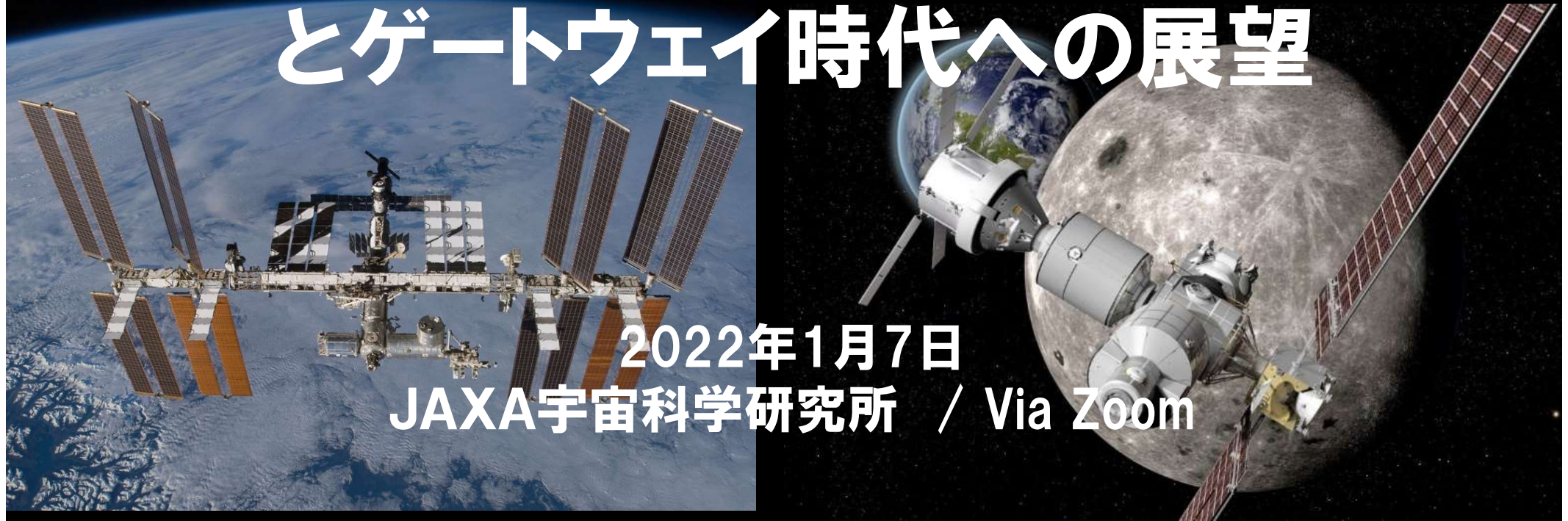


第22回 宇宙科学シンポジウム S5-003

たんぽぽシリーズによる アストロバイオロジー研究の継続的成果 とゲートウェイ時代への展望

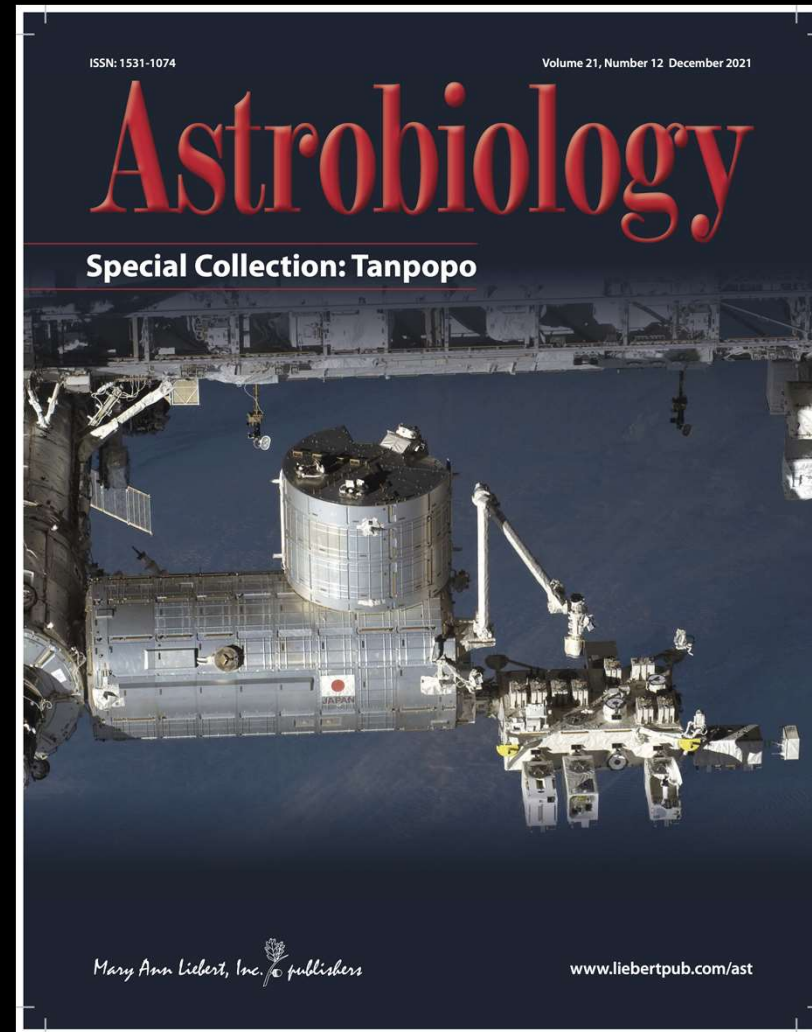


2022年1月7日
JAXA宇宙科学研究所 / Via Zoom

○ 矢野 創、三田 肇(福工大)、左近 樹(東大)、横堀 伸一(東薬大)、小林 正規(千葉工大)、平井 隆之(千葉工大)、藤井 雅之(ファムサイエンス)、柴田 裕実(阪大)、新井 和吉(法政大)、小林 憲正(横国大)、癸生川 陽子(横国大)、横谷 香織(筑波大)、藤島 皓介(東工大)、木村 駿太、奥平 恭子(会津大)、佐々木 聡(東京工科大)、田端 誠(千葉大)、冨田 勝(慶応大)、ピノー ルイス(エアバスヴェンチャー)、ネルソン キース(MIT)、パライソ ジョー(MIT)、山岸 明彦(東薬大)

