はやぶさ2小型搭載型衝突装置と分離カメラによるサイエンス

荒川政彦[1], 佐伯孝尚[2], 澤田弘崇[2], 門野敏彦[3], 高木靖彦[4], 和田浩二[5], 小川和律[6], 本田理恵[7], 白井慶[2], 石橋高[5], 早川雅彦[2], 坂谷尚哉[2], 平田成[8], 岡本千里[2], 今村裕志[2], 矢野創[2], 小林正規[5], 中澤暁[2], 飯島祐一[2], 早川基[2]

[1]神戸大学, [2]JAXA, [3]産業医科大, [4]愛知東邦学園大, [5]千葉工大, [6]東京大, [7]高知大, [8]会津大

Small Carry-on Impactor Elucidates the Nature of Craters and the Solar System Evolution

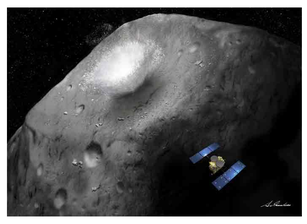
はやぶさ2搭載の小型搭載型衝突装置(Small Carry-on Impactor:SCI)は，探査目標天体であるC型小惑星1999JU3に対して2kgの銅製ライナ(弾丸)を2km/sで衝突させる装置である．この小惑星における世界初の人工衝突によって，天体内部を暴露しそのサンプル回収を目論むとともに，衝突イジェクタや形成されるクレーターそのものを観測することで太陽系進化の鍵である天体衝突現象の理解が進むものと期待される．

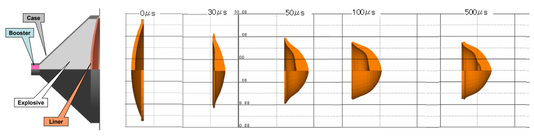
本発表では，神岡で実施された実スケールのSCI衝突試験(実爆試験)とその解析速報を報告するとともに，SCI衝突のその場観測によるサイエンスを達成するための観測装置である分離カメラ(Deployable Camera 3: DCAM3)のデジタル光学系の開発・試験状況を報告する．

SCIサイエンス目標とDCAM3その場観測の貢献

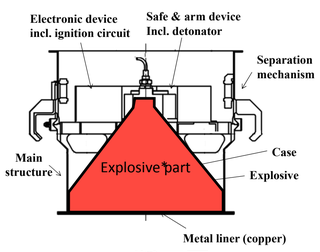
- 弾丸の衝突条件の明確化（SCI爆破位置と衝突地点の同定）
- 標的状態の明確化＆1999JU3の表層構造推定（イジェクタ放出状況の観測）
- イジェクタスケーリング則の検証と改訂
- クレーター径スケーリング則の検証と改訂
- 岩塊衝突だった場合の破片分布，Q*の推定
- 1999JU3に刻まれた衝突痕の読み解き
  - クレーター年代学の構築
  - 衝突を含めた表層更新過程の理解
- 宇宙風化の影響やNEAとなってからの熱変成の影響が少ないと思われる小惑星内部物質の暴露観測と試料分析
- 小惑星物質への衝突の影響（衝撃変成、レゴリス撹拌混合）の解明

