

## エジェクタ（二次デブリ）に関する国際標準規格案 CD11227 の紹介

○赤星保浩（九工大），松本晴久（JAXA），北澤幸人（IHI）

国際標準化機構(ISO)において、「Space systems - Test procedures to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact」と題した規格案が検討されている。当初の規格案では宇宙機器表面に微小宇宙ごみまたはメテオロイドが超高速衝突した際に反対方向に放出される破片（実際の宇宙空間では新たな宇宙ごみとなる可能性があるもの）の大きさ分布ならびに速度分布を実験結果として記録するというものであった。その後、ISO 総会、秋の WG などの議論を通じ、本規格案は合意し得る内容に一部修正がなされてきている。本講演では現在の規格案の状況と日本ならびに他国での対応状況について紹介する。

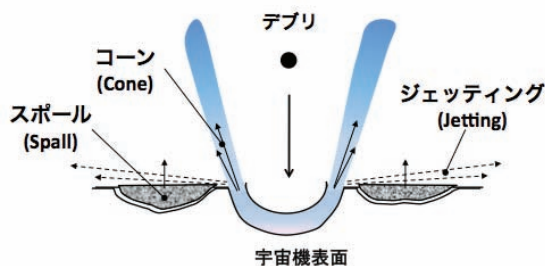


図 エジェクタ発生の概略図

第3回スペースガード研究会 & 第4回スペースデブリワークショップ 2010/12/16-17

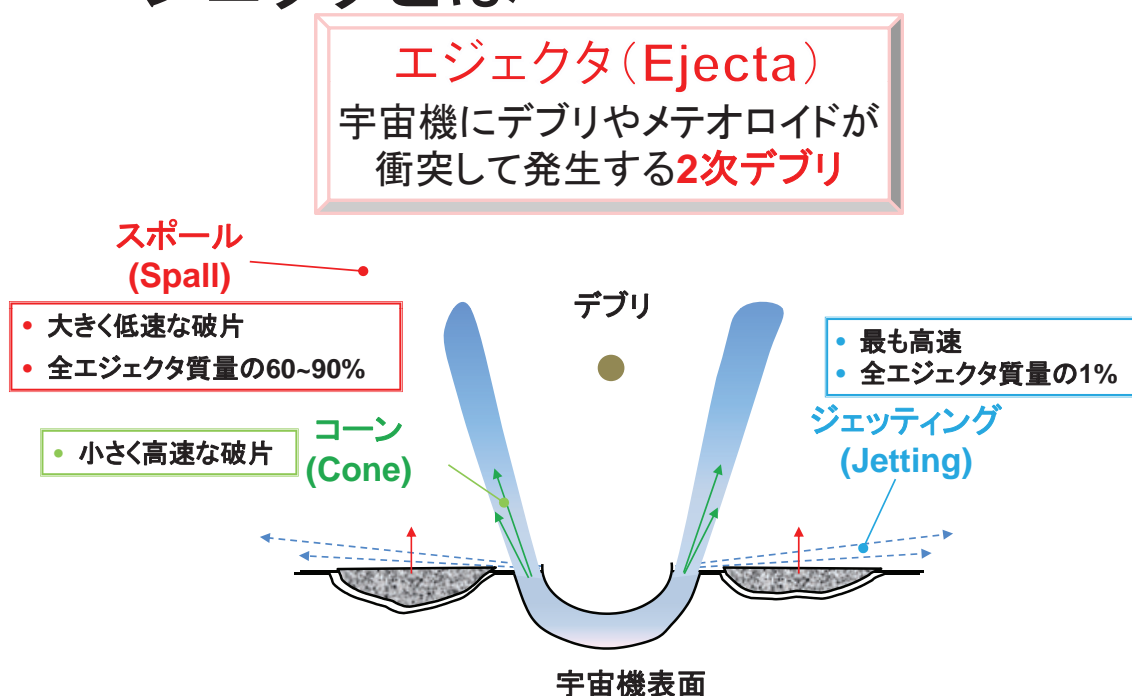
## エジェクタ（二次デブリ）に関する 国際標準規格案CD11227の紹介

○赤星保浩（九工大），松本晴久（JAXA），  
北澤幸人（IHI）

## 謝辞

- 本研究の一部は宇宙航空研究開発機構との共同研究として実施したものであり、同時に科学研究基盤研究(C)(No.21560819)の支援のもと実施したことを記し、謝意を表します。
- 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃の使用に当り、長谷川氏他にお世話になりました。
- 国内外のISO TC20/SC14 の関係者より多くの助言/支援等をいただいております、ここに、関係者の皆様に謝意を表します。