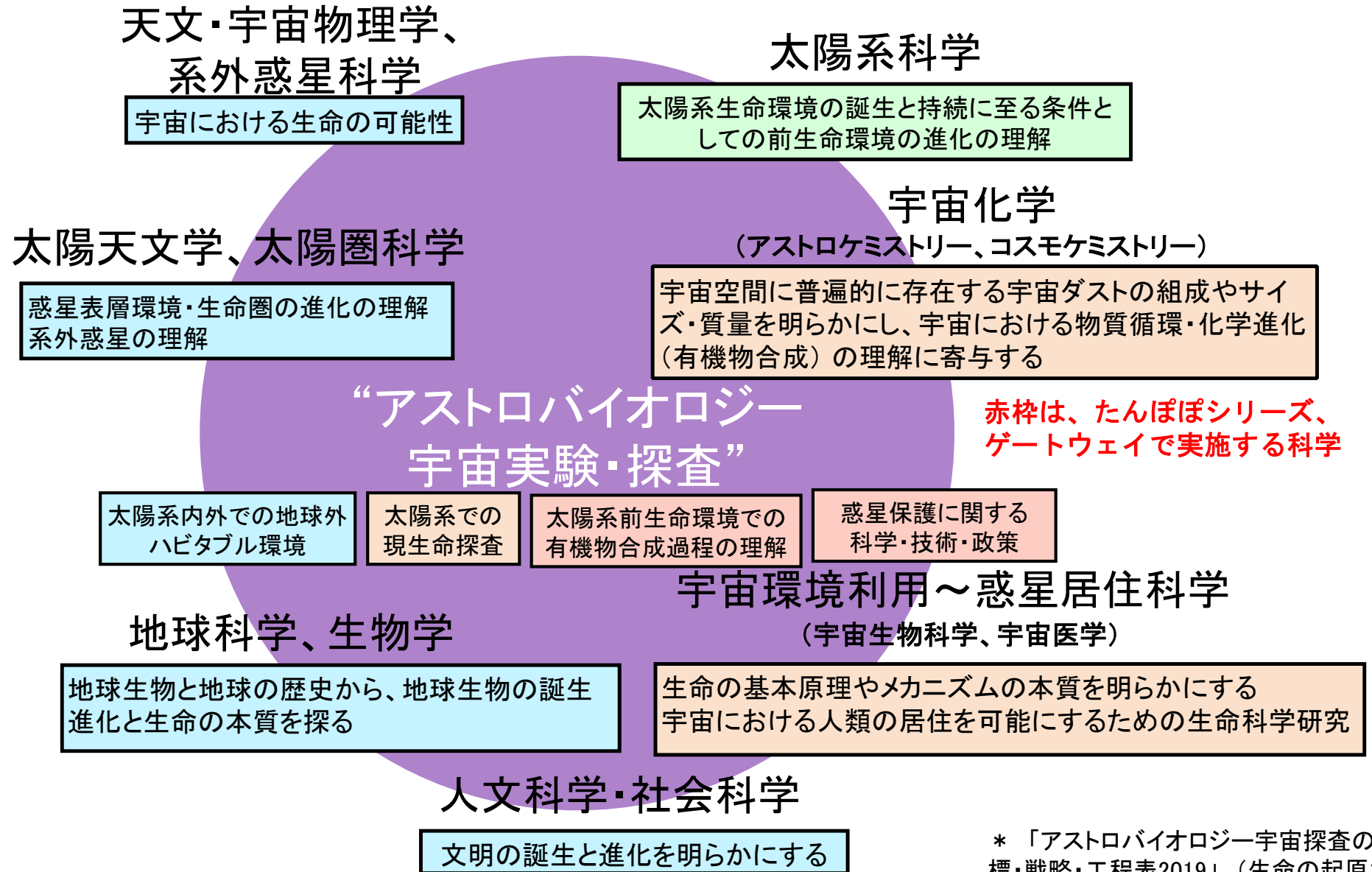
「アストロバイオロジー」とは・・

「地球でのみ検証されてきた現在の「生物学(バイオロジー)」を、物理・化学同様に、宇宙(アストロ)のどこでも通用する普遍的な知識体系へ飛躍させるために、既存の学問領域を統合した学際的探求」



日本のアストロバイオロジー研究の実施体制

関連全分野が一体となった総合的アプローチと一点突破の集中：
「連結点」としてのアストロバイオロジー宇宙実験・探査



* 「アストロバイオロジー宇宙探査の目
標・戦略・工程表2019」(生命の起原およ
び進化学会 = 日本アストロバイオロ
ジー・ネットワーク)より

たんぽぽ：地球と宇宙空間の微生物と有機物の双方向伝播（2015-19年）



パンスペルミア:

生命の惑星間移動仮説

1. 圏外で微生物採集
2. 微生物の圏外生存実験



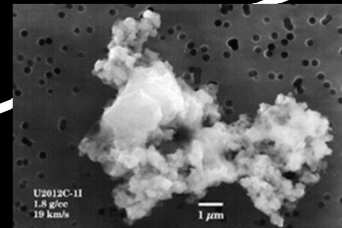
火星

火星隕石

火山爆発、
小天体衝突等

地球生命圏

ISSきぼう曝露部



[宇宙環境]
紫外線、宇宙線、
高真空、微小重力等

化学進化から生命へ：
生命の起源以前の宇宙由来有
機物の地球到達の可能性

3. 有機物の変成
4. 有機物含有宇宙塵の採集

宇宙開発利用の発展につながる、
先端的技術開発：

5. 高性能エアロゲル実証
6. 微小デブリフラックス評価

流星群



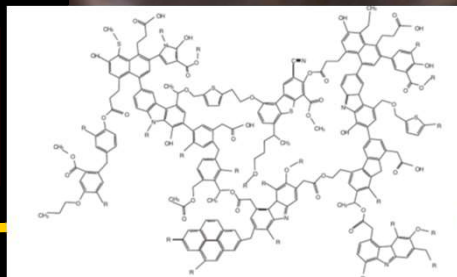
たんぽぽ2:「宇宙塵から生命へ」

日本のアストロバイオロジー実験第二弾(2019-20年)