DCAM3その場観測

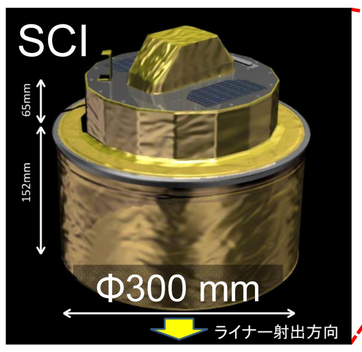


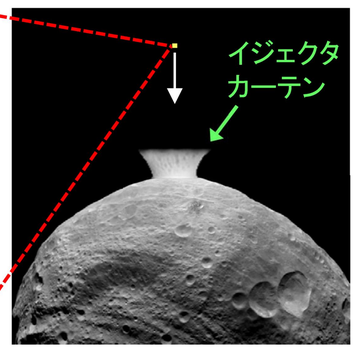


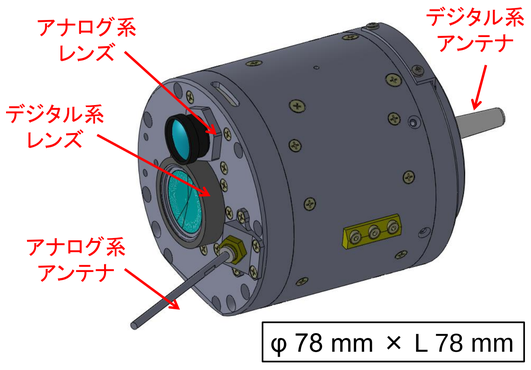
SCIの爆発による銅ライナの飛翔と成形過程のスナップショット（シミュレーション）．直径30cmの円盤状銅ライナ(2kg)が直径約15cmの(半)球殻状弾丸となって2km/sに加速される．

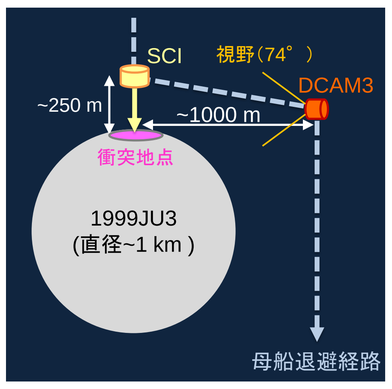


SCI断面図



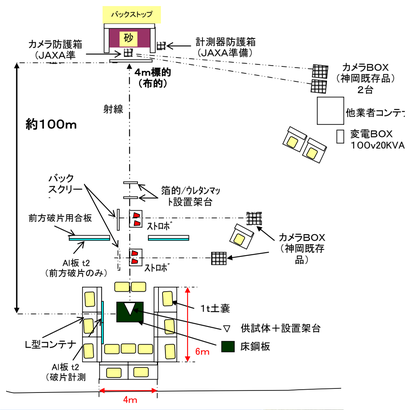




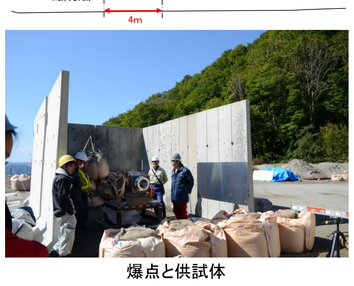


SCI実爆試験＠神岡

約100m離れた斜面へ水平に打ち込む．試験は環境試験実施品含めて5回行い，いずれも高い命中精度(0.4° 以内)で衝突した．このような大規模(とくに大きな弾丸)な衝突実験はクレータ形成過程を理解し，スケーリング則を確立する上で貴重な機会である．

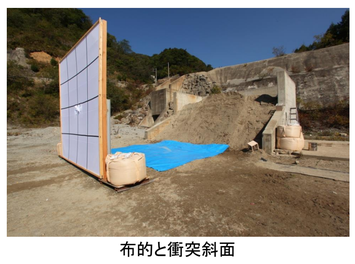


主な観測装置	スペック	設置場所
NAC高速ビデオカメラ（NAC memrecam fx K3）	カラー，3000 fps	斜面から斜め約25m離れたカメラボックスR
赤外線カメラ（FLIR A20）	15 fps	斜面から斜め約25m離れたカメラボックスR
JAXA高速ビデオカメラ (IDT MotionXtra NR-4)	白黒，5000 fps	斜面から斜め約25m離れたカメラボックスG
CASIO 高速カメラ (CASIO EX-F1)	カラー，300 fps	バックストップ外壁上(試験No.1-4), 標的直下(No.5)
Sony ハンディカム (SONY HDR-CX590V)	カラー，30 fps	布的直下(試験No.1,2), 斜面斜め下方(No.3,4), バックストップ外壁上(No.5)
島津高速ビデオカメラ (HyperVision HPV-2A)	125000 fps	爆点より距離5mの位置
加速度計2個 (日本アビオニクス社製 SV1113)	0.5Hz-7kHz 最大10^3G	斜面表層に埋め込み



