

グローバルな問題としての宇宙デブリ： 地球低軌道における実験的観点から

田端 誠



千葉大学 大学院理学研究院
物理学研究部門

新学術領域研究「グローバル関係学」 B03 文明と広域ネットワーク
グローバル・コモンズ研究会

2017年7月12日 於 千葉大学 法政経学部棟

○ 埼玉県生まれ，千葉大学 育ち

○ 専門：素粒子・原子核・宇宙線の実験「物理学」

- 主に，高速荷電粒子（放射線）検出器の開発
- 特に，高速荷電粒子の通過により発光する「シリカエアロゲル」の開発
- 大学院在学時より，宇宙デブリを含む，宇宙塵の非破壊捕集材としての，シリカエアロゲルの開発 も
- 大学院修了後，JAXAにて5年間，2段式軽ガス銃の運用に従事，多くの宇宙デブリ研究をサポート



○ 本講演では，接点はあるものの，必ずしも専門ではない立場から，「スペースデブリ」の概説を試みます

1. 基礎編 —スペースデブリ問題の基礎知識

1.1. スペースデブリとは

1.2. 宇宙航空研究開発機構（JAXA）のスペースデブリ研究

1.3. スペースデブリの除去技術

2. 発展編 —スペースデブリ研究への（私の）取り組みの紹介

2.1. シリカエアロゲルと私

2.2. たんぽぽミッション，宇宙へ

2.3. 地上実験によるスペースデブリ研究

3. まとめ



1. 基礎編

スペースデブリとは

○ 人類の宇宙開発の歴史：60年（最初の人工衛星：1957年）

- 数千回ものロケット打ち上げ
- 数千トンもの衛星やロケット上段が地球周回軌道へ

○ スペースデブリ

- 運用終了・故障した宇宙機（約2,600個）
- 運用上放出された部品（10 cm以上が約2万個）
 - 軌道に到達したロケットの上段から、
船外活動で、宇宙飛行士がうっかり手放した工具まで
- 爆発や衝突により発生した破片（1 cm以上が約50万個）
 - 宇宙機から剥がれた塗料片までも



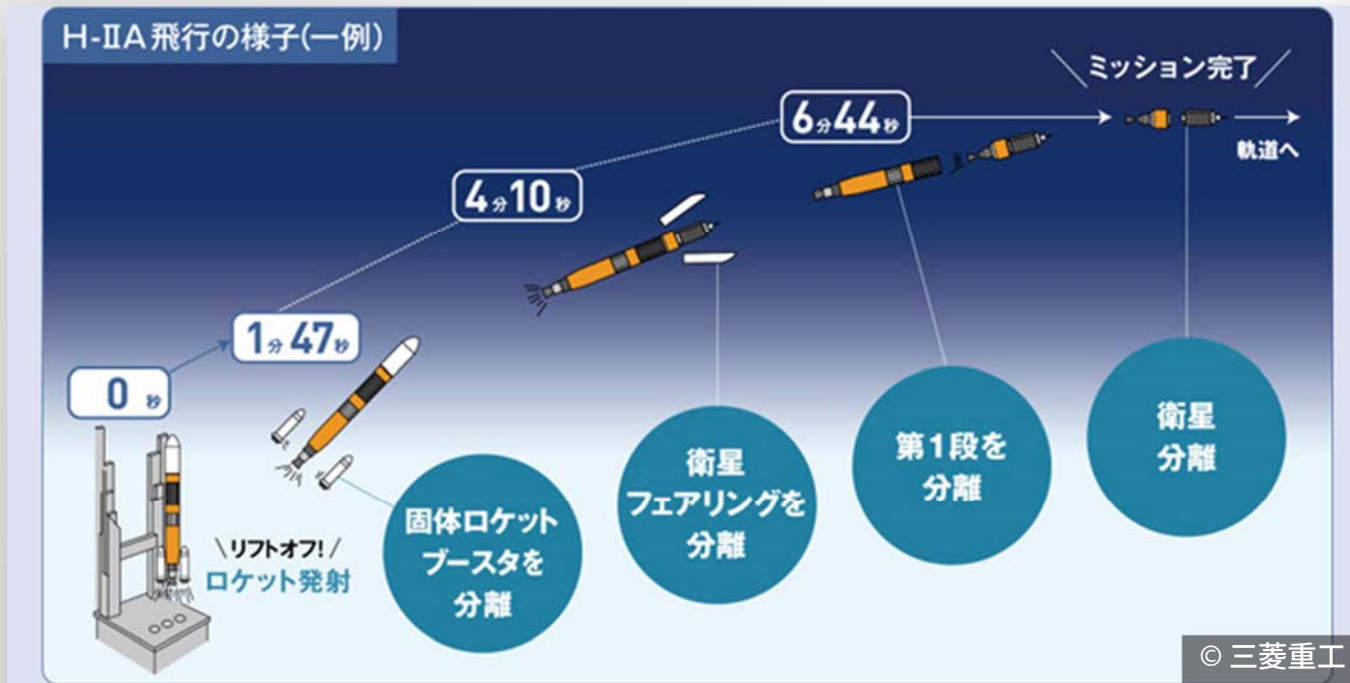
○ 大きさ 数メートルから、数マイクロメートルまで

大型スペースデブリの例

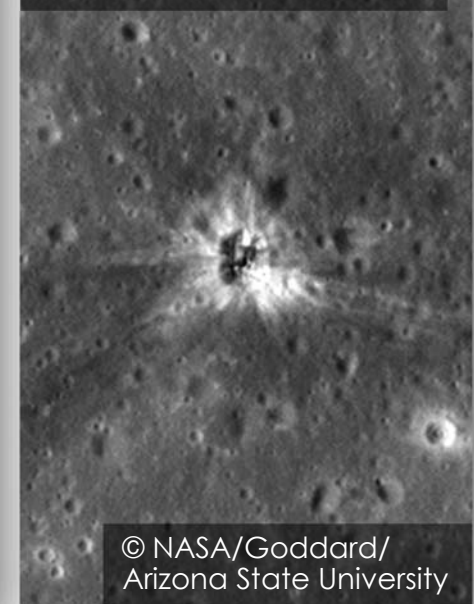
6/38

。 ロケットの上段

- 。 人工衛星と同様に周回軌道に乗ることがある
- 。 さらには：アポロ宇宙船を打ち上げたロケットの月面への（制御）衝突



サターン5型ロケット第3段の月面への衝突痕



宇宙をふわふわ...？

- 宇宙と言えば，無重力。浮いているイメージ？
 - スペースデブリも，宇宙をふわふわ漂っている？
- いいえ，宇宙は「超高速」の世界です
 - 超高速：音速である秒速 340 m を超えるような
- 国際宇宙ステーションは，秒速 8 km ！（高度 400 km）
 - 時速で 3万 km
 - 90分で地球を一周
 - ライフル銃の弾丸：秒速 1 km