エンケラドス

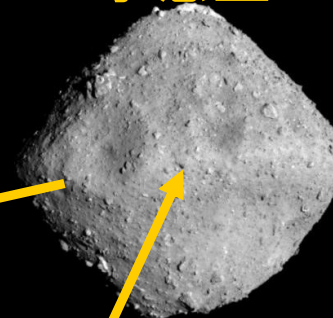
サンプル
リターン



彗星



小惑星



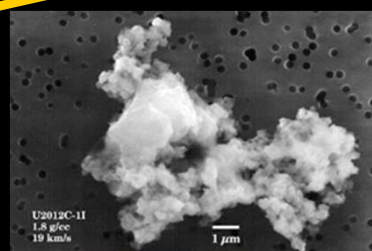
火星

惑星間移動

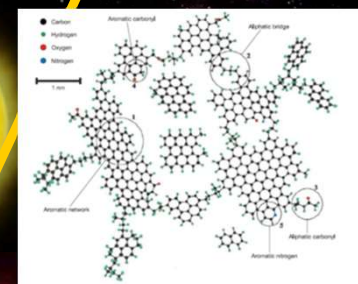
有機物
化学進化

ISS-Kibo ExHAM

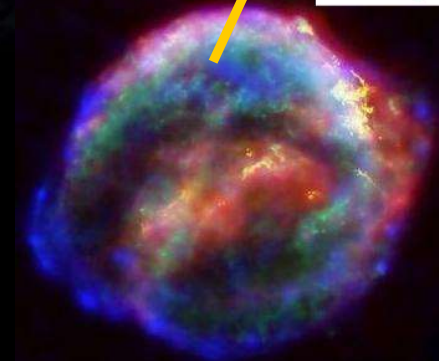
非破壊
捕集



QCC
化学進化



新星



地球生命圏

たんぽぽシリーズ：目標と経緯



・ アストロバイオロジー分野の世界的ビジョン：

「The Second Genesis の発見 (N=1からの脱却)」

- ・ 日本の宇宙実験・探査分野でのアストロバイオロジー研究の遅れにひるまず、第一歩を踏み出す。

=> 2007年、「たんぽぽ」計画提案。

方針1： 近隣分野から参画可能な、間口が広く、ターンラウンドが短い学際的项目とする（ミッション提案から選抜・機器開発・検証試験・打上げ・軌道上運用・地球帰還・初期分析・科学成果の創出までの全工程を、コミュニティが経験できる機会とする）

方針2： 若手生命科学者の宇宙実験・探査への参入を促す

方針3： ゲームチェンジをもたらす独自の宇宙技術を築く

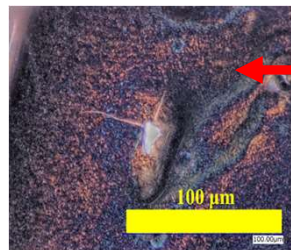
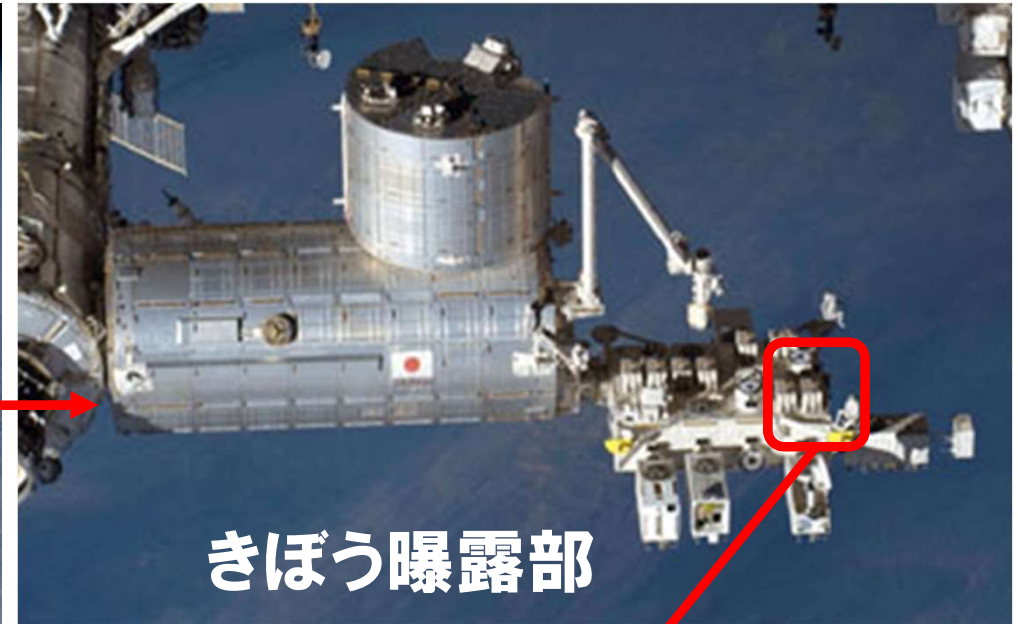
=> 2012年、ISAS学際系に「宇宙物質生命科学実験室」を立上げ、プロジェクト活動を開始。

=> 2015年、ISSきぼう曝露部で運用開始。

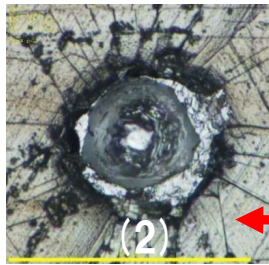
=> 2019年、たんぽぽ2の運用開始。アストロバイオロジーISS実験の共通名義として、「たんぽぽ」をシリーズ化。

=> 2021年、ゲートウェイに搭載する低速ダスト検出器の開発を開始。

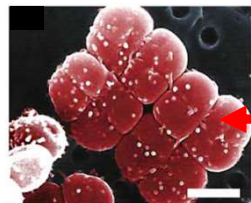
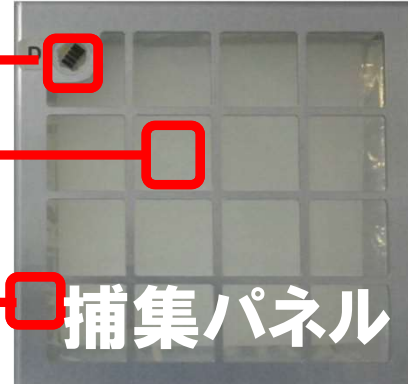
たんぽぽシリーズ実験装置:きぼう曝露部ExHAM/ExBAS搭載



