「はやぶさ2」人工クレーター形成 実験とクレータースケール則

荒川政彦 神戸大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻

2014年12月3日打ち上げ





はやぶさ2

- C型小惑星:地球近傍小惑星1999JU3を目指す
 - 2014年12月3日 打ち上げ
 - 2018年到着, 2019年離脱, 2020年地球帰還
- 3箇所からのサンプルリターン
 - 水・有機物を含む試料の採取:生命起源物質の研究
- 小型搭載型衝突装置(SCI)で人エクレーターを形成
 - 宇宙衝突実験:小惑星上で惑星形成過程で起きた天体衝突
 を再現する
 - 人エクレーターの形成過程を分離カメラ(DCAM3)で観測
 - 地下試料を採取:宇宙風化や太陽放射による熱変成をを受けていない新鮮な試料

4

小惑星の位置づけ

















15年1月7日水曜日

惑星形成過程の記録はどこに?

小惑星に注目!

- 火星と木星の間の軌道に多く存在する
 小天体の総称: < 1000km
- 小惑星の研究 → missing linkを繋ぐ

太陽系天体の多様性と衝突現象



15年1月7日水曜日





15年1月7日水曜日



小惑星探査

- 日本の小惑星探査
 - 「はやぶさ」によるサンプルリターン
 - S型小惑星「イトカワ」
 - 「はやぶさ2」によるサンプルリターン
 - C型小惑星「1999JU3」



小惑星探査

- 日本の小惑星探査
 - 「はやぶさ」によるサンプルリターン
 - S型小惑星「イトカワ」
 - ●「はやぶさ2」によるサンプルリターン ● C型小惑星「I999JU3」

はやぶさ2

「はやぶさ2」のサイエンステーマ



探査対象小惑星の特徴

2014年4月の時点での情報

名称	:	まだ名前は無い
確定番号	:	162173
仮符号	:	1999 JU3
		1999年5月に発見された小惑星
大きさ	:	約900 m
形	:	ほぼ球形
自転周期	:	約7時間38分
自転軸の向き		: 正確な推定が困難
反射率	:	0.05 (反射率が1に比べ て小さい=黒っぽい)
タイプ	: 1	C型(水・有機物を含む物質 があると推定される)
軌道半径 公転周期	:	約1億8千万km 約1.3年

小惑星1999 JU3の軌道



イトカワと1999 JU3の大きさ







はやぶさ2概観









直列的なミッションシーケンス, さまざまな運用モード



- 地球出発
- IES試運転
- IES動力航行開始



・ 地球スイングバイ





ホームポジション維持
 近接観測による小惑星
 グローバルマッピング





・合運用



・降下訓練・降下運用
・タッチダウン/サンプリング

- 衝突機運用(クレーター生 成)
- ・ デブリ/イジェクタ退避運用





・ 地球リエントリ

神戸大学

●小型搭載型衝突装置(SCI)のサイエンス検討と分離カメラ(DCAM3)の開発を担当



SCIフライトモデル



Electronic device Safe & arm device
最新の分離性能に基づく衝突シミュレーション(モンテカルロシミュレーション)
→ 半径200m以内に着弾可能







SCI 仕様

- Total weigh of SCI: < 20kg
 - Size: Φ300mm x h300mm
- Explosive part:
 - Shape: Circular cone (Diameter: 265mm)
 - Explosive: 4.5kg, Liner: 2.5kg
- Deformation of liner:
 - Shape of projectile: Shell type
 - Velocity of projectile: > 2000m/s
 - Weight of formed projectile: > 2kg

分離カメラ (DCAM3)

 工学検証用のアナログカメラ(DCAM3-A)と理学 観測用のデジタルカメラ(DCAM3-D)からなる.



15年1月7日水曜日

分離カメラ (DCAM3)

21

工学検証用のアナログカメラ(DCAM3-A)と理学 観測用のデジタルカメラ(DCAM3-D)からなる.