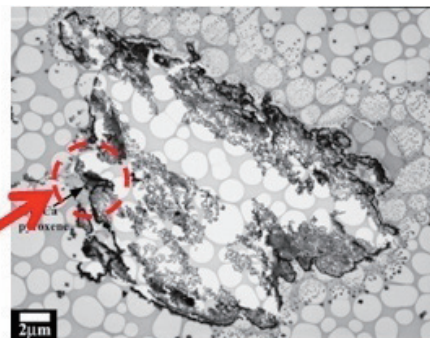
## エジェクタとは



# エジェクタ

JAXAがISSのロシアモジュールを利用した微粒子捕獲(MPAC)実験で捕獲された粒子の一つが**エジェクタ**

Meteoroid particle



捕獲物の切片のTEM画像

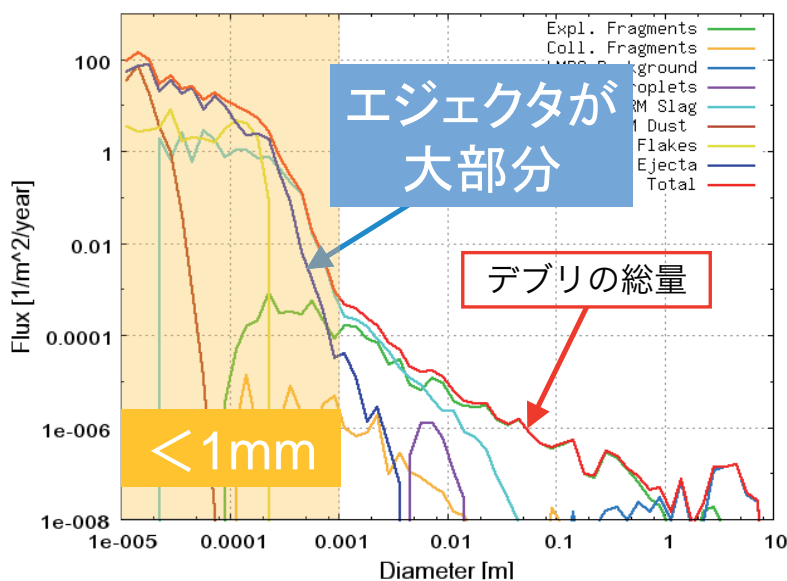
## 捕獲物の特徴

- ◆ 酸化銀と硫化銀の混合物
- ◆ 数十～数百 nmの微粒子の集合体
- ◆ 直径 1 μm程度の石質粒子を含んでいる

銀を含むペイント材の可能性

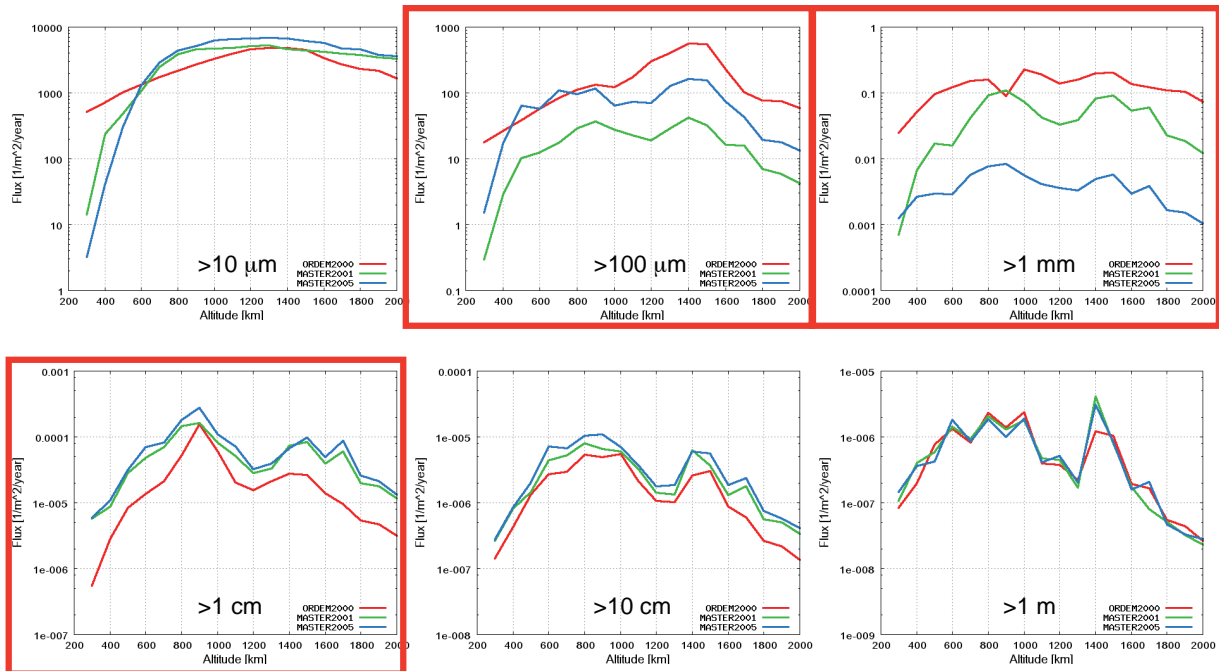
メテオロイドと宇宙機外表面に衝突して発生した**二次デブリ**と推定

# デブリの発生原因



MASTER2005によるデブリ発生要因

# デブリ環境モデルの差異

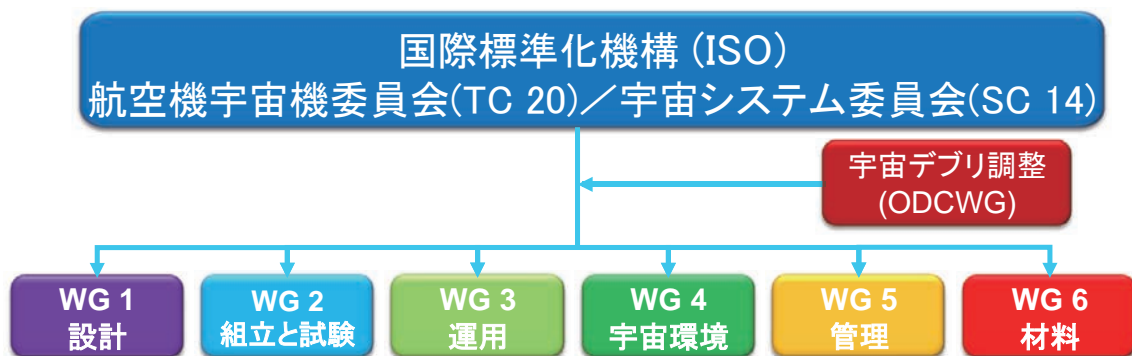


九州工業大学

6

計算力学研究室

## 国際標準化機構



九州工業大学

7

計算力学研究室

# 国際標準のプロセス



Reference number of working document: ISO/TC 20/SC 14 N **731**

Date: 2010-05-04

Reference number of document: ISO/CDV 11227

Committee identification: ISO/TC 20/SC 14/WG 6

Secretariat: ANSI/AIAA

## Space systems – Test procedures to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact

*Systèmes Spatiaux — Procédure d'essais pour évaluer l'éjection de matériaux lors d'un impact hypervitesse sur un satellite.*

## Dr.Mandevilleのエジェクタ関係文献

- [1] Rival M., J.C. Mandeville, Modelling of ejecta produced upon hypervelocity impacts, Space debris 1 (1999) p. 45-57.
- [2] Bariteau M., J.C. Mandeville, F. Schäfer, Ejecta production mechanism on painted surfaces, ESA SP- 473 (2001), p. 249-251.
- [3] Bariteau M., Prolifération des débris orbitaux: production et évolution des particules secondaires, Thèse ENSAE, Toulouse, (2001).
- [4] Mandeville J.C., M. Bariteau, Contribution of secondary ejecta to the debris population, Adv. Space Res. 34 (2004), p. 944-950.

## 国際標準化機構



# 国際標準化機構(ISO)での議論

超高速衝突による宇宙機材のエジェクタ評価に対する試験方法： ISO TC20/SC14/WG6/CDV 11227 が IS化に向けて議論されている。

PL : Dr.Mandeville (France)

co-PL : Dr.Kitazawa (Japan)

CD投票期限：2011年1月19日

## CD11227の概要

“Test procedures to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact”

- 宇宙機や打上げ気の外表面物質に、超高速のプロジェクティルが衝突した際に生じるエジェクタの量を評価するために必要な試験方法の定義
- 実験の手順は以下のように定義
  - 1) 使用する設備の種類;
  - 2) プロジェクティルの種類, 大きさ, 速度
  - 3) 衝突で噴出されたエジェクタの評価
  - 4) 試験結果の報告
  - 5) 品質要求
- エジェクタの総質量, および破片のサイズ分布/速度分布を評価
- 宇宙機がその軌道寿命中に放出するejactaの量を算出することにより, スペースデブリの発生を軽減するための表面塗装と材料の選択に貢献



Table 1. Test results (xxx : values to be filled in after the tests)

total amount of ejecta (mg) : $M_e$		Xxx	target mass before impact (mg)	Xxx	target mass after impact (mg)	Xxx
Size ( see text/Annex for details, average max/min size) and velocity distributions			< 0.010 mm	0.01 to 0.1 mm	0.1 to 1 mm	>1 mm
front side	number of particles		Xxx	Xxx	xxx	xxx
	Velocity (optional)		Xxx	Xxx	xxx	xxx
rear side	number of particles		Xxx	Xxx	xxx	xxx
	Velocity (optional)		Xxx	Xxx	xxx	xxx
projectile		mass xx				