○ たとえ微小なデブリでも、衝突すれば破壊を伴う

- ミクロンサイズのデブリでも、超高速度で軌道を巡る—飛んでいる弾丸
- 1 cmのデブリ衝突でも、人工衛星が機能停止しうる
- 国際宇宙ステーションは、退避運動をとることも
- 大気圏再突入した大型デブリは、燃え尽きずに地上に落下することも

○ デブリが増え続けている—ケスラーシンドローム

- 新たな人工衛星の打ち上げや機能停止で、軌道上のデブリは増える一方
- デブリ同士の衝突・飛散で、より小さなデブリが増える

→ 新たに打ち上げる宇宙機にとって脅威

- 宇宙利用の持続的発展への妨げ

Space Debris 1957–2016

9/38

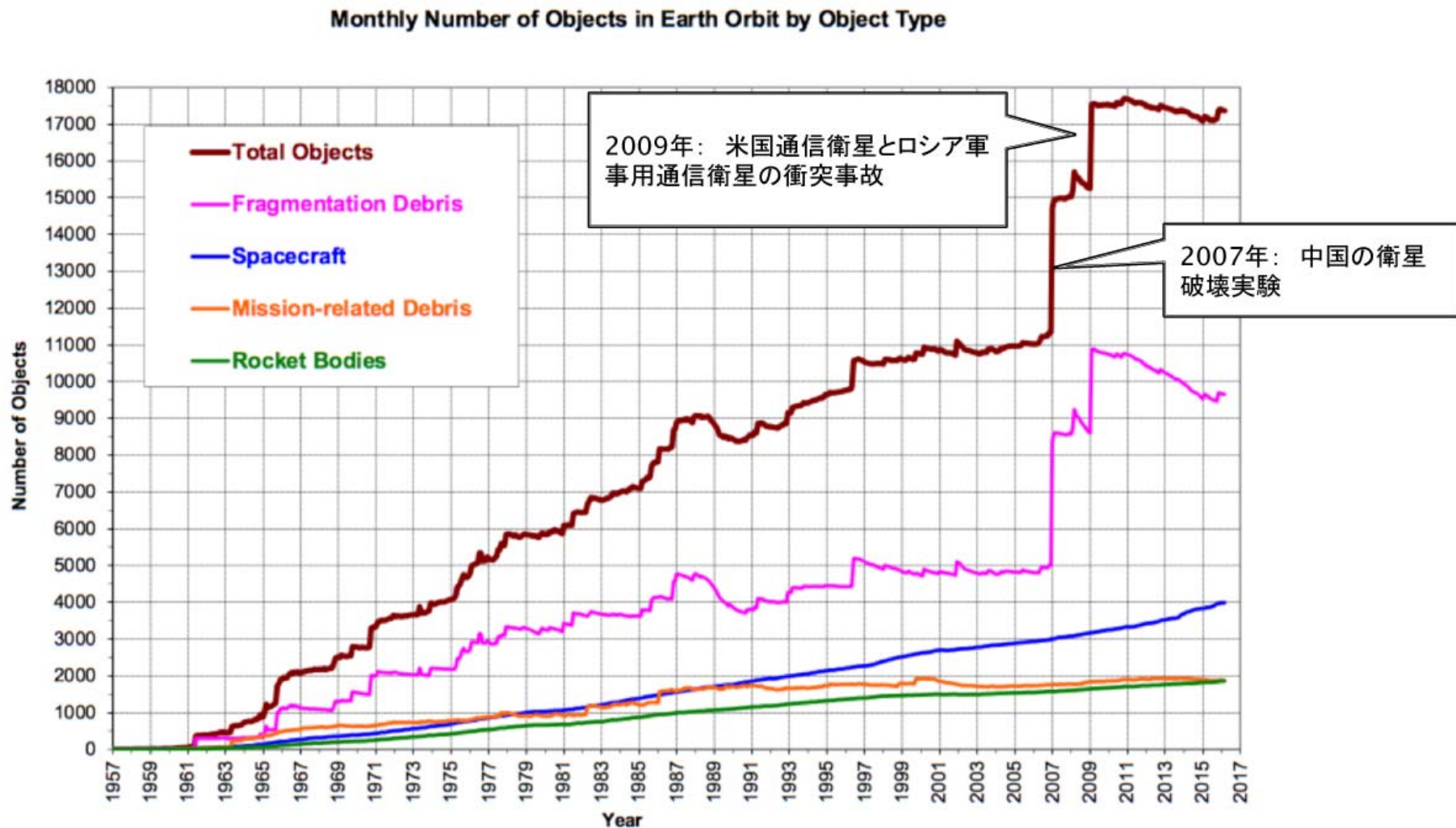
- Movie by Stuart Grey, University College London [UCL]

- <https://www.youtube.com/watch?v=O64KM4GuRPk>



地上で追跡可能なスペースデブリ数の推移

10/38



NASA "USA Space Debris Environment, Operations, and Measurement Updates"



1. 基礎編

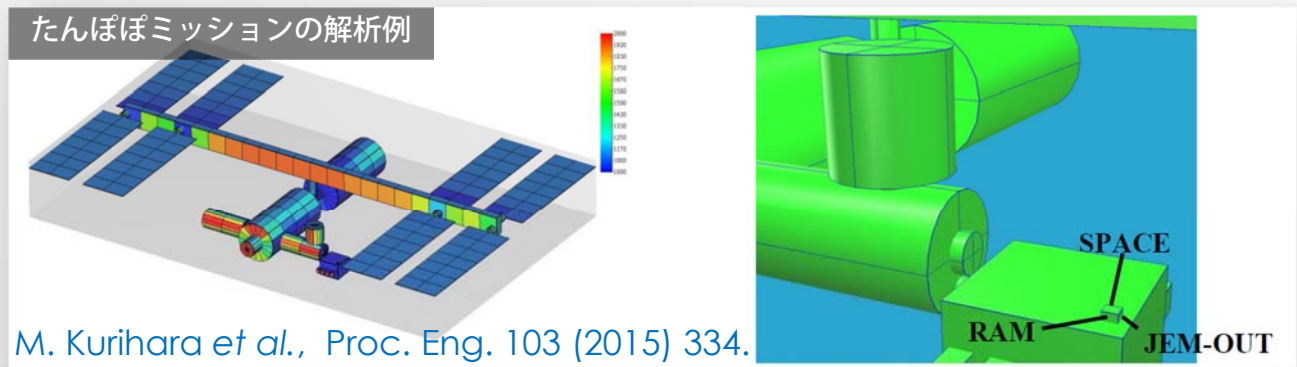
宇宙航空研究開発機構の スペースデブリ研究

1. 人工衛星とデブリの観測

- 10 cm以上のデブリは，光学望遠鏡やレーダーで観測・追跡可能
- デブリの大きさや分布を調査・カタログ化
- より小さなデブリを検出する画像解析技術の研究
- 宇宙機への衝突や地上への落下の予想，将来の故障衛星の回収に役立てる