HAYABUSA2





HAYABUSA2

DCAM3-D Specification Requirements

- detect SCI body before explosion to determine the collision angle.
- determine the ejecta curtain angle within 10% error.
- detect high-speed spall fragments (50 m/s) from a rocky surface.
- have high-speed transmitter for immediate data transmission to the mother ship.

Specifications	Requirements
Space resolution	< 1 m/pixel (2000 x 2000 pixels)
Frame rate	1 frame/sec maximum
Optics FOV angle	74° x 74°
Optics F	< 1.7
Optics Ensquared Energy	> 65% @2 x 2 pixels
ADC digits	> 8 bit (gray scale)
S/N	> 5 for far SCI body
Operation duration	1000 sec for ejecta curtain 1-2 hours for low-velocity dust

SCI Separation SCI Separation SCI Separation SCI Separation



15年1月7日水曜日

SCI/DCAM-3の運用



観測終了

SCI/DCAM-3の運用



SCI (小型衝突装置)の目的

- SCIによるアクティブ探査: 1999JU3の起源と進化
 - -人工クレーターを形成し、その内部(もしくは周囲)から 地下試料のサンプリングを可能にする。
 - -宇宙風化のない内部を暴露し、リモセンによる宇宙風化の 比較観測を可能にする.
 - -クレーター内部の観測から浅層構造に関する知見を得る.
- 宇宙衝突実験による「衝突の科学」: 1999JU3を利用した物理 素過程の研究
 - -1999JU3上でのクレーター形成過程を明らかにする

クレーター形成過程:微小重力の影響





クレーター形成過程:微小重力の影響



クレーター形成過程:微小重力の影響



クレーター形成過程:微小重力の影響



DCAM3により撮影される予測画像



optimistic case -> sand surface 100m height ejecta curtain

- FOV 74°x74°
- IFOV 0.646mrad
- 2000x2000pixel
- Resolusion 0.646m/pixel @ 1000m
- 10 successive images every 1 sec for 10sec.
- Asteroid
 900m 1400pixel
 albedo 0.07
- Ejecta albedo max 0.07 is assumed Heigh 100m, Width200m (156x312pixel) after 400 sec
- Asteroid image
- Vesta/Dawn
- (dawn-image-072311-700)

27
イジェクタスケーリング則の検証と改訂



イジェクタスケーリング則の検証と改訂



イジェクタスケーリング則の検証と改訂

イジェクタカーテン

- イジェクタ速度分布の改訂
 - イジェクタカーテンの拡大速度
 - <u>重力や強度がクレーター形成過程に及ぼす影響</u>
- Zモデルの検証:掘削過程の標準モデル
 - イジェクタカーテンの角度
 - <u>掘削流の深さ、放出物の総量、表層における衝撃</u>
 <u>波の減衰過程</u>

克服すべき問題

- イジェクタカーテンの解析方法が確立していない
 - 放出位置と粒子速度, 放出角度の関係を求めたい
 - 個々の粒子の運動とカーテン形状の関係を知る必要 がある
 - カーテン形状の時間変化から速度分布と放出角度を 求める解析方法を確立する

地上実験

- 砂やガラスビーズを用いたクレーター形成実験
 - 個々の放出物の速度分布,放出角度,さらにイジェクタカーテン形状に関する系統的な研究を開始
- 今後,速度範囲を広げ,次に標的物質の物性を系統的に変化させていく予定。

石英砂ターゲットにおける クレーターエジェクタの速度分布 に関する実験的研究

辻堂さやか¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 鈴木絢子², 松榮真一¹ 1 神戸大学大学院理学研究科, 2 JAXA