## 九工大での研究紹介

### 規格案 CDC11227

- 試験方法の装置依存性確認のためのエジェクタ評価の**較正実験**
- 宇宙機に実際使用されている材質を用いた**エジェクタ評価実験**

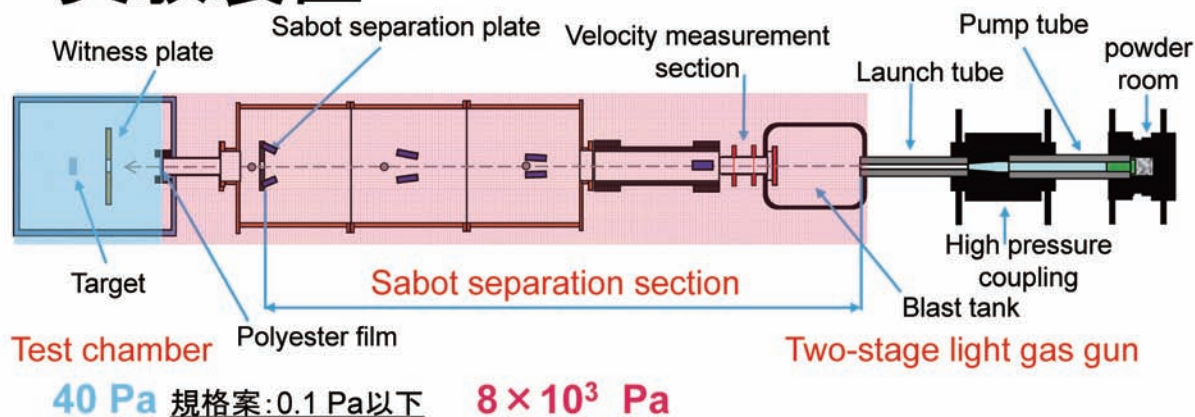
- ◆ 規格案の問題点の抽出
- ◆ 国際標準化への提案
- ◆ エジェクタモデルとの比較

ウィットネス  
プレートの推奨条件

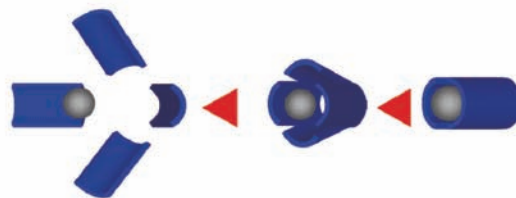
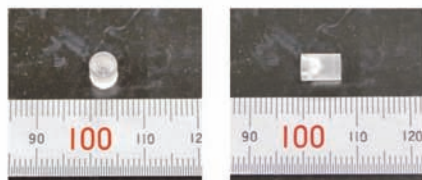
エジェクタ質量



## 実験装置



### Sabot

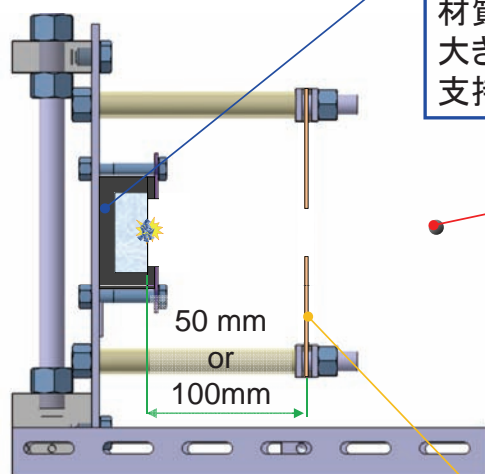


九州工業大学

16

計算力学研究室

## 実験条件



**ターゲット** 規格案: 熔融石英ガラス, 端で固定

材質 : 合成熔融石英ガラス  
 大きさ : 高さ50 mm × 幅 50 mm × 厚さ20 mm  
 支持 : ゴムスポンジで被覆

**飛翔体** 規格案: Al 6061, 5 km/sec

材質 : アルミニウム (Al 1050)  
 形状 : 球  
 大きさ : 直径1 mm  
 質量 : 1.4 mg  
 衝突速度 : 4 km/sec

**ウィットネスプレート** 規格案: 銅または延性材料

材質 : 銅(JIS H3100 C1100-1/4H, C1100P-O)  
 大きさ : 高さ180 mm × 幅150 mm × 厚さ2 mm  
 中心穴直径 : 30 mm  
 表面処理 : 機械研磨, 化学研磨, 研磨無し

九州工業大学

17

計算力学研究室

# C1100

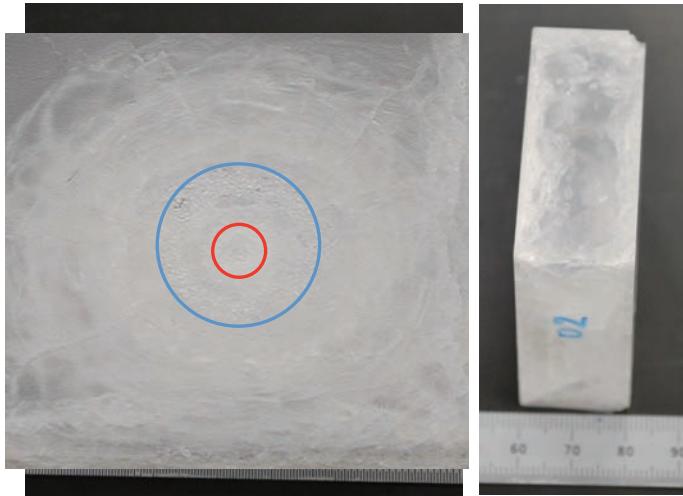
- ◎ JIS H3100(銅及び銅合金の板並びに条)に記載
- ◎ C1100(タフピッチ銅)
  - ◆ 化学成分Cu 99.90%以上
  - ◆ 導電性・熱伝導性に優れ、展延性・絞り加工性・耐食性・耐候性が良い。電気用、蒸気がま、建築用、化学工業用、ガasket、器物など。

記号	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	ビッカース硬さ [HV]
C1100P-O	195以上	—
C1100P-1/4H	215~275	55~100

## C1100の質別(硬さ)

質別	加工度
O	400℃以上, 30分以上で完全 焼きなまし状態
1/4H	1/2Hの半分の強度
1/2H	加工率40%でH材の半分の強度
H	80-90%の加工を受けた高い強度