2. モデル化・解析

- 将来のデブリ分布推移モデルを開発
- 宇宙機へのデブリ衝突損害リスク解析ツールの開発
- デブリ発生防止標準支援ツールの開発



3. 防御

- デブリが人工衛星に超高速衝突した時に起こる現象の解明
- 防御性能を地上で確認・検証するための技術の開発
- 複合材デブリ防御構造に関する研究

4. 発生防止と除去

- 新たなデブリを発生させないための技術開発
- 既存のデブリの除去衛星システムの研究
 - デブリ密集軌道から大型デブリを軌道変換できる高性能作業衛星が必要
年間～10個 × 10年の大型デブリ除去でも，デブリの増殖の抑制に有効

・スペースデブリ対策の研究（研究開発部門）

- http://www.kenkai.jaxa.jp/research_fy27/mitou/mit-debris.html

クリーン・スペースプログラム [意義/価値] 14/38

宇宙活動の安全確保（研究開発部門）

- <http://www.kenkai.jaxa.jp/research/debris/debris.html>
- **日本の国際貢献策として提唱**
 - 「脅威となるデブリの除去」
「デブリを生まないクリーンな衛星，ロケットの実現」を目指す
 - 政府，内外の関係機関との連携検討の推進
 - 実現に向けた技術の研究開発
- 日本の安全保障，社会生活を支えるインフラとして定着した**宇宙資産を保護**するとともに，人類の**宇宙開発活動の長期持続的発展に貢献**
- 世界各国が取り組んでいる宇宙デブリ問題に対し，日本の主導的役割を強めるとともに，**将来の規制環境下**における優位性を得て，日本の宇宙産業に貢献

○ 国際標準・ルール化の検討「国際標準化の戦略的推進」

- 宇宙開発を行う各国機関と協調し，関連する諸研究における最新の技術や知見を積極的に利用しつつ，デブリ削減のための国際的な基準や方針について有効な提案を行う

○ 衛星・ロケットの非デブリ化技術の研究「デブリを生まないJAXA宇宙機」

- 軌道寿命短縮，制御落下技術，ロケット上段機体の複合材化，推進タンクの複合材化を実現し，傷害性のある再突入質量の最小化

○ デブリ除去技術の研究「脅威となるデブリの低コスト除去」

- 自動ランデブ等，日本の技術蓄積を活用し，2020年代を目途に低コストデブリ除去システムの実現

○ デブリ状況把握・防御技術の研究「JAXA宇宙機の被害防止」

- 衝突回避運用における軌道予測精度向上，防護策の効率化，デブリモデルの精度向上等

スペースデブリ問題の解決に向けて

～宇宙の環境を守るために～

デブリと宇宙機の 衝突を防ぐ

JAXA 追跡ネットワーク技術センター
SSA(宇宙状況把握)システムプロジェクトマネージャ

松浦真弓



デブリ問題に 世界で取り組む

外務省
元 総合外交政策局 宇宙室

西田充



民間の力で宇宙を きれいにする

ASTROSCALE PTE. LTD.
CEO

岡田光信



http://www.jaxa.jp/projects/feature/debris/index_j.html

A faint, light gray world map is visible in the background of the slide, showing the continents and major landmasses.

1. 基礎編

スペースデブリの除去技術

大型スペースデブリの除去構想

18/38

- 伝導性テザーによるデブリ除去衛星（動画）

- <https://www.youtube.com/watch?v=3EvCRR3BWKI>



報道発表資料

http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150421_2/

2015年4月21日

理化学研究所

エコール・ポリテクニーク

原子核研究所宇宙物理センター/パリ第7大学

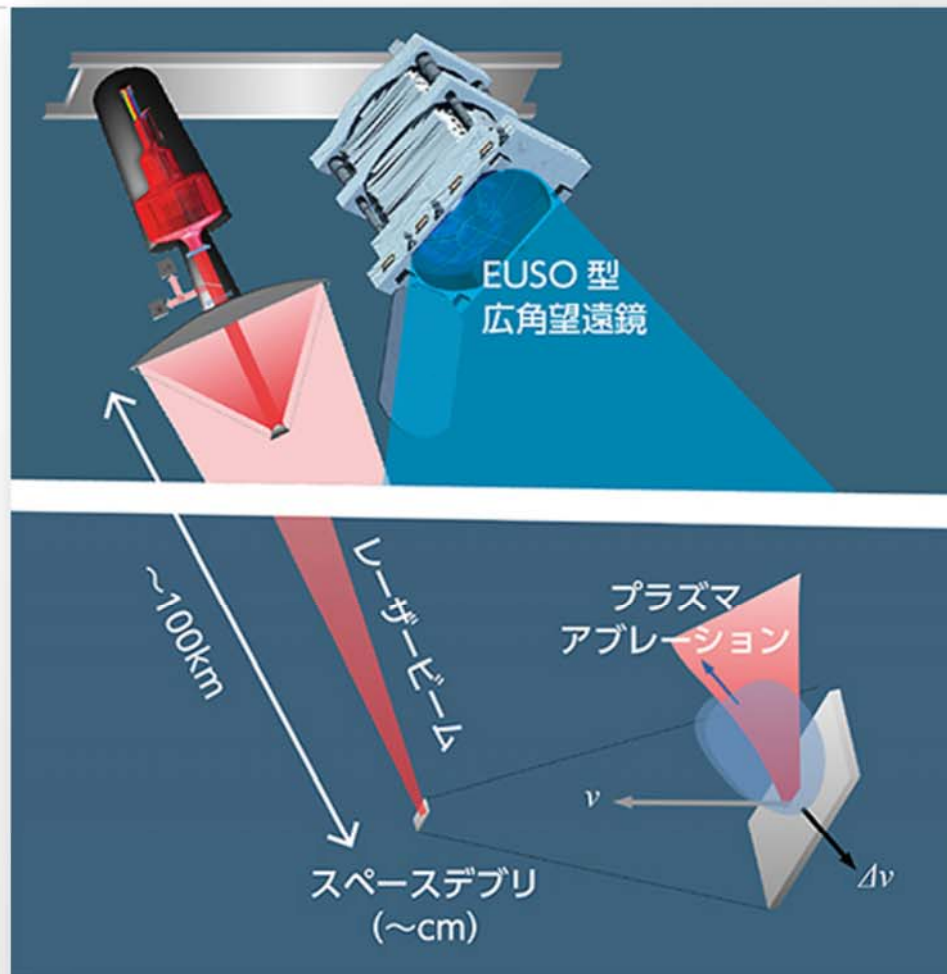
トリノ大学

カリフォルニア大学アーバイン校

高強度レーザーによるスペースデブリ除去技術

－きれいで安全な宇宙を次世代に－

- EUSO型**広角望遠鏡**で、センチメートルサイズのスペースデブリを捕捉
 - 国際宇宙ステーション搭載を目指している、宇宙線観測用の大気蛍光望遠鏡を応用
- **レーザー照射**でスペースデブリを周回軌道から落下させる



A faint, light gray world map is visible in the background, centered on the Atlantic Ocean. The continents are outlined in a darker shade of gray.