爆点と供試体

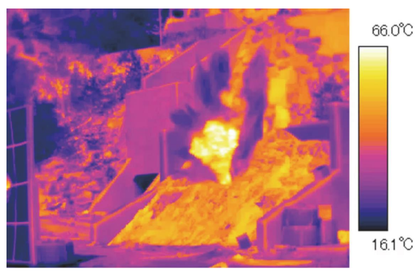
衝突斜面とカメラボックス



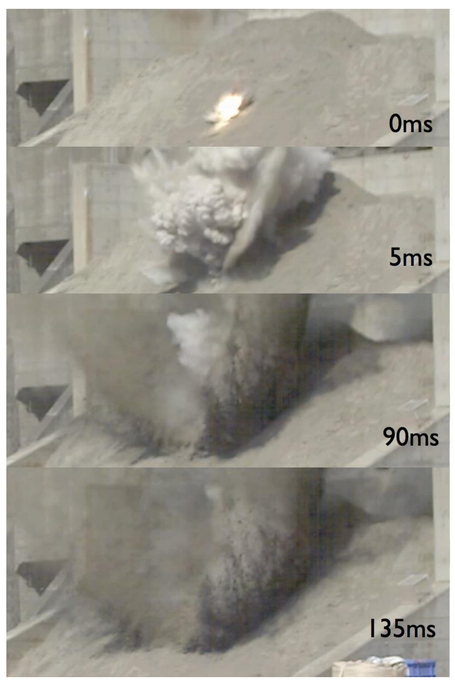
布的と衝突斜面

観測画像例

斜面直下から撮影したイジェクタカーテン

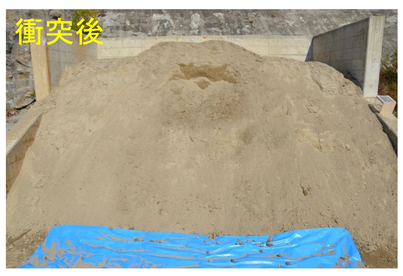


イジェクタの赤外線画像（赤外線カメラ）



イジェクタ放出過程スナップショット（NAC高速カメラ）

クレーター孔の計測



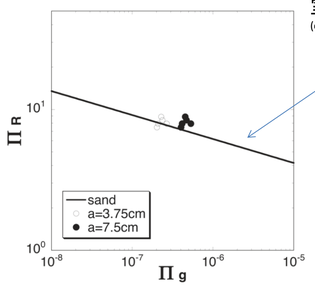
試験番号	衝突速度 a[m/s]	斜面傾斜 b[deg]	ライナ直径 [cm]	クレータサイズ [短軸×長軸m]	クレータ深さc [m]
#1	1640	41	13.0	1.7×2.5	0.2
#2	1620	44	13.3	1.6×2.0	0.17
#3	1570	41	13.2	1.9×2.15	0.3
#4	1550	35	12.4	1.7×1.9	0.25
#5	1670	34	12.7	1.8×1.85	0.23

a) 爆点近傍（5m，20m，30m）の実測値から空気抵抗を考慮して推定した値．

b) 5地点以上をランダムに選んで計測した平均値．斜面は試験ごとに盛り直し成形する．

c) フォールバックするイジェクタやクレータ壁面の崩壊によってクレータ孔が埋められた状態での値．

クレーター径のスケーリング則との比較



室内実験で得られている砂への衝突におけるπスケーリング
(e.g., Housen & Holsapple 2011, Icarus, 211, 856-875)

$$\Pi_R = 0.59\Pi_g^{-0.17}$$

$$\Pi_R \equiv R\left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3}, \quad \Pi_g \equiv \frac{ga}{U^2}$$

R : クレーター半径(短半径を採用)
ρ : 標的密度(~1500 kg/m³)
m : 弾丸質量(~2 kg)
a : 弾丸半径
U : 衝突速度（標的垂直成分）
g : 重力加速度（標的垂直成分）