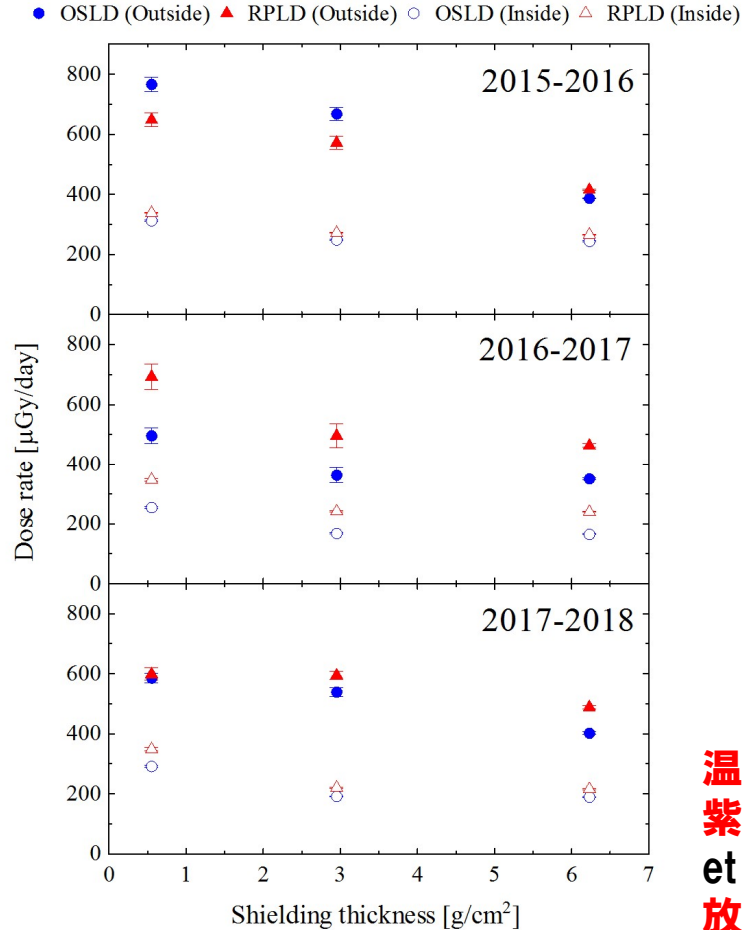
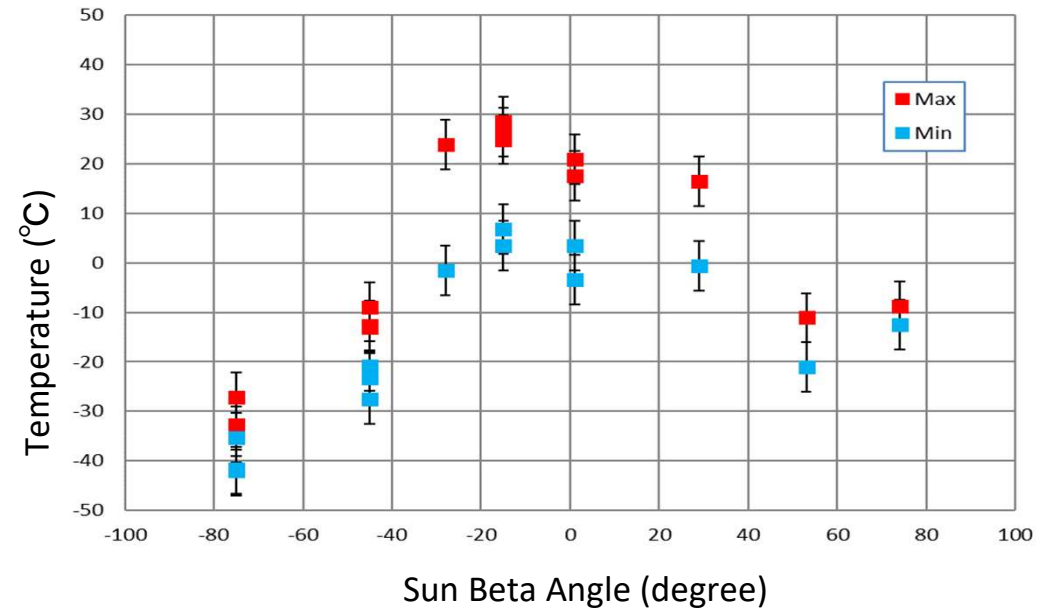
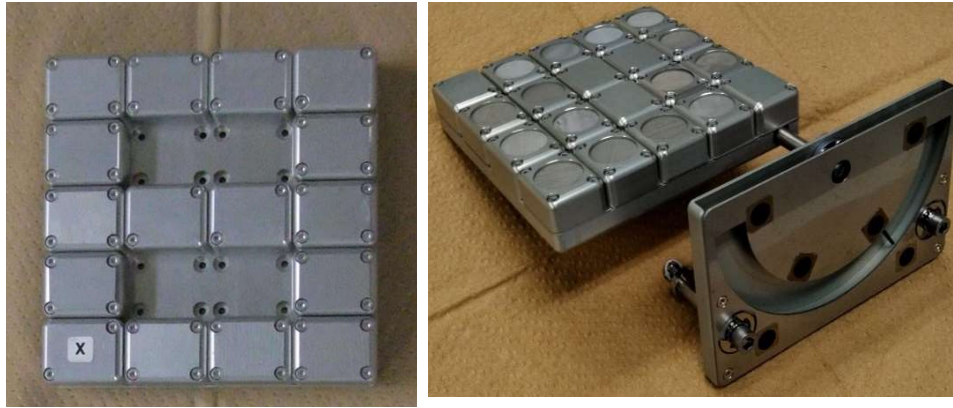
(3) カーボン
ナノチューブ



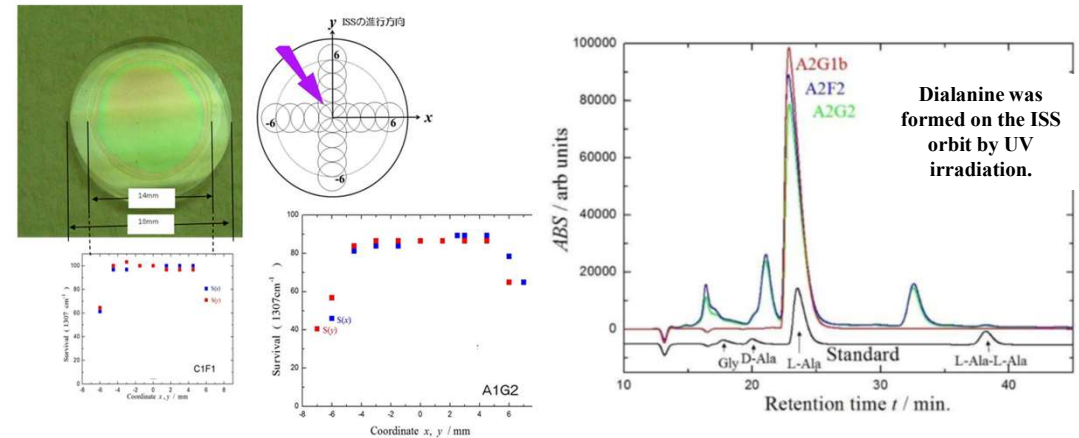
(2)
アルミフレーム



たんぽぽ1, 2曝露実験: パッシブ環境計測



UV dosimeter using alanine decomposition



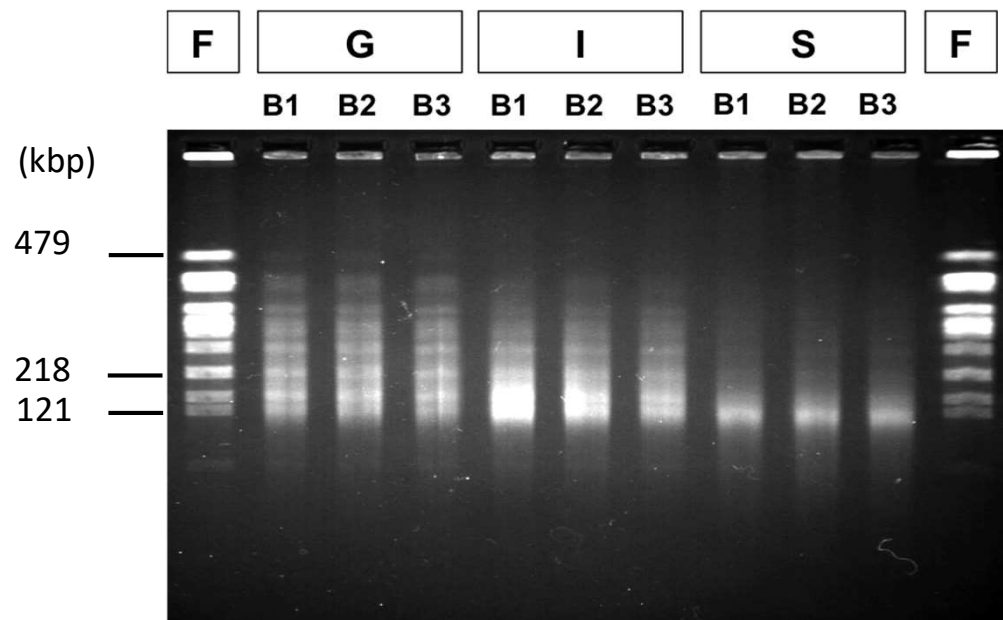
温度: Max $29 \pm 5^\circ\text{C}$ 、Min $-42 \pm 5^\circ\text{C}$ (Hashimoto et al., 2019)