## Experimental results ~ 09-039 ~



Silica target after test

**Impact crater diameter: 3.14 mm**

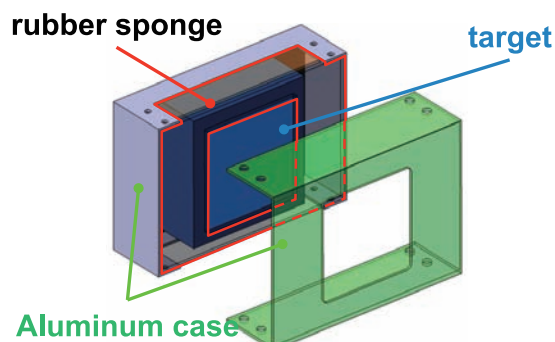
**Spall diameter: 13.52 mm**

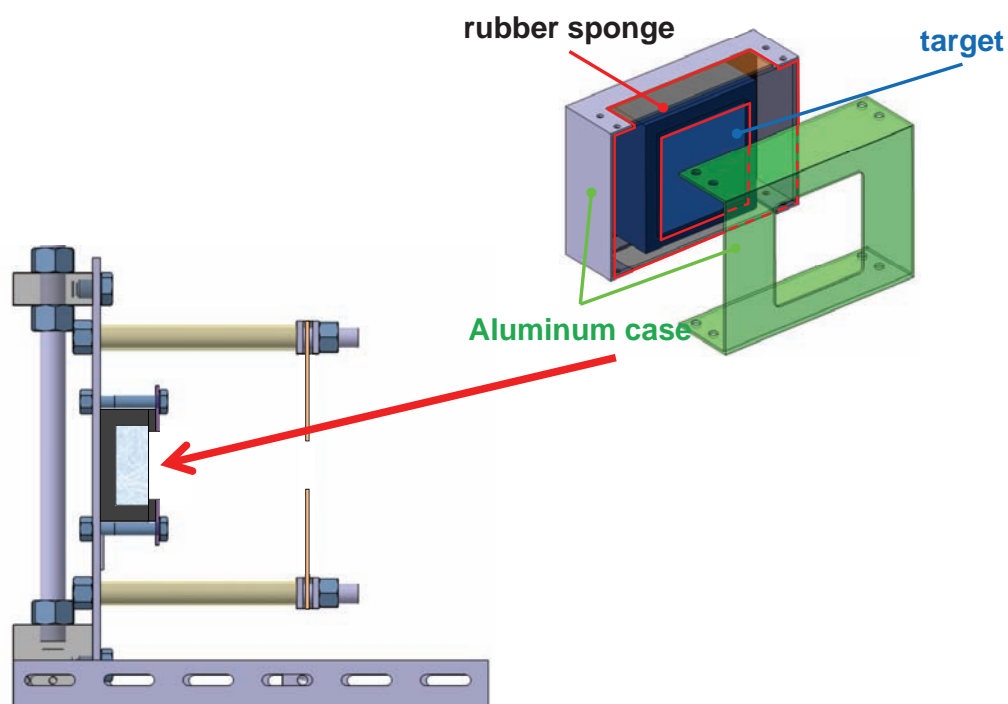
九州工業大学

計算力学研究室

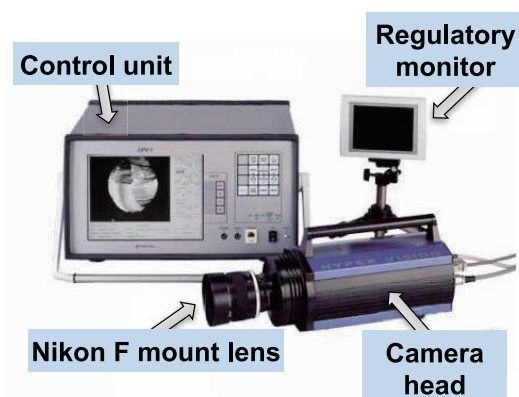
## Measurement of ejected mass

By containing edge fragments in aluminum case after the hypervelocity impact test, we can measure only ejected mass (measure mass difference between pre- and post-mass with aluminum case).



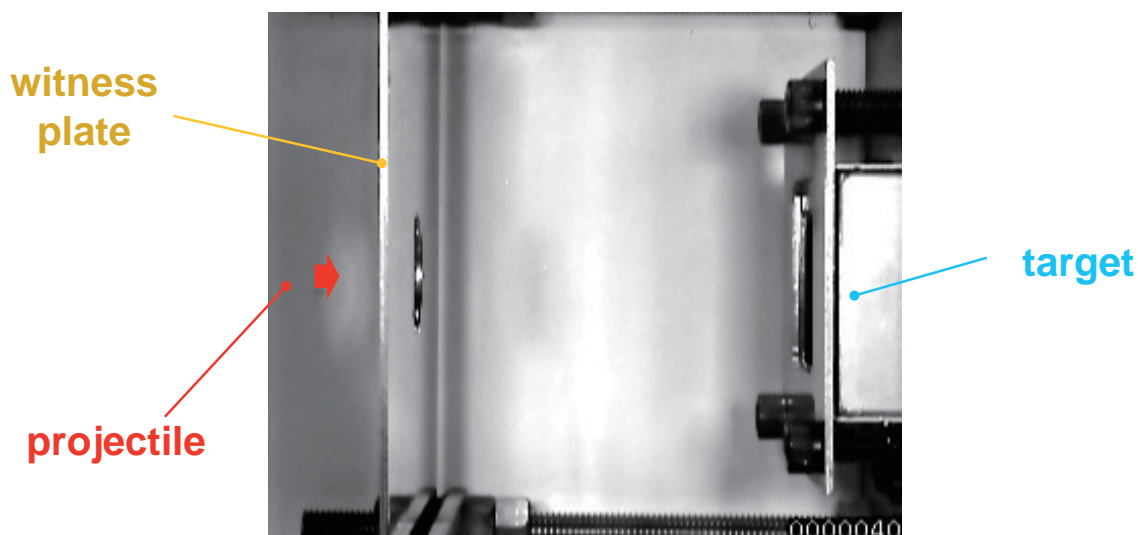


## High-speed Camera



<b>Product name (Company)</b>	High-speed camera (SHIMADZU)
<b>Model number</b>	HPV-1
<b>Recording method</b>	IS-CCDC image sensor
<b>Resolution [pixel]</b>	312 (horizontal) x 260 (vertical)
<b>Frame storage [frame]</b>	100
<b>Lens mount</b>	Nikon F mount
<b>Color, Gradations</b>	Monochrome, 10 bits
<b>Recording speed [fps]</b>	30 to 1,000,000
<b>Exposure time</b>	1/2, 1/4, 1/8, or OFF(3/4) of recording intervals
<b>External trigger input</b>	TTL (positive/negative)
<b>Recording format</b>	10-bit dedicated format, BMP, AVI, JPEG