2. 発展編

シリカエアロゲルと私

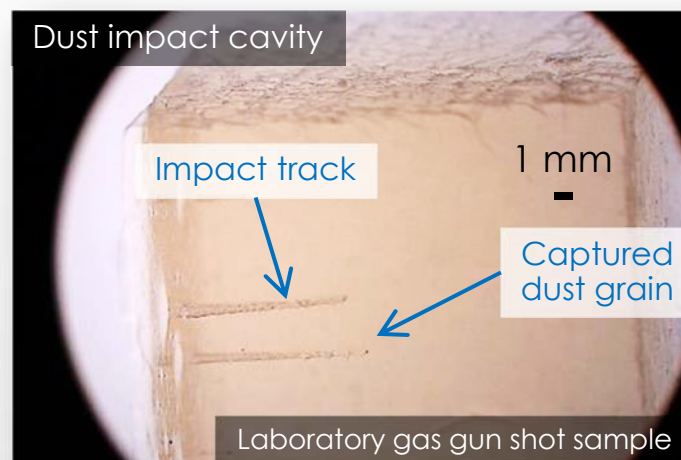
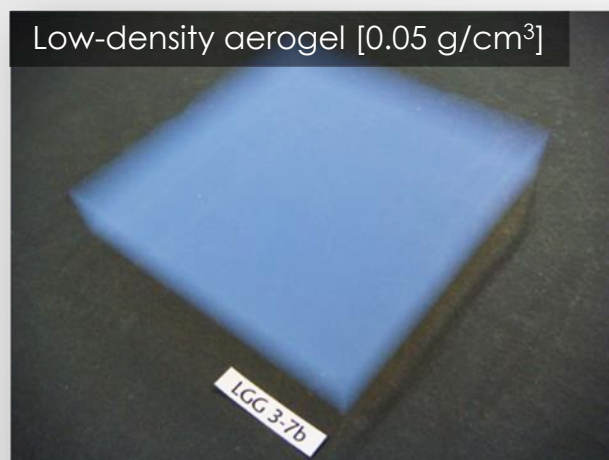
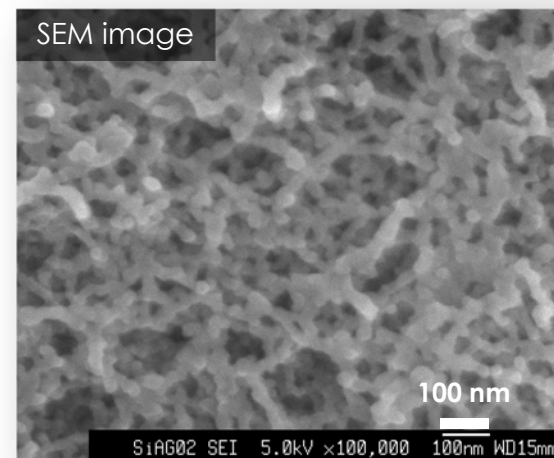
o Silica aerogel:

Colloidal foam of nanoscale SiO_2 particles

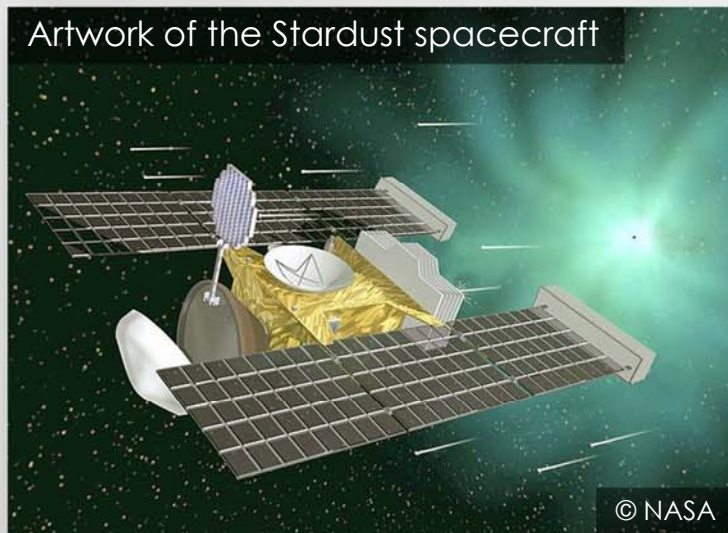
- o **Transparent**
- o **Tunable bulk density** [0.01–1.0 g/cm³]
Determined by the silica–air volume ratio
[M. Tabata et al., Nucl. Instrum. Methods A 623 \(2010\) 339.](#)
- o Feasible surface modification → **Hydrophobic**

Promising medium to capture **cosmic dust** inside it

- o **Micron size** [~10 μm dia.]
- o **Hypervelocity** [Max. ~16 km/s in low-Earth orbits]



- **Stardust: NASA's comet Wild-2 dust sample return mission**
 - Launched in 1999 and returned to Earth in 2006
 - **First extra-terrestrial object's sample other than the Moon**
 - Interplanetary and interstellar dust at cruising phase
- **Flyby dust collection by a density-gradient aerogel-based sampler**
 - Aerogel density: $\sim 0.01 \text{ g/cm}^3$ [Surface], $\sim 0.05 \text{ g/cm}^3$ [Bottom]
 - Flyby speed: 6.1 km/s