弾丸半径を球殻の半径(~7.5cm)としてプロットするより，2kgの銅球相当とした弾丸半径(~3.75cm)を用いてプロットするほうが従来のスケーリング則と調和的な結果が得られた．実際のSCI衝突の解析をどのように行うのか，今後の検討課題である．

謝辞：日本工機株式会社および日油株式会社のみなさまには，実爆試験におけるサイエンス計測を行う上で様々なサポートをしていただきました．感謝いたします．

DCAM3-D光学性能検証試験

DCAM3-D分離カメラ部の構成

DCAM3-A（アナログ系）
- 「イカロス」での実績あり（DCAM1, 2）

＋

DCAM3-D（デジタル系）
- 新規開発
- サイエンス観測に必須

2013年6月から11月にかけてDCAM3-D の光学性能検証試験を行った

DCAM3-D光学系に必要な条件

- SCIと小惑星の衝突の両方を捉えるための大きな視野角（74°）
- 画像上のSCIの位置に不定性があるため全領域（<74°）で高い結像・集光性能
- 暗いSCIやイジェクタをS/N>5で捉えるための明るい光学系（F<1.7）
- 上記条件をアクティブな温度制御なしで達成する
- 宇宙機であるため耐放射線性
- 限られたリソース（重量 <30 g, 光軸長 <40 mm）に納める

これらの非常に厳しい条件をクリアしなければならない

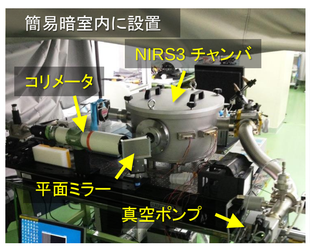
項目	要求仕様	設計値
観測波長域	450-750 nm	450-750 nm
視野角	□74×74 deg（性能保証は○74 deg）	□74×74 deg
IFOV（瞬間視野角）	0.648 mrad 程度	0.612 mrad/pix（視野中心部） 0.675mrad/pix（視野端部）
F値	<1.7	1.7
集光系開口	<Φ30 mm	Φ21 mm
光軸長	<40 mm	40 mm
Ensquared Energy	2×2 pixel に >65%	2×2 pixel に >79%（25℃）
周辺光量比	○74degで>70% 対角視野端で>50%	>76% >55%
歪曲	6%以下（ただしF値を優先する）	−1.5〜4.7%
重量	<30 g	26 g（レンズ＋鏡筒）

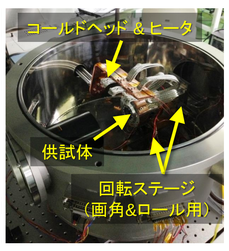
(1)コリメータ試験

目的：①光学系とCMOSセンサの焦点合わせ　②光学系の性能評価

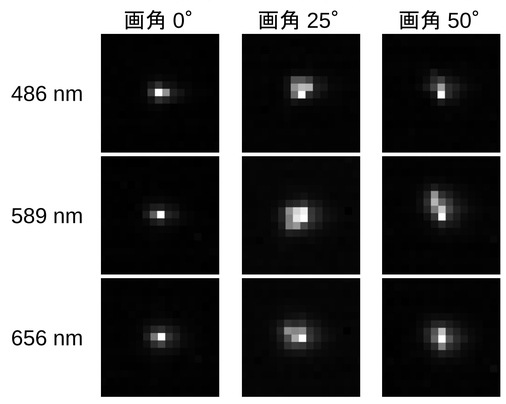
#	項目	内容	規格
(1)	シム調整	焦点合わせ。光学系-センサ基板間に最適な厚みのシムを挟む。	-
(2)	Ensquared Energy	集光性能評価。ピンホール像を撮像し、中心の2×2画素に入るエネルギーの割合で評価。	>65%（画角37度以内）
(3)	角度分解能	供試体回転角度と中心からの画素数の関係から1画素あたりの角度を求める。	0.684±0.5 mrad
(4)	歪曲	供試体回転角度とピンホール像のセンサ中心からの距離の関係で評価。	6%以下