紫外線: VUV dose at 120 – 203 nm: $470 - 570 \text{ kJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (Kawaguchi et al., 2020)

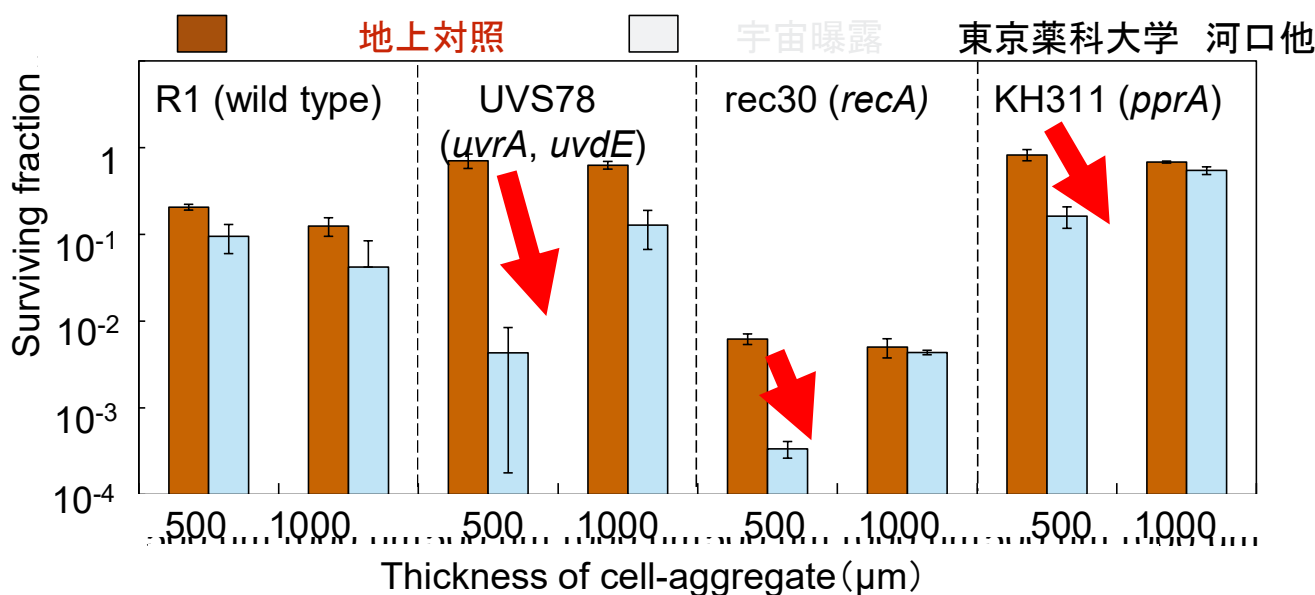
放射線: 年毎船外線量率は、ばらつきが大きいものの概ね一定値で推移。
(Kodaira, et al., 2021)

D. radiodurans のDNA修復変異株の生存率と二本鎖断裂数、紫外線、コロニー厚さの関係

F: 培養細胞 G: 地上対照 I: ISS S: 宇宙曝露



東洋大学 鳴海他



100 μm厚では放射線耐性菌は死滅。500 μm以上で放射線耐性菌は生存。

パルスフィールドゲル電気泳動 (PFGE)によって検出されたDNAバンド(R1と変異株3種)の測定では、培養したフレッシュな*D. radiodurans*菌体、地上対照、ISS船内対照、宇宙曝露試料をレーンごとに使用。

制限酵素Not1によって8つのDNA断片に分離されるため、宇宙での損傷がなければ8つのバンドが確認できるはずだが、DNA二本鎖切断数が多いほどスメア状のシグナルは薄くなる。

相互比較の結果、全ての株において、宇宙曝露試料は地上やISS船内に比べ、DNA二本鎖切断数が多くなった。

*D. radiodurans*の惑星間空間での予想生存時間：放射線耐性菌は塊として、地球⇔火星の伝搬期間の宇宙曝露でも生存可能

曝露条件	厚さ(μm)	生存時間* (年)	惑星間空間での生存時間** (年)
MgF ₂	500	35.6 ± 0.5	4.3 – 6.1
	1000	43.4 ± 0.2* **	5.2 – 7.5
	1500	45.3 ± 0.5	5.5 – 7.8
SiO ₂	500	14.8 ± 0.5* **	1.8 – 2.6
	1000	24.6 ± 0.7	3.0 – 4.2
	1500	30.8 ± 0.7	3.7 – 5.3
Dark	1000	48.1 ± 0.1* **	48.1 ± 0.1

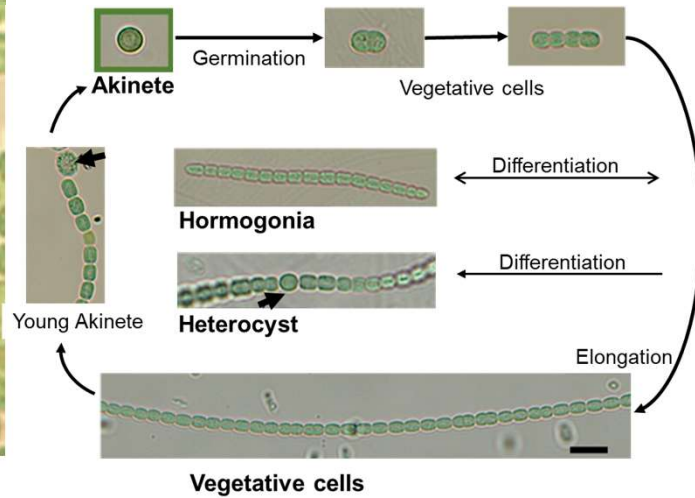
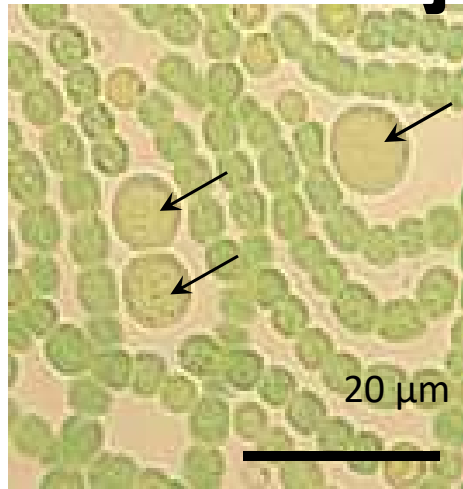
Kawaguchi et al. (2020), Fujiwara, et al., (2021)