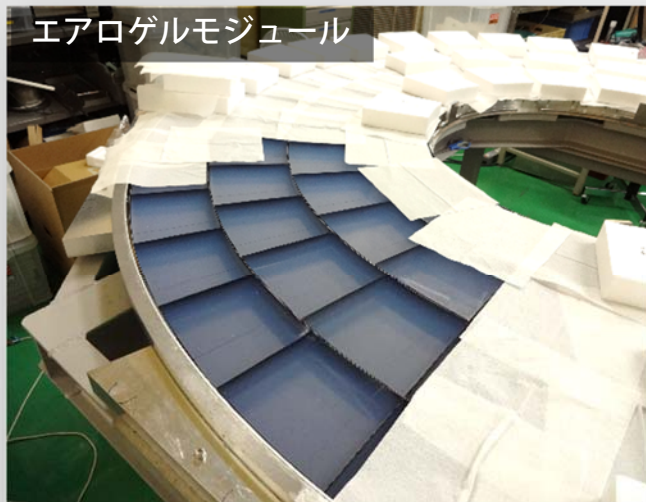
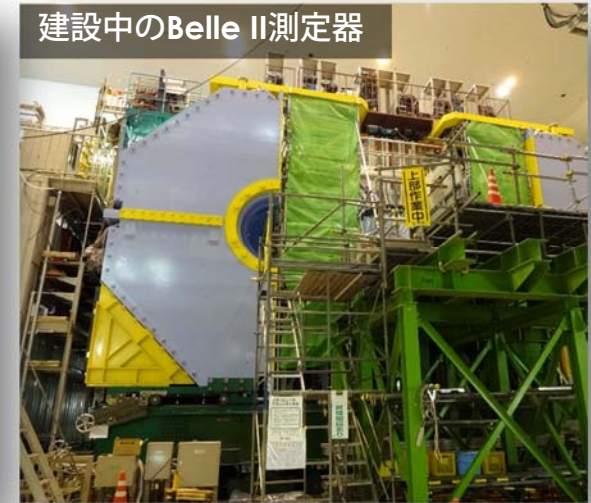
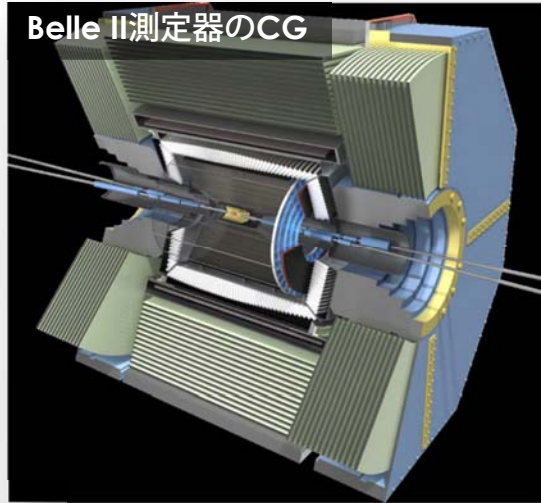


寄り道（その2）物理実験でのエアロゲル

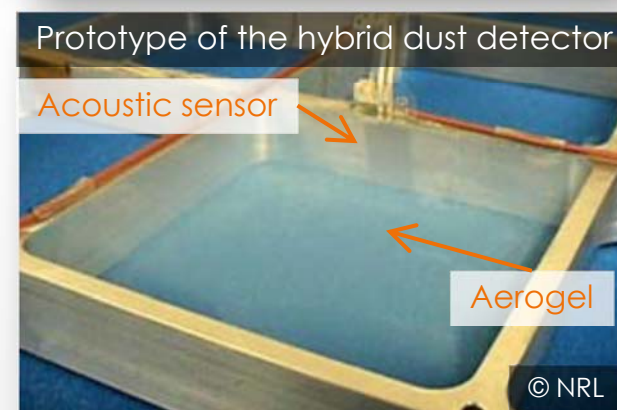
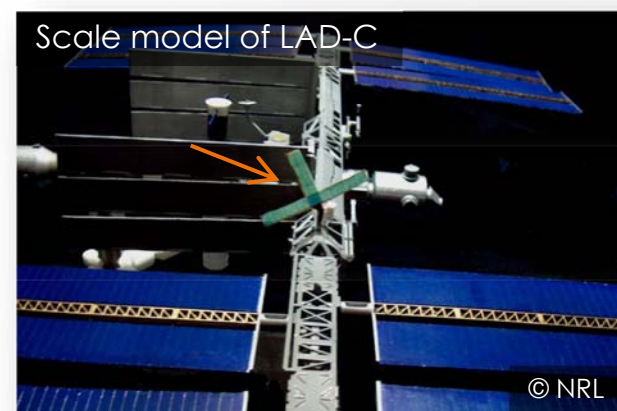
23/38

- チェレンコフカウンターの
輻射体として利用
 - 荷電粒子の種類を識別
 - 屈折率と透明度が重要
- Belle実験は小林・益川
両氏のノーベル賞に貢献
 - 後継のBelle II実験は、
次のノーベル賞を狙う

高エネルギー加速器研究機構におけるBelle II実験のARICHカウンター



- **LAD-C: Large Area Debris/Dust Collector** aboard the **International Space Station**
 - **Project unfortunately canceled** before building the system due to a political reason in 2007
- **Observation of $\sim 100+$ μm debris**
 - Potential risk of impact to orbital satellites
 - No ground-based observation by radar
 - Use of **10 m^2 aerogel-based collector**
- **Hybrid dust detection**
 - **Sample return** by 0.06 g/cm^3 large-volume aerogel tiles
 - **Real-time detection** by an impact sensor [using acoustic vibration of aerogel by dust impacts]





2. 発展編

たんぽぽミッション，宇宙へ

たんぽぽミッションとは

26/38

- Japan's first **astrobiology** mission in space [International Space Station]
 - Proposed in 2007
- **Test of interplanetary transfer of life or its precursor**
 - Tanpopo [in Japanese] = Dandelion
 - Spread of dandelion's seeds on Earth → Transfer of life in space
- Multifaceted **sample return** mission
 - **Cosmic dust capture experiment** by silica aerogel as intact capture media
 - **Microbes** in terrestrial dust
 - **Organic compounds** in interplanetary dust
 - **Space debris**
 - **Space exposure experiment**
 - Terrestrial microbes
 - Organic compounds



- **25+ institutes**
- **50+ collaborators**
 - Biologist
 - Chemist
 - Physicist
 - Planetary scientist
 - Engineer

たんぽぽミッションの経過

27/38

SpaceX's Falcon 9 rocket launch



- o **Rocket launched in Apr. 2015**
 - o 2016, 2017, and 2018 samples
 - o Arrival in the ISS
- o **ExHAM exposed in May 2015**
 - o Capture panels for 2016 attached to the ExHAM
- o **ExHAM recovered in Jun. 2016**
 - o CPs for 2016 restored in the Pressurized Module
- o **Cargo spacecraft retrieved in Aug. 2016**
- o **2016 sample analysis and 2017 sample exposure in progress**