背景

- ・太陽系の多くの天体表面には衝突クレーターが存在
 - ・ 衝突クレーター形成:太陽系の形成、進化において普遍的な現象

・エジェクタ速度分布

- ・天体表層の衝突進化について議論する上で重要
- ・スケール則: クレーターと衝突条件の関係を定量的に理解する鍵
 - クレーター周りのエジェクタ堆積物の分布を定量的に決定 (Housen et al., 1983)
 - 天体から脱出するエジェクタの量を決定
- ・実際の天体への応用
 - エジェクタ質量分布からイトカワのボルダーの個数とサイズを計算 (Michikami et al., 2008)
 - はやぶさ2のSCI実験(1999JU3)へも応用 (今後)

先行研究

Housen and Holsapple, 2011
カップリングパラメータ: C = r_p ρ^v_p v^{\mu}_i
エジェクタ速度のスケール則: $\frac{v_0}{\sqrt{aR}} = k_2 \left(\frac{x_0}{R}\right)^{-\frac{1}{\mu}}$

弾丸半径:r。

弾丸密度: ρ_p 弾丸質量: m_。

初期位置 初速度v。

→ん放出角度

ターゲット密度: ρ.

重力加速度: a

衝突速度: v

先行研究

- Maxwell,1977; Zモデル
 - 放出角度θ; tanθ = Z-2
 - ・粒体に対するクレーター形成における地下の流線をモデリング
 - ・粒子速度の動径方向の成分は、爆破中心からの距離の
 -Z乗という形で表すことができるとした
 - ターゲット内部での物質流は非圧縮であると仮定
 - 流線は互いに干渉しないと仮定
 - Housen et al., 1983

・クレーター形成に関するZモデルと
スケール則
$$\left(\frac{v_0}{\sqrt{gR}} = a \left(\frac{x_0}{R}\right)^{-\frac{1}{\mu}}\right)$$
の関係: Z=1/µ
⇒ $\mu \ge \theta$ の関係: tan θ =1/ μ -2

• Croft (1980)

Generalized Z—Model Geometry Fig. A1. Schematic drawing defining symbols used in derivations in Appendix.

- ・爆破中心が浅く埋められていた場合に対してZモデルを拡張
- 爆破中心の深さが大きいほど、破片の放出角度が大きくなる (Croft, 1980)

目的

クレーター形成時のエジェクタのその場観測から 表層の物性についての情報を取得する

⇒ はやぶさ2のSCI実験; 1999JU3

・<u>重力支配域におけるクレーター形成過程の網羅的研究</u>: エジェクタ速度分布のスケール則を再構築

・エジェクタ速度分布の...

弾丸密度依存性 (1.1~11g/cm³)

 ^भ丸: Nylon, Glass, Al₂O₃, Ti, ZrO₂, Fe, Cu, Pb (1.1~11g/cm³)

 ^{*} 衝突速度:~200m/s (Tsujido et al. in prep.)

 ^{*} 弾丸の潜り込み効果

 ^{*} 衝突速度を1.5~6.9km/sの間で変化させて衝突クレーター形成実験を行う

 ^{*} 過去の~200m/sで行った実験結果(Tsujido et al. in prep.)と比較する

実験方法(低速度域)

実験条件

装置: 縦型一段式軽ガス銃(@神戸大学)

- 衝突速度: ~ 200 m/s
- 真空度:~1000 Pa
- 標的: 500µm 石英砂
- **弾丸密度: 1.1 11.3 g/cm³** (球形, φ= 3mm)
- 観察
 - NAC高速度ビデオカメラ
 - 撮影速度: 2000 fps

弾丸物質	Pb	Cu	Fe	ZrO ₂	Ti	Al_2O_3	Glass	Nylon
密度 (g/cm ³)	11.3	8.9	7.9	5.7	4.5	3.6	2.6	1.1

実験方法 (高速度域)