* 対数生存直線の傾きと最初の菌数から確率95%での生存時間を推定した。

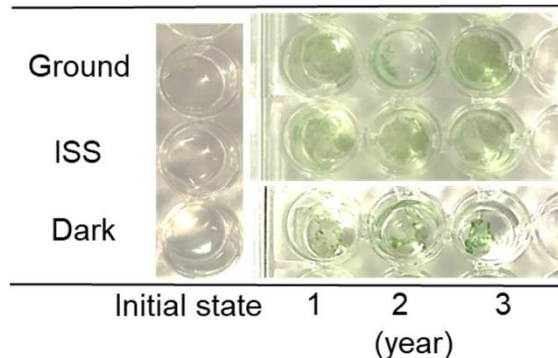
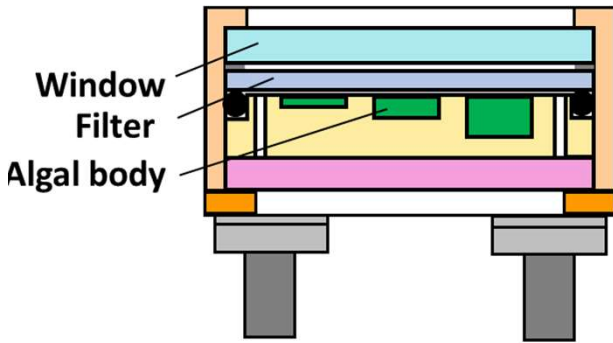
** MgF₂ の窓でISSで照射される太陽紫外線量は惑星間空間で 44 ～63 日/年，石英窓で照射される太陽紫外線は惑星間空間で 41～58 日/年に相当することを考慮すると、成層圏で発見されている放射線耐性菌 *D. radiodurans* は、厚さ0.5mm以上の塊となると、惑星間空間で紫外線が当たる条件で2～8年、暗所では48年生存すると推定された。

→ 微生物コロニーが宇宙を移動する「マサ・パンスペルミア仮説」を支持しており、地球・火星間の物質伝搬の最短時間を通じて、繁殖可能な微生物の相互往来が可能なことを示唆。惑星保護の観点でも重要な発見。

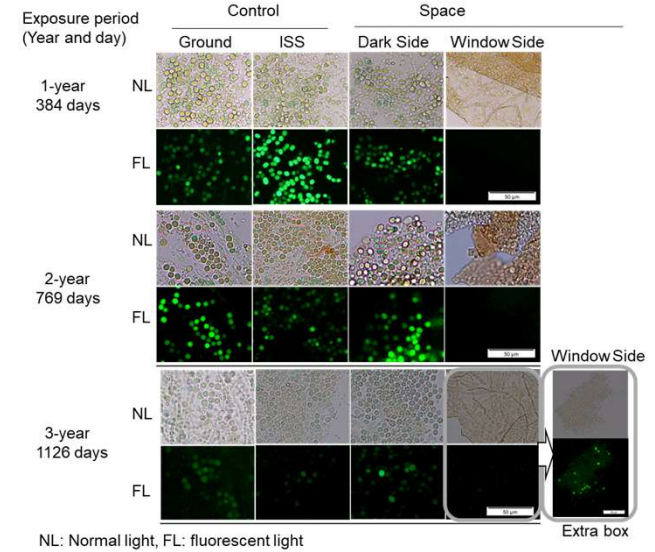
アーキア・シアノバクテリア(陸棲藍藻Nostoc sp.HK-01)の 宇宙生存と細胞層厚さ、照射光波長の関係



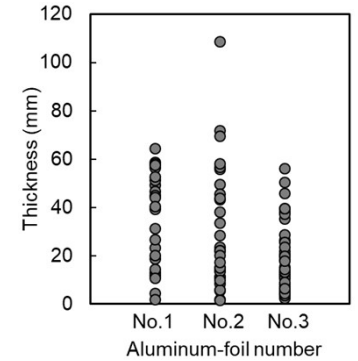
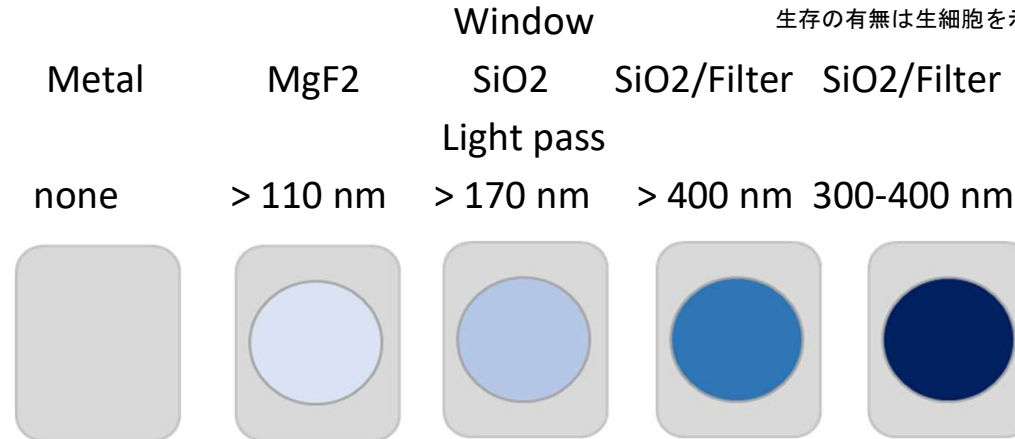
Nostoc sp. HK-01の生活環を示す。緑枠が休眠細胞。



