝突スケール則を用いて，衝突地域の物性・構造に関する知見を得る

# Deep Impact 以上のインパクト

- 世界初の小惑星への衝突実験
- 衝突の「その場」および前後の詳細観測



スケーリング則構築に際し必ず引用される“アンカー”

その場観測のためのDCAMの改良が是が非でも必要！

Small Carry-on Impactor Elucidates the Nature of Craters and Ejecta

SCIENCE

# 【参考】その場観察と事後観察

	その場観測	事後観測	クレータースケール則：重力支配域	クレータースケール則：強度支配域	衝突破壊スケール則
クレーターサイズ	△	△	○, $\mu, H_1$	○, $\mu, H_2$	-
エジェクタ速度	○	×	○, $C_1$	○, $C_2$	-
エジェクタ質量	△	△	○, $k$	○, $k$	-
力学強度	○	×	-	○, $Y$	-
衝突破壊強度	△	○	-	-	○, $m_l/M_t$