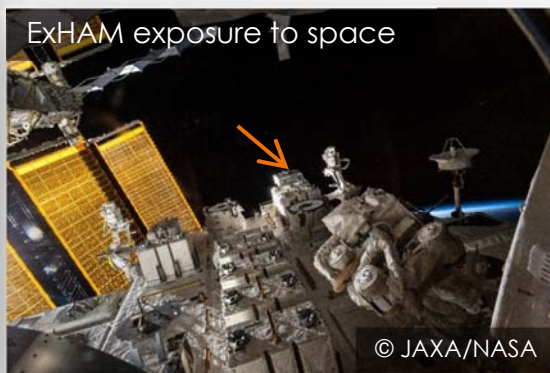
Dragon docking to the ISS



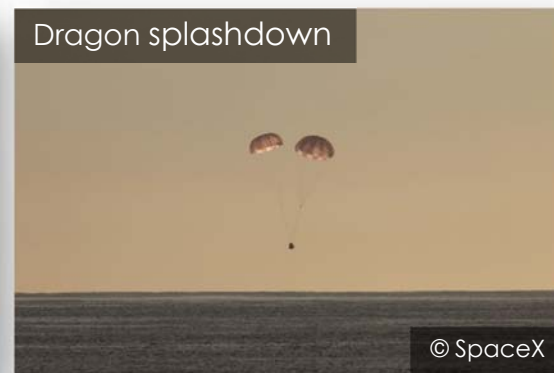
CP attachment to the ExHAM



ExHAM exposure to space



Dragon splashdown



寄り道（その3）宇宙ステーションを見よう 28/38

- 国際宇宙ステーションは肉眼で見えます
 - JAXAが目視予想を出しています
<http://kibo.tksc.jaxa.jp/>
 - 街中でも，夜空を数分かけて横切る様子がわかります

講演者が北京での国際会議で，ホテルに戻る際に偶然見つけた国際宇宙ステーション
(コンパクトデジタルカメラで撮影)



超低密度2層式シリカエアロゲルの開発

29/38

- **0.01 g/cm³ ultralow-density aerogel**

- World's lowest density used in space

M. Tabata et al., Nucl. Instrum. Methods A 623 (2010) 339.

- **Double-layer [box-framing] aerogel**

- **Surface layer: 0.01 g/cm³** [Very brittle]

- **Capture** ~10 μm dust particles

- **Base layer: 0.03 g/cm³** [Relatively tough]

- **Protect** the surface layer from vibrations

- Capture high-energy dust particles

- Both the layers chemically combined

M. Tabata et al., J. Sol-Gel Sci. Technol. 77 (2016) 325.

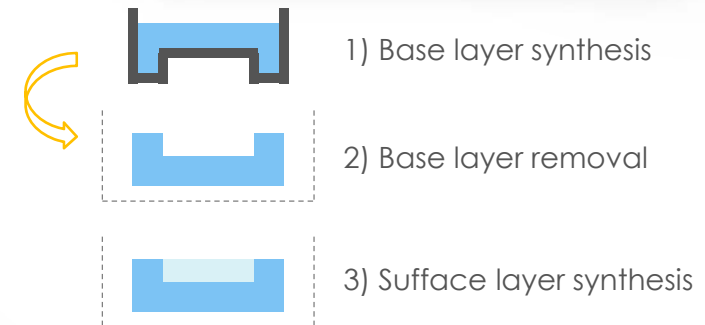
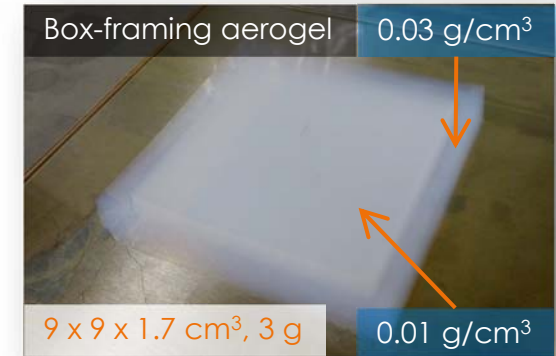
- **Contamination-controlled aerogel**

- Sterilized tools

- Clean booth [Class 1000]

- Flight aerogel production in Mar.–Apr. 2013

M. Tabata et al., Biol. Sci. Space 25 (2011) 7.

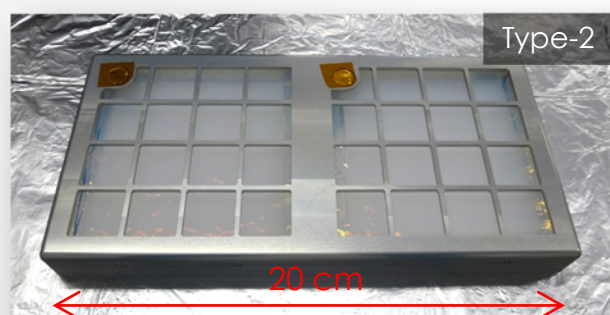
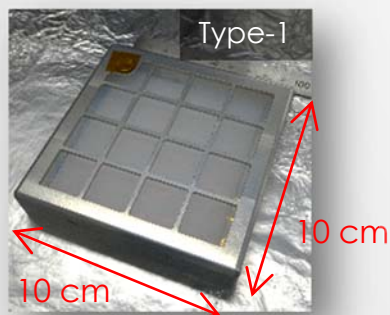
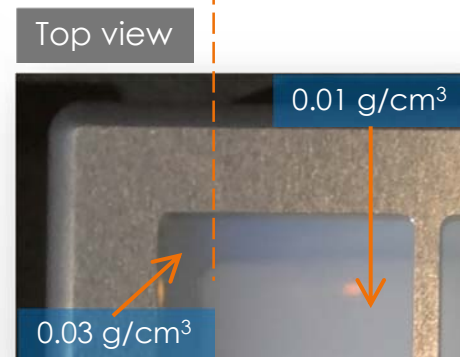
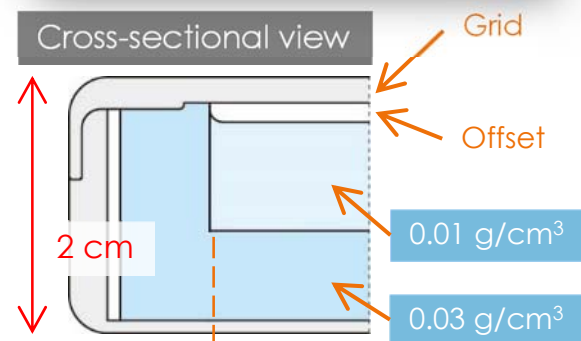


キャプチャーパネルの設計

30/38

- **Aerogel + container = capture panel [CP]**
 - Type-1 panel: 1 unit
 - Type-2 panel: Connected 2 units = 2 chambers
 - 12 units x 3 years = 36 units
 - **Interface** with the ExHAM
 - **Withstand** rocket launch vibrations
 - **Maximize** the dust capture performance