各年の地上・ISS保存・宇宙遮光側の細胞は、その後増殖能にも問題ないことを示す写真



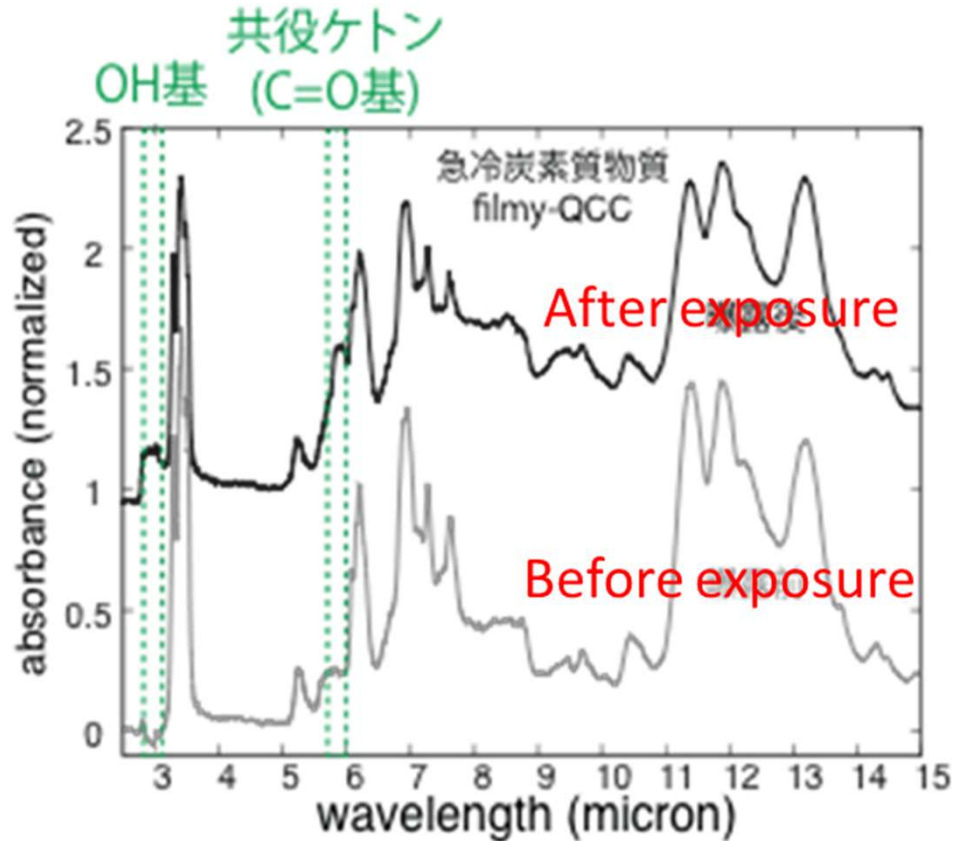
生存の有無は生細胞を示す染色法により調べられた。



3年窓側の生細胞を確認した理由として、一部細胞の厚みがある可能性を地上実験で検証した。

たんぽぽ1の結果から、休眠細胞で細胞層がある程度あれば、地上からISS軌道周高度までの移動は可能であると考えられた。また、たんぽぽ2の結果から、細胞層厚さが200 μmあれば十分に生存できることを確認できた。一方、藍藻の低い宇宙線曝露が、その後の増殖に促進的な効果を示す可能性についても確認している。

急冷炭素質物質(QCC, QNCC)の宇宙空間での化学進化を再現



窓材のない
「QCC」型捕集
パネル（左）と
「QCC」実験で
得られたQCCの
赤外吸収スペク
トル（上）



「QCC」実験では、**急冷炭素質物質を宇宙曝露することで、炭素質コンドライト隕石中の不溶性有機物と共通する性質を獲得することを明らかにした。**

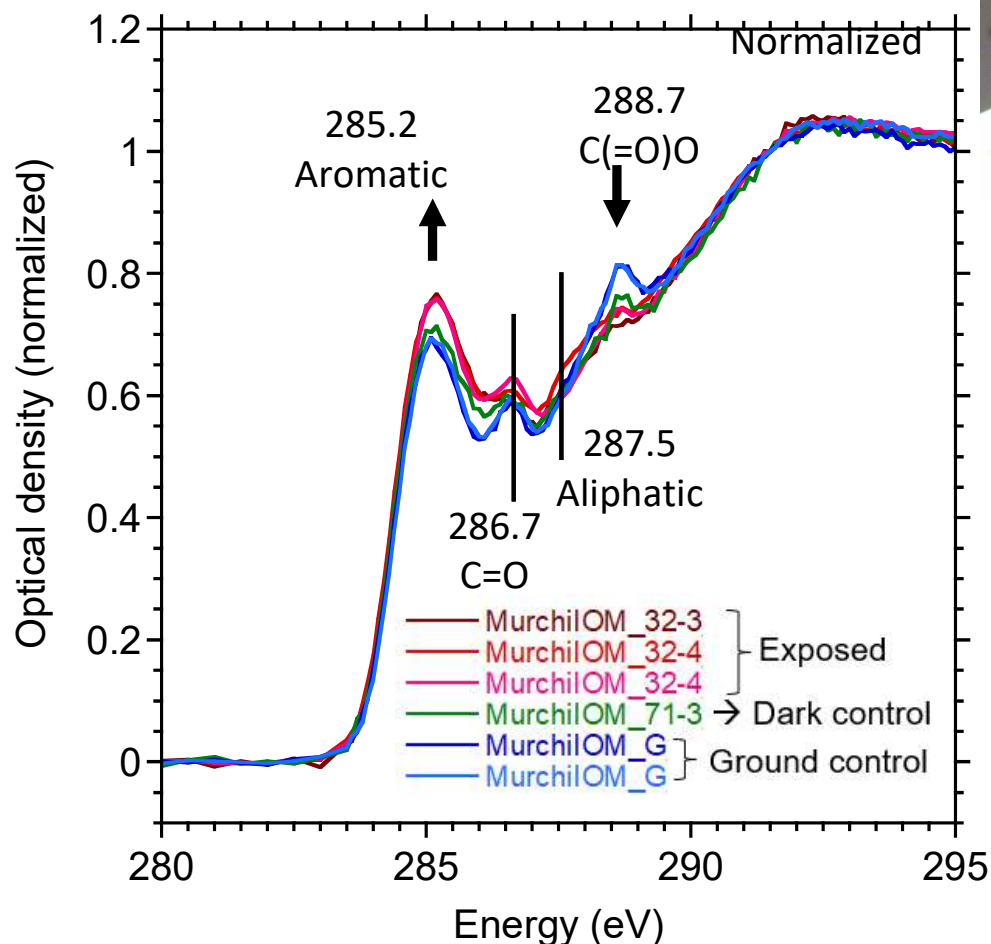
さらに「たんぽぽ2」では、**新星爆発で形成されるダストの赤外線特性を良く再現する急冷窒素含有炭素質物質(QNCC)を曝露し、原始太陽系有機物との比較を行い、終焉期の恒星起源有機物が始原的な太陽系有機物の一部となる仮説を検証している。**

(Sakon, et al., 2021, Endo et al., 2021)