## 高速度カメラによる撮影 09-101

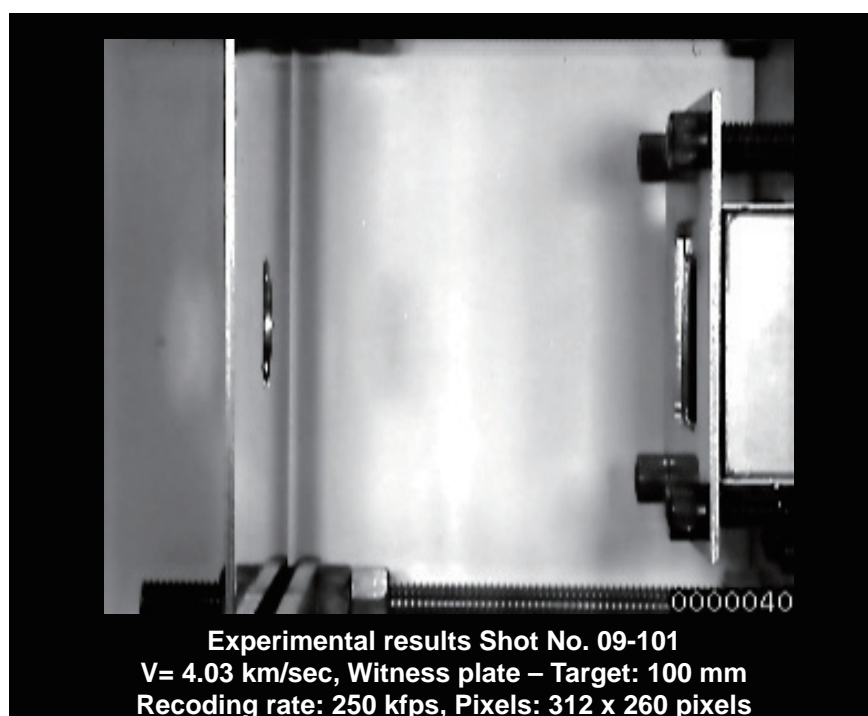


九州工業大学

24

計算力学研究室

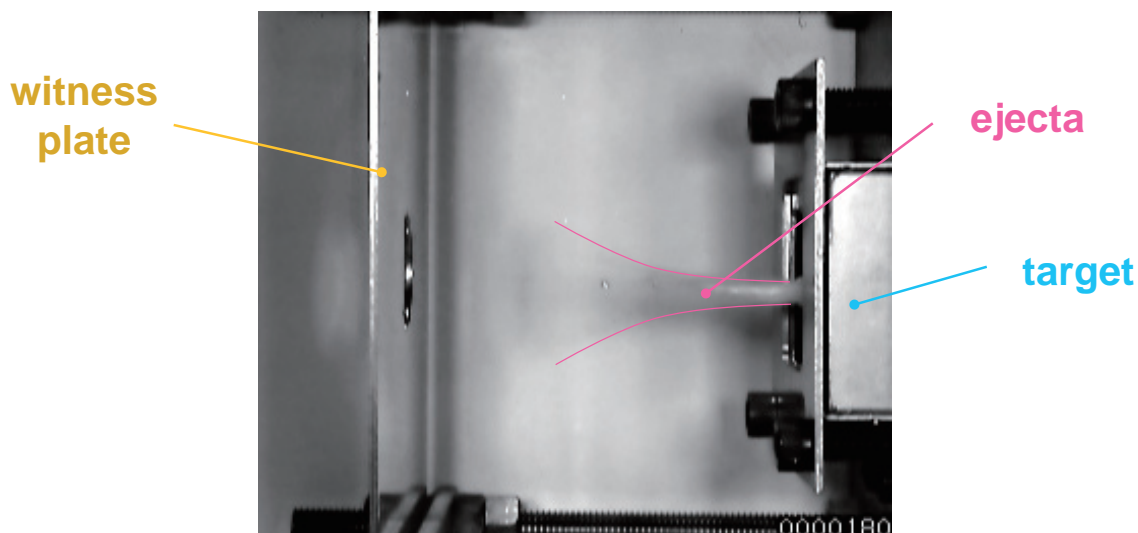
## 高速度カメラによる撮影 09-101



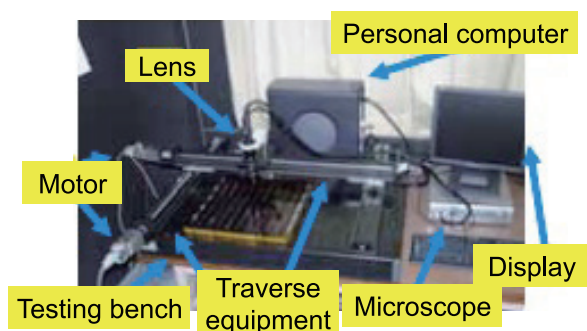
九州工業大学

計算力学研究室

## 高速度カメラによる撮影 09-101



## Microscope system

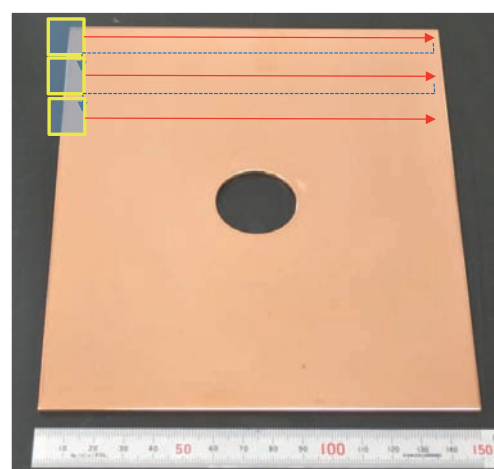


### Microscope system

(ref.: Delu Qu, Teppei Okumura, Mengu Cho, "Development of Arc induced Surface Degradation Evaluation System of Solar Array by an optical Microscope", ISTS 2004-s-08)

### Microscope specification

Magnification	Image size [pixel]	Size per pixel [ $\mu\text{m}$ ]
35 ~ 245	640 x 480	14 ~ 2



### Scanning direction

→ scan    - - - - - feed



## 光学顕微鏡による撮影時間

倍率	撮影間隔	撮影枚数	撮影時間
60	3mm	3,111	40分
125	1mm	27,332	6時間
200	0.5mm	約108,000	24時間

九州工業大学

計算力学研究室

## 実験結果

Test number	Alloy and temper	Surface treatment	Distance between T and WP [mm]	Impact velocity [km/sec]	Ejecta mass [mg]	Zenith angles of ejection [deg]
09-036	C1100P-1/4H	Buffing	100	4.86	—	—
09-039				4.95	—	36
09-101		Chemical polishing		4.03	88.5	33
09-102		Buffing	50	3.92	80.4	46
09-117			100	3.71	70.2	35
09-119	C1100P-O			4.14	84.9	33
09-120	C1100P-1/4H	Nothing		4.17	83.2	36

No.09-101と09-102は高速度カメラの撮影を行った

九州工業大学

29

計算力学研究室



## 九工大における実験結果

Test number	Crater diameter [mm]	Spall diameter [mm]	Cone diameter [mm]	Zenith angles of ejection [deg]
09-036	2.60	12.83	—	—
09-039	3.14	13.52	145	36
09-101	4.16	8.33	130	33
09-102	3.71	9.09	105	46
09-117	3.69	8.52	140	35
09-119	4.27	9.90	130	33
09-120	4.47	10.93	145	36

九州工業大学

計算力学研究室

## 九工大における実験結果

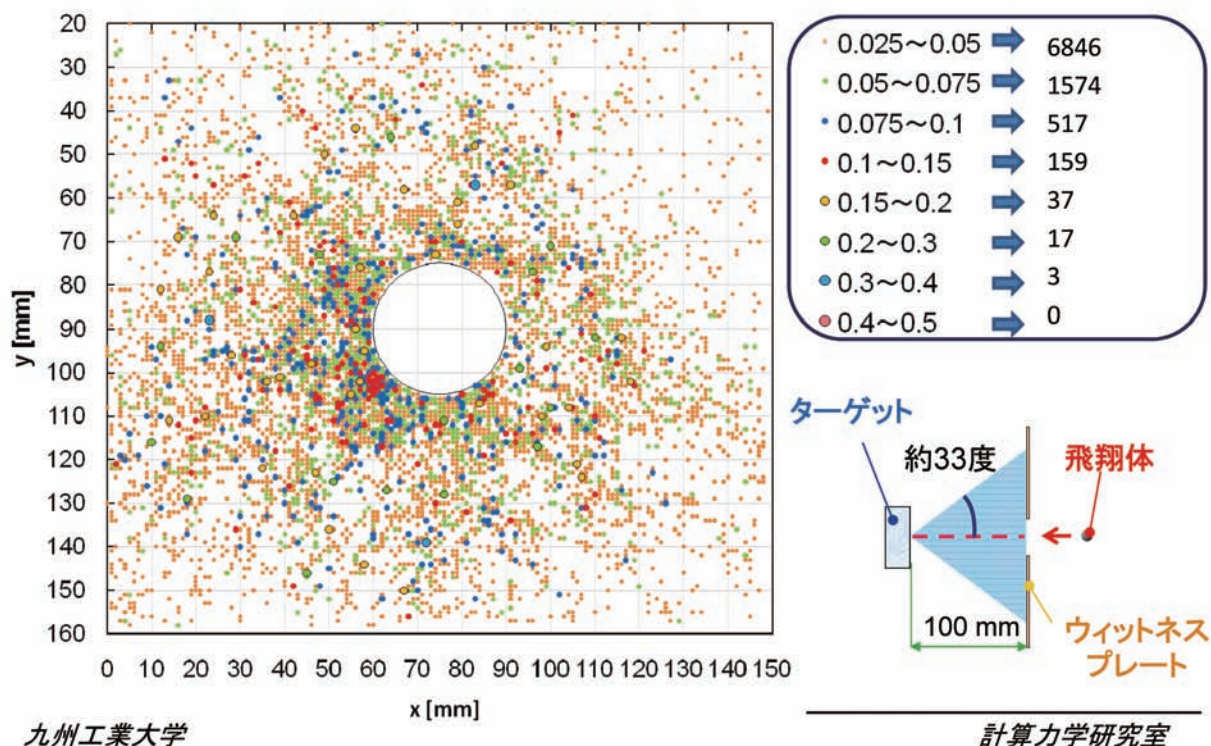
Test number	Projectile material	Alloy and temper	Surface treatment	Distance between T and WP [mm]	Impact velocity [km/sec]	Ejecta mass [mg]
09-036	Al 1050	C1100P -1/4H	Buffing	100	4.86	—
09-039					4.95	—
09-101			Chemical polishing		4.03	88.5
09-102		C1100P -O	Buffing	50	3.92	80.4
09-117				100	3.71	70.2
09-119			C1100P -O		4.14	84.9
09-120		C1100P -1/4H	Nothing	4.17	83.2	