M. Tabata et al., Trans. JSASS Aerosp. Technol. Jpn. 12 (2014) Pk_29.



キャプチャーパネルの組み立て [@宇宙研 ISAS] 31/38



- **Capture panels assembled in the Tanpopo clean room at ISAS [Class 1000]**
 - 36 units [18 type-1 panels, 9 type-2 panels] in Dec. 2014
- Assembly procedure:
 1. **Form** an aluminum sheet box
 2. **Place** an aerogel in the box
 3. **Install** the aerogel box in the panel
 4. **Attach** the lid
 5. **Attach** an panel cover

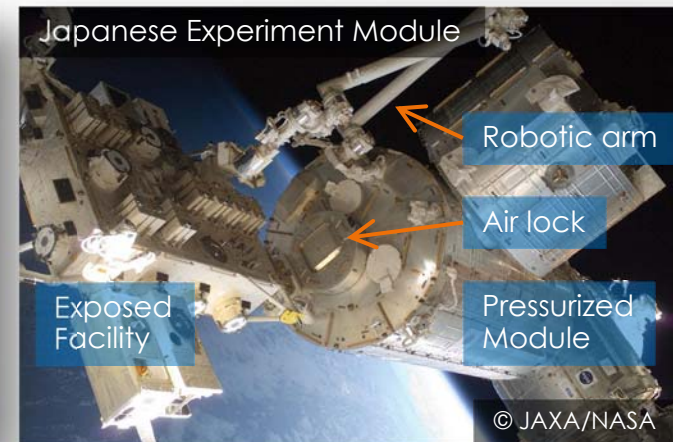


フライトサンプル受入試験

32/38

- Safety requirement for an ISS payload: **Not to disintegrate aerogel segments, which can escape from the capture panel**

→ Potential risk to the ISS crew



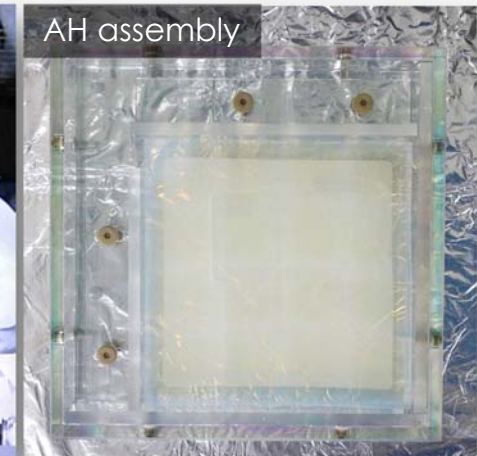
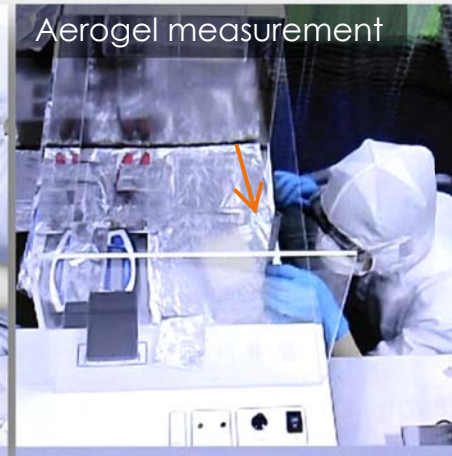
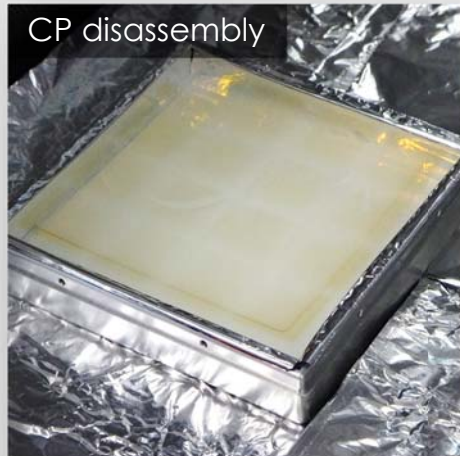
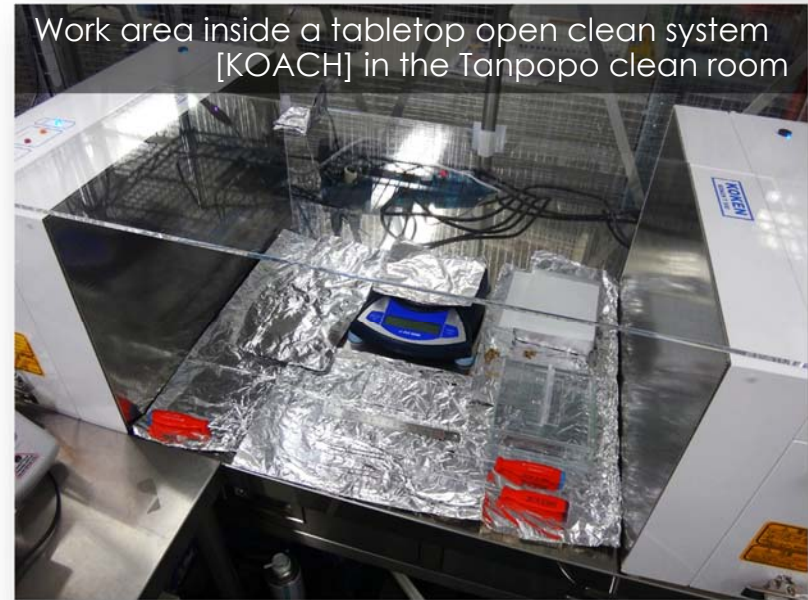
- **Acceptance [sampling] tests:**

- Vibration test
- Vacuum test
 - Depressurization/repressurization w/ 1 kPa/s
- Thermal test
 - From -135°C to 85°C



帰還サンプルのエアロゲルホルダー [AH] への格納 33/38

- **Aerogel tiles transferred from CPs to AHs inside a contamination-controlled environment [ISO level 1]**
 - 2016A samples: 8 tiles in Oct. 2016
 - 2016B samples: 3 tiles in Apr. 2017
- Transfer procedure:
 1. **Disassemble** the CP
 2. **Extract** the aerogel from the CP
 3. **Measure** the aerogel dimensions & weight
 4. **Assemble** the AH



- o Another **possible habitable zone** in our solar system:
Saturn's moon Enceladus

- o NASA's Cassini mission [Saturn and its satellite system observation]

- o Gravity field analysis suggested:

- o Underground ocean [Liquid water]

- o Plume analysis detected:

- o Organic molecules

- o Nano-silica particles

- o Hydrogen molecules [Free energy]