実験条件 装置: *縦型二段式軽ガス銃 @宇宙研*

- *衝突速度: <u>1.6 ~ 6.9 km/s</u>*
- 真空度: ~7.0 Pa
- 標的: 500 µ m 石英砂
- 弾丸:ポリカーボネイト球 (*ρ*=1.2 g/cm³,Φ=4.7mm)
- 観察
 - CASIO 高速度ビデオカメラ
 撮影速度: 600fps(上から)
 - ② NAC 高速度ビデオカメラ
 - 撮影速度: 2000 fps
 HPVX 高速度ビデオカメラ
 - ・ 撮影速度: 20000fps
 ④ HPV1 高速度ビデオカメラ
 - 撮影速度: 125000fps

<u>マイラー膜と風よけ</u>によって 加速ガスがエジェクタカーテンに 与える影響を除いた → 遅い粒子の観察も可能

真空チャンバー内

- ▶ 弾丸
 - ナイロン (1.1 g/cm³)
- ▶ 衝突速度
 - ▶ 208 m/s
- > クレーター形成時間(√R/g)
 - ▶ 0.048 s

- ▶ 弾丸
 - ▶ 鉄 (7.9 g/cm³)
- ▶ 衝突速度
 - ▶ 188 m/s
- クレーター形成時間 (√R/g)
 0.060 s

▶ 衝突速度: 6.9 km/s ▶ 弾丸:ポリカーボネイト

<u>風よけを用いたことで、</u> <u>エジェクタカーテンは加速ガスの影響を受けずに成長</u> → 粒子の計測範囲が広がった

弾丸: 3物質 + ポリカ 衝突速度:~200m/s + >1.5km/s

衝突速度依存性

エジェクタカーテン角度 $p_{\nu-p-\overline{N}\overline{K}\overline{K}\overline{R}}$

μと放出角度θの関係

 $\mu \ \epsilon \theta$ の関係(Zモデルより): tan $\theta = 1/\mu - 2$

- 高速度衝突のポリカーボ ネイト弾丸、低速度衝突 のナイロン弾丸の結果: 理論値と合う
 - 高密度弾丸の結果:
 理論値と合わない

Zモデルの点源に 深さを持たせると μとθはどう 変わってくるか
```
速度分布(Zモデル)
     10<sup>1</sup>
                                                                         Z=3.0
                                                                         \alpha = 5.0 \times 10^{-5}
                                                                         点源の深さd:0~6mm
     10<sup>0</sup>
                                                2 < x_0/r_p < 20
                                                   Cfitting
∑
≥ 10<sup>-1</sup>
                 X
                     0
                     1mm
                 10<sup>-2</sup>
                     2mm
                 \diamond
                     3mm
                 Ο
                                                                       流線の中心が深さ:大
                     4mm
                 +
                                                                         →速度分布の傾き:小
                     5mm
                 Δ
                                                                           \rightarrow \mu: \mathbf{T}
                     6mm
                 ▼
   10^{-3}
         10<sup>0</sup>
                                                     10<sup>1</sup>
                                    x_0/r_p
```

```
放出角度 (Zモデル)
```





~まとめ~

- ●エジェクタ速度分布の...
 - ●弾丸密度依存性(1.1~11g/cm³)
 御空速度依存性(200m/s~6.9km/s)
 - ●衝突速度依存性(200m/s~6.9km/s)
- ●弾丸密度が大きくなる程、µが大きくなる
- ●衝突速度依存性はみられない
- ●速度分布から求めたµとサイズのスケール則から求めたµはほぼ一致
- ●エジェクタカーテン角度はエジェクタ速度分布と放出角度によって決まる
- 低密度のナイロン弾丸、ポリカ弾丸でのμ、放出角度θはZモデルの理論値と一 致、それ以外の高密度弾丸でのμ、θは理論値とは合わない

スケール則~重力支配域~

- ●Zモデルの点源に深さを持たせた場合...
 - 点源が深くなる程、µが大きくなる傾向
 - 点源が深くなる程、θが大きくなる傾向
- Quarter-space 実験
 - ●潜り込みのある実験では、流線の中心が連続的に変化
 - → 単純にZモデルでは表せない
 - ●Zを弾丸毎に変えると実験結果を説明可能