アルミケースを導入

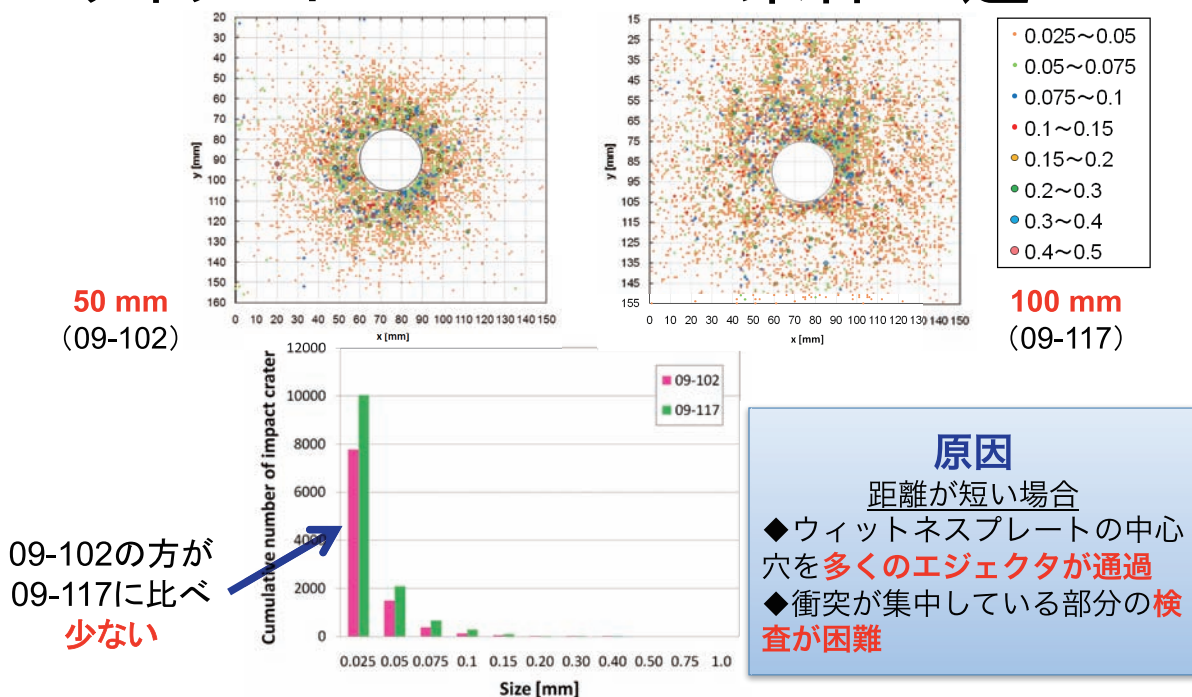
九州工業大学

計算力学研究室

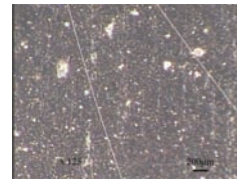
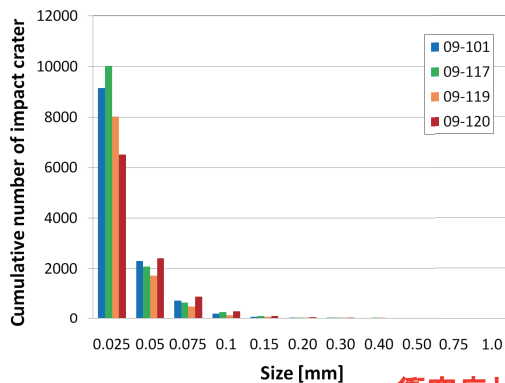
## 09-101



## ウィットネスプレートの条件の違い



## ウィットネスプレートの条件の違い



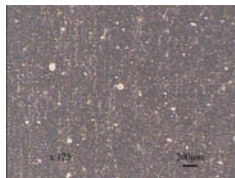
C1100P-1/4H, 機械研磨  
(09-117)

顕微鏡での撮影の際、  
ピントがずれる

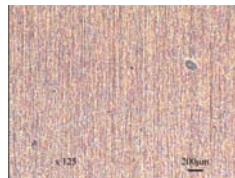
大きな違いは無い

衝突痕と表面の傷との  
判別が困難

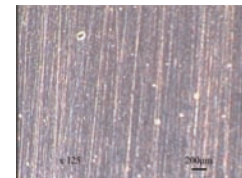
板の変形がある



C1100P-1/4H, 化学研磨  
(09-101)



C1100P-1/4H, 研磨無し  
(09-120)



C1100P-O, 機械研磨  
(09-119)