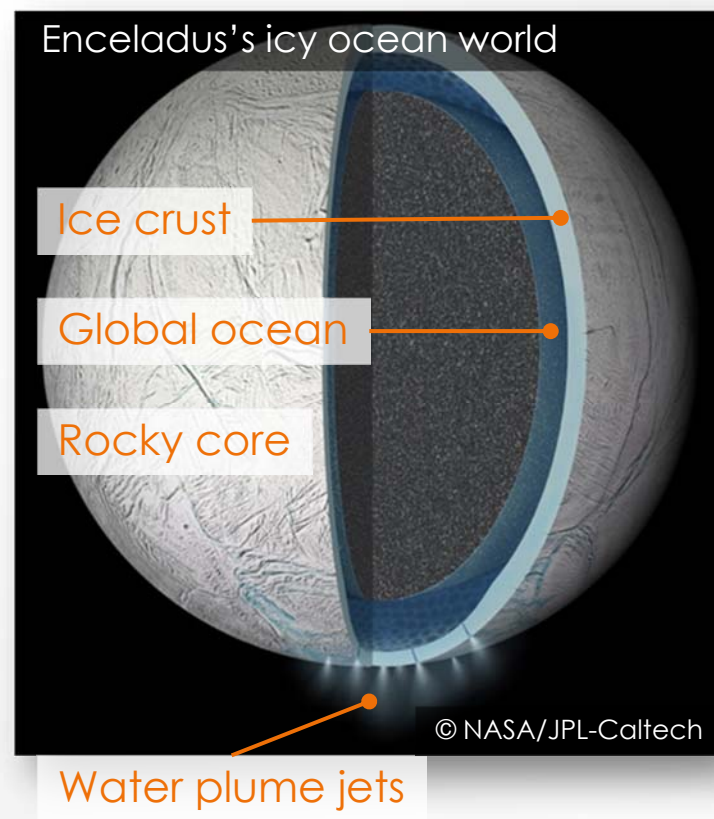
- o **Hydrothermal environment**

- by tidal heating

- **Possible extra-terrestrial life**

- o **Enceladus flyby missions**
proposed by NASA and JAXA

- o Plume particle in-situ analysis and
sample return based on
the **aerogel intact capture technique**



A faint, light gray world map serves as the background for the entire slide. The continents are clearly visible but not detailed, providing a global context for the text.

2. 発展編

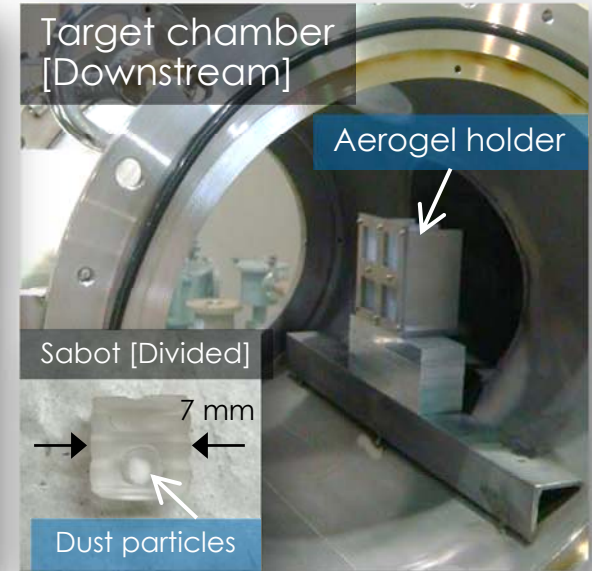
地上実験によるスペース デブリ研究

2段式軽ガス銃

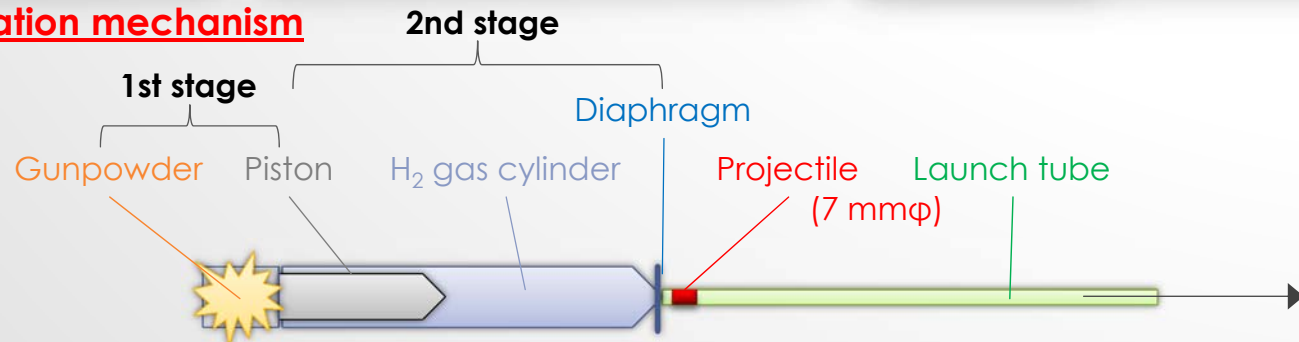
36/38

○ Two-stage light-gas gun experiment

- Ground-based laboratory simulation of hypervelocity impact
- 7-mm dia. bullet [Max. 7 km/s]



Two-stage acceleration mechanism



- JAXA宇宙科学研究所・2段式軽ガス銃共同利用研究採択課題
スペースデブリ研究に関連するもの（最近2カ年）

<http://ssl.tksc.jaxa.jp/pairg/spf/>

- 超高速微粒子衝突捕獲による超低密度二層型シリカエアロゲルの応答
- 曝露物回収による低高度軌道の微小デブリ分布計測法の検討
- イジェクタサイズの計測法・評価法に関するISO11227の改訂に向けた検証板の画像解析法の改良
- 国際標準ISO11227改訂へ向けたEjecta評価の斜め衝突実験
- メカノクロミズム金属錯体を用いたスペースデブリ衝突貫通穴の位置表示に関する研究
- 宇宙機のデブリ衝突による電気的および機械的影響に関する研究
- MLI-PVDF一体型大面積スペースデブリその場検出器の開発・較正実験
- 微小デブリ衝突による除去対象大型デブリの回転運動励起に関する研究
- 宇宙構造材料の超高速衝突破壊挙動における微細構造の影響
- 超高速度衝突における電気的現象に関する研究
- 超高速衝突時に生成されるイジェクタが少ない軽金属複合材料の開発



- 人類が宇宙に進出してから60年，宇宙開発に伴う，**地球周回軌道上のスペースデブリが増加**し続けている
- 宇宙大国以外の国や民間の宇宙開発参入が増える中，**人類が宇宙利用を継続する上で，スペースデブリはグローバルな問題**である
- スペースデブリ問題を解決するために，**国際的な枠組みのもと，監視，防御，排出の低減，除去のための技術開発**が進められている