- 圧力(torr)：　<1
- 温度(℃)：　−25, −10, +5, +25, +45（赤文字がノミナル範囲）
- 波長(nm)：　486, 589, 656
- 画角(deg)：　0, 12.5, 25, 37.5, 50



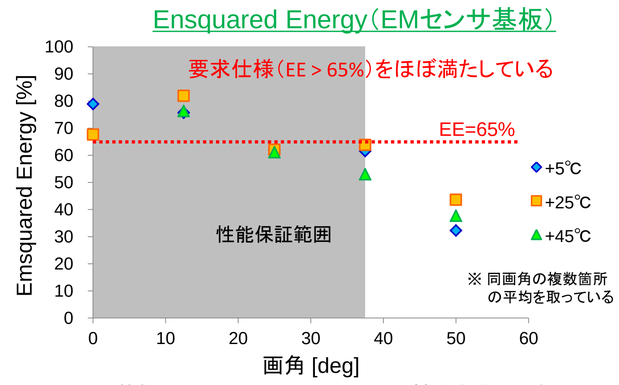


取得ピンホール像の例（25℃、対角軸1上、EMセンサ基板）



CMOS センサ上のピンホール像サイズは1画素以下
→ ぼやけは光学系の性能による

Ensquared Energy（EMセンサ基板）



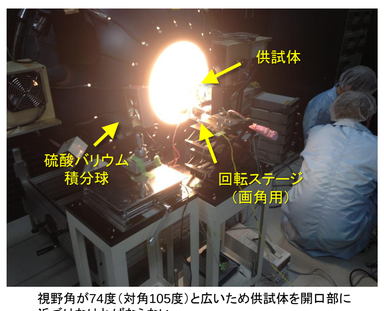
FMセンサ基板ではセンサのティルト（傾き）補正も行う予定（1月中）

(2)積分球試験

目的：①CMOSセンサの性能評価　②光学系の性能評価　③迷光測定

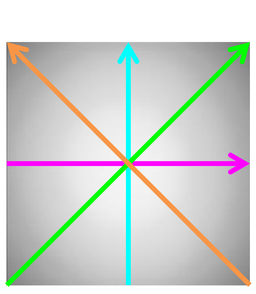
#	項目	内容
(1)	フルウェル	CMOS センサのフルウェルの e⁻ 数を求める。
(2)	リニアリティー	入力光量に対する出力の線形性を調べる。
(3)	感度特性	光学系＋センサ の感度特性を調べる。
(4)	フラット特性	周辺光量比を調べる。
(5)	感度むら	局所的なむらを調べる。
(6)	迷光	迷光がバックグラウンドに与える影響を調べる。

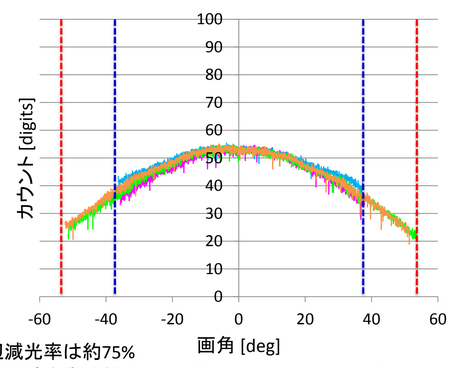
- 温度(℃)：　室温
- 波長(nm)：　450-750（450-550, 550-650, 650-750）
- カメラ角度：　0 deg（通常測定時），60 deg（迷光測定時）



視野角が74度（対角105度）と広いため供試体を開口部に近づけなければならない

フラット特性（周辺光量比）





- 画角端（〜37°）での周辺減光率は約75%
- 最大画角端（〜52°）で周辺減光率は約47%

要求仕様を満たしている

迷光測定

迷光による若干のむらが見られる

ただし迷光量（1pixあたり）は鏡筒総入射光量の7000-10000分の1以下

観測に影響なし

This document is provided by JAXA.