九州工業大学

34

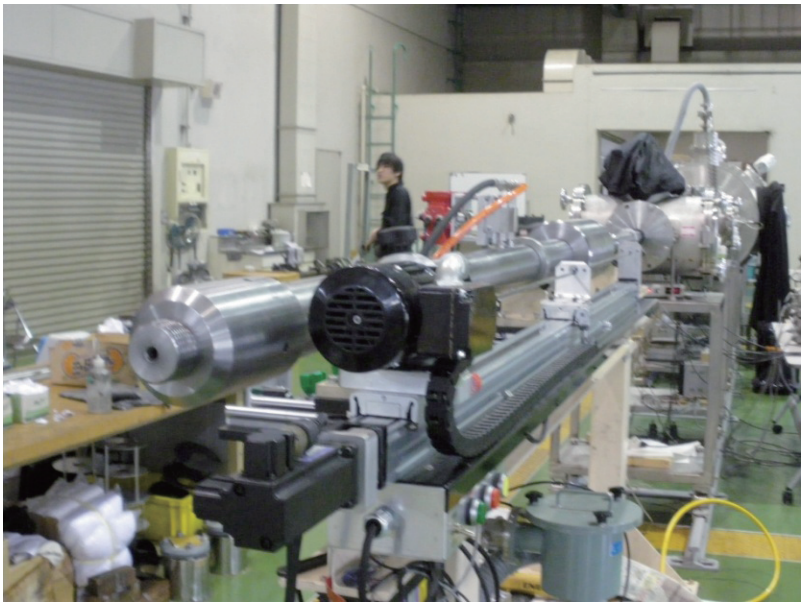
計算力学研究室

## ISASの二段式軽ガス銃を用いた実験

目的：JAXA施設で実施可能であることを  
確認する。九工大での実験結果と  
の差を評価する。

実施日：2010年4月12日

実験回数：2回



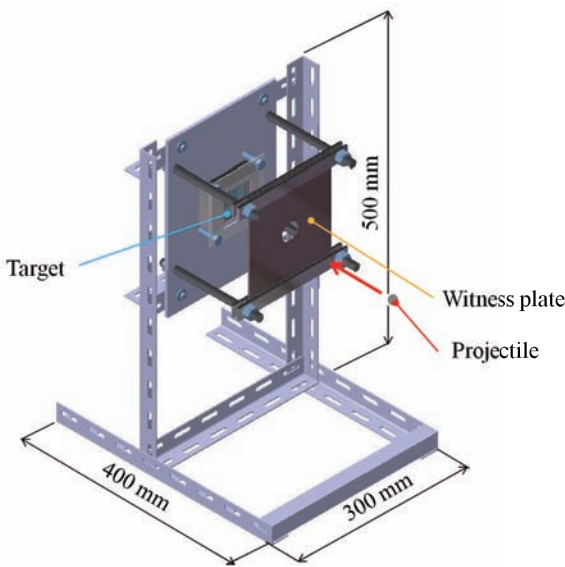
Two-stage light gas gun  
of ISAS (JAXA)

九州工業大学

36

計算力学研究室

# Experimental condition



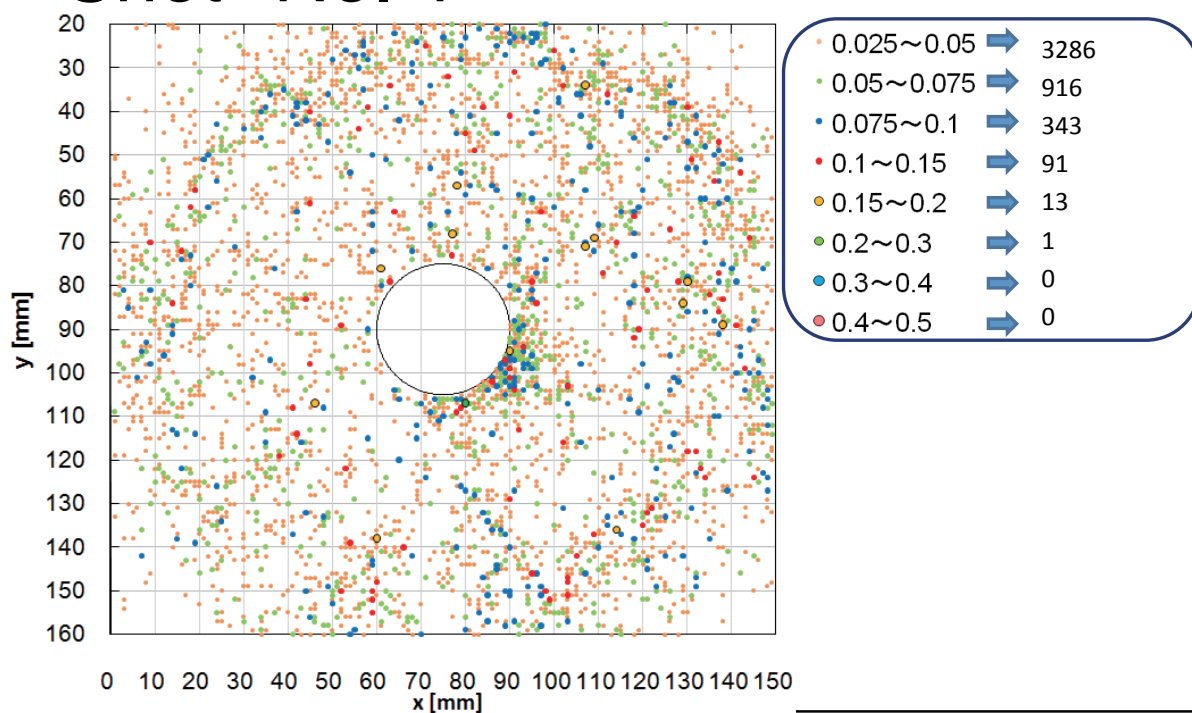
	ISAS	KIT
Projectile	Al 2017	Al 1050
Target	Same	Same
Witness plate	Same	Same
Impact velocity [km/sec]	5	4
Vacuum [Pa]	10	40

九州工業大学

計算力学研究室

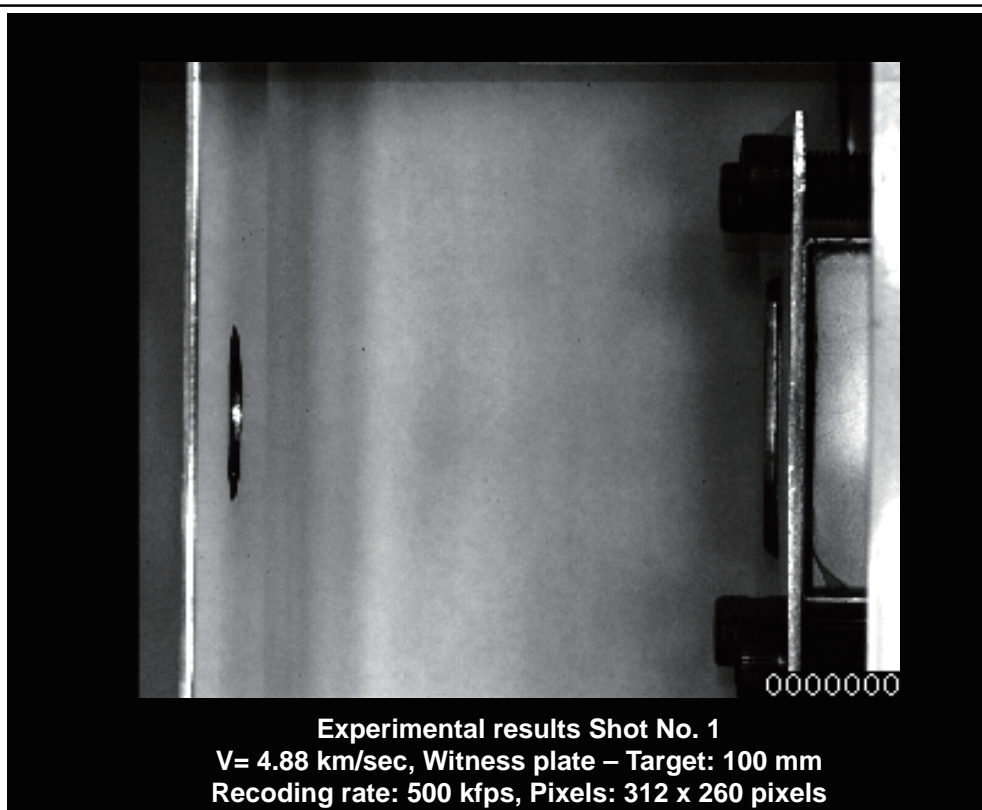


# Shot No. 1



九州工業大学

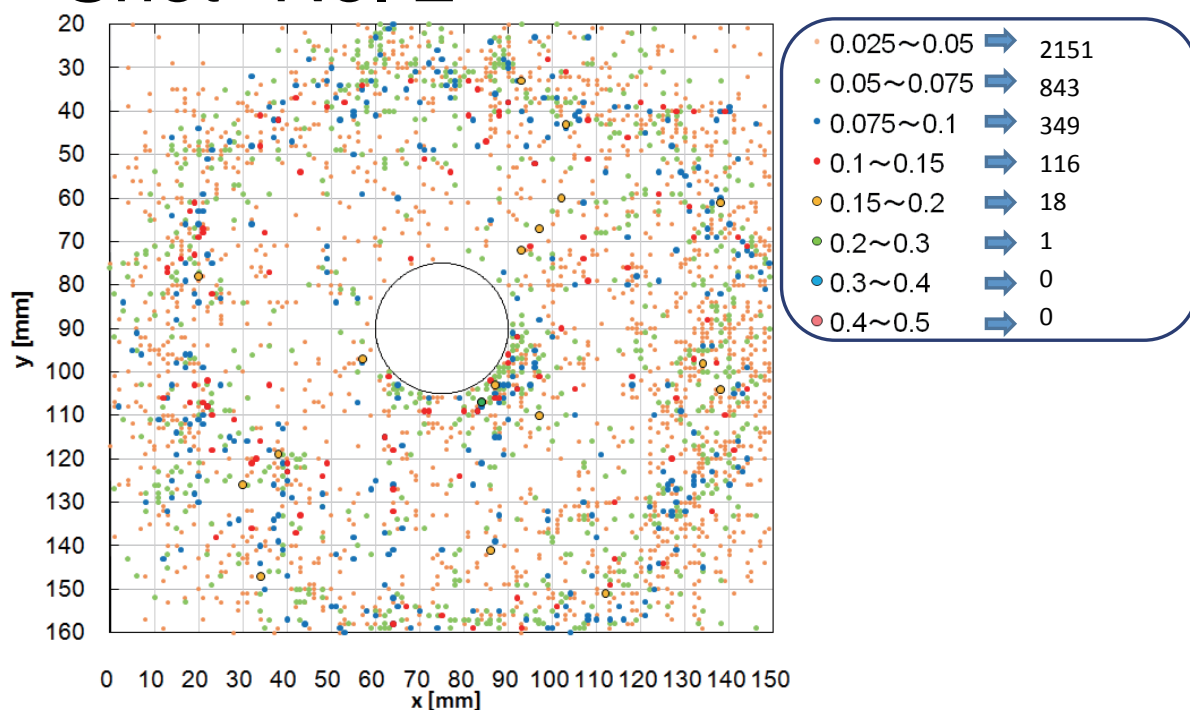
計算力学研究室



九州工業大学

計算力学研究室

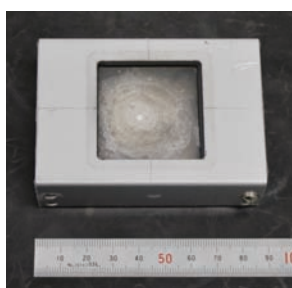
## Shot No. 2



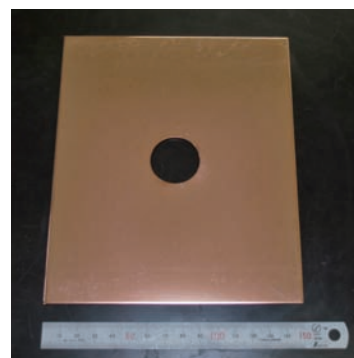
九州工業大学

計算力学研究室

## Experiment results



Target after experiment  
(Shot. No. 1)



Witness plate after experiment  
(Shot. No. 1)

Test number	Impact velocity [km/sec]	Ejecta mass [mg]	Fixing of target
Shot No. 1	4.88	161	Supported by rubber sponge with rectangular hole
Shot No. 2	5.18	151	Supported by rubber sponge

九州工業大学

計算力学研究室

# Experiment results

Test number	Projectile material	Alloy and temper	Surface treatment	Distance between T and WP [mm]	Impact velocity [km/sec]	Ejecta mass [mg]
Shot No. 1	Al 2017	C1100P-1 /4H	Buffing	100	4.88	161
Shot No. 2					5.18	151

Test number	Crater diameter [mm]	Spall diameter [mm]	Cone diameter [mm]	Zenith angles of ejection [deg]
Shot No. 1	2.1	7.9	148	37
Shot No. 2	2.9	8.0	148	37

九州工業大学

計算力学研究室

## CD11227の修正前

Table 1. Test results (xxx : values to be filled in after the tests)

total amount of ejecta (mg) : M <sub>e</sub>		Xxx	target mass before impact (mg)	Xxx	target mass after impact (mg)	Xxx
Size ( see text/Annex for details, average max/min size) and velocity distributions			< 0.010 mm	0.01 to 0.1 mm	0.1 to 1 mm	>1 mm
front side	number of particles	Xxx	Xxx	xxx	xxx	
	Velocity (optional)	Xxx	Xxx	xxx	xxx	
rear side	number of particles	Xxx	Xxx	xxx	xxx	
	Velocity (optional)	Xxx	Xxx	xxx	xxx	
projectile		mass xx				

九州工業大学

43

計算力学研究室



# CD11227の修正後

**Table 1. Fundamental Analysis for Test results** (xxx : values to be filled in after the tests)

total amount of ejecta (mg) : $M_e$		Xxx	target mass before impact (mg)	Xxx	target mass after impact (mg)	Xxx
Size distribution of crater diameter			0.025 mm to 0.05 mm	0.05 to 0.1 mm	0.1 to 1 mm	>1 mm
front side	number of craters		Xxx	Xxx	xxx	xxx
rear side	number of craters		Xxx	Xxx	xxx	xxx
projectile	mass xx					

**Table 2. Detailed Analysis for Test results** (xxx : values to be filled in after the tests)

Size distribution of particle diameter		< 0.010 mm	0.01 to 0.1 mm	0.1 to 1 mm	>1 mm
front side	number of particles	Xxx	Xxx	xxx	xxx
	Velocity (optional)	Xxx	Xxx	xxx	xxx
rear side	number of particles	Xxx	Xxx	xxx	xxx
	Velocity (optional)	Xxx	Xxx	xxx	xxx

# パドバ大学でのエジェクタ 速度計測の試み

Francesconi A., C.Giacomuzo, L. Barilaro, A method to assess the average properties of spacecraft ejecta from hypervelocity impact, Proc. 11 th. Hypervelocity impact Symposium, Freiburg, April 2010.

## おわりに(1／2)

### (1) 実施可能性

- ・CDV11227規格案第5章に規定されている校正実験を九工大とJAXA/ISASで実施し、実施可能であることを確認した。

### (2) 規格案の問題点

- ・高速度カメラによるエジェクタの速度計測は困難である
- ・ターゲットとウィットネスプレートの距離が50mmの場合エジェクタの検出数が減少する。

# おわりに(2／2)

## (3) 今後の予定

- ・ CDV11227規格案第6章に規定されている宇宙用材料に対するエジェクタ実験を実施中である。
- ・ Table 2（オプション）に記載されているエジェクタ破片サイズ分布ならびに速度分布の計測方法を検討する。