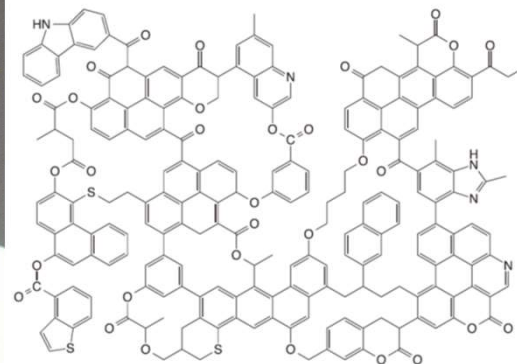
炭素質隕石抽出有機物の宇宙曝露による宇宙風化の影響評価

C-XANES (STXM): Murchison IOM

Aromatic: Exposed > Dark \approx Ground
C(=O)O: Exposed < Dark < Ground



@KEK Photon factory BL19A

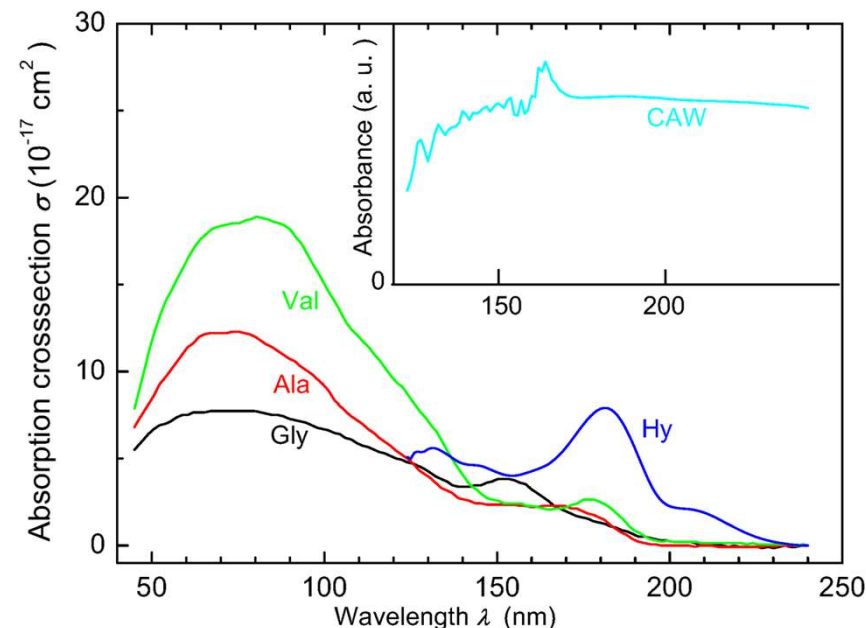
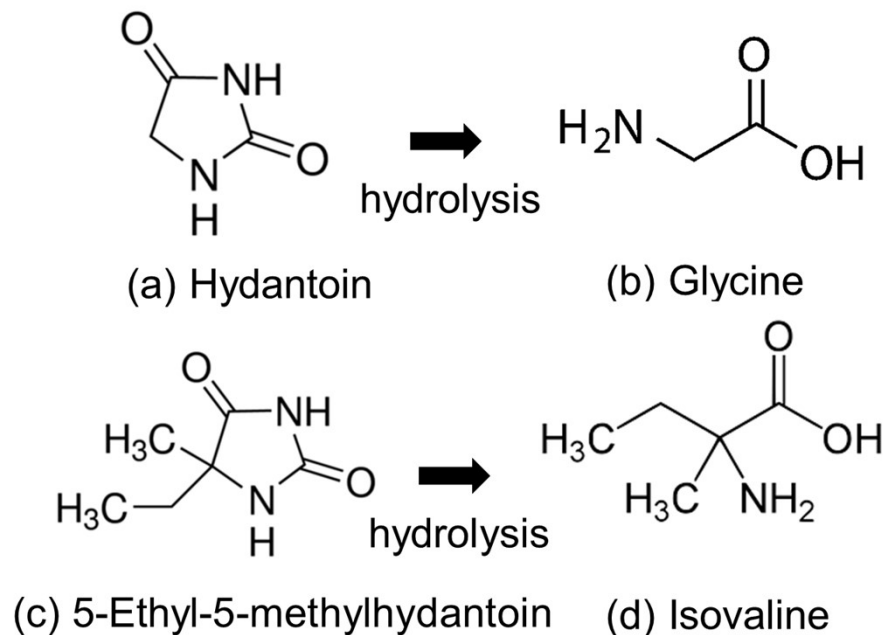


隕石有機物や模擬物を宇宙空間に曝露して、その構造変化を調べ、宇宙風化の影響を明らかにする。

Murchison隕石から抽出された**不溶性有機物(IOM)**は、宇宙風化により**芳香族が増え、C(=O)Oグループが減少すること**がわかった。

ただし、この傾向は、光を遮った状態で曝露した試料(Dark)では、あまり顕著ではなかった。

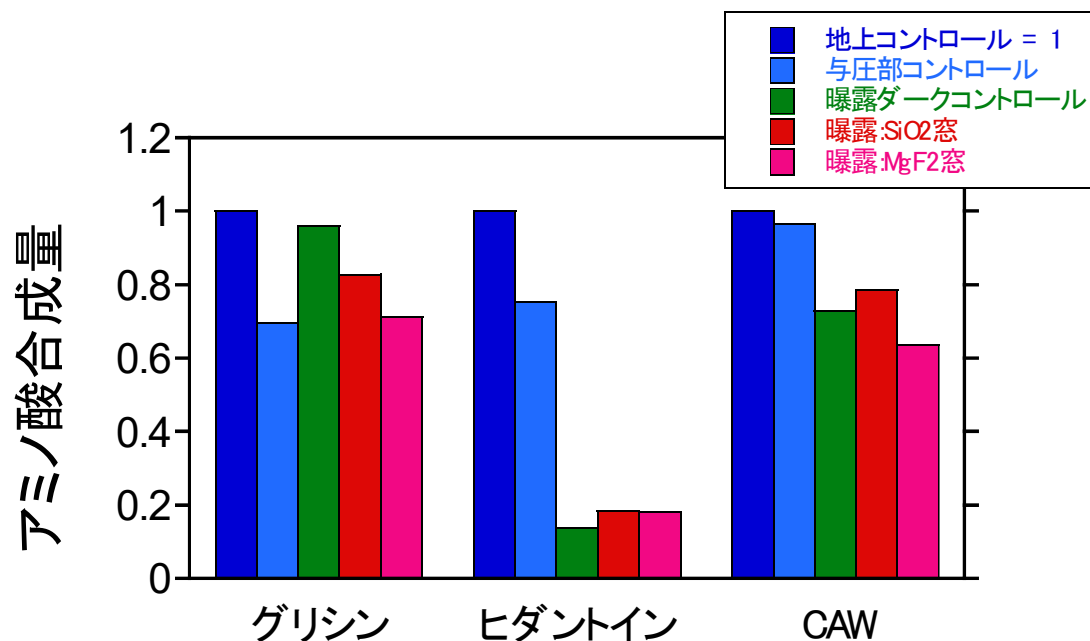
宇宙塵含有生体関連有機物(アミノ酸前駆体)の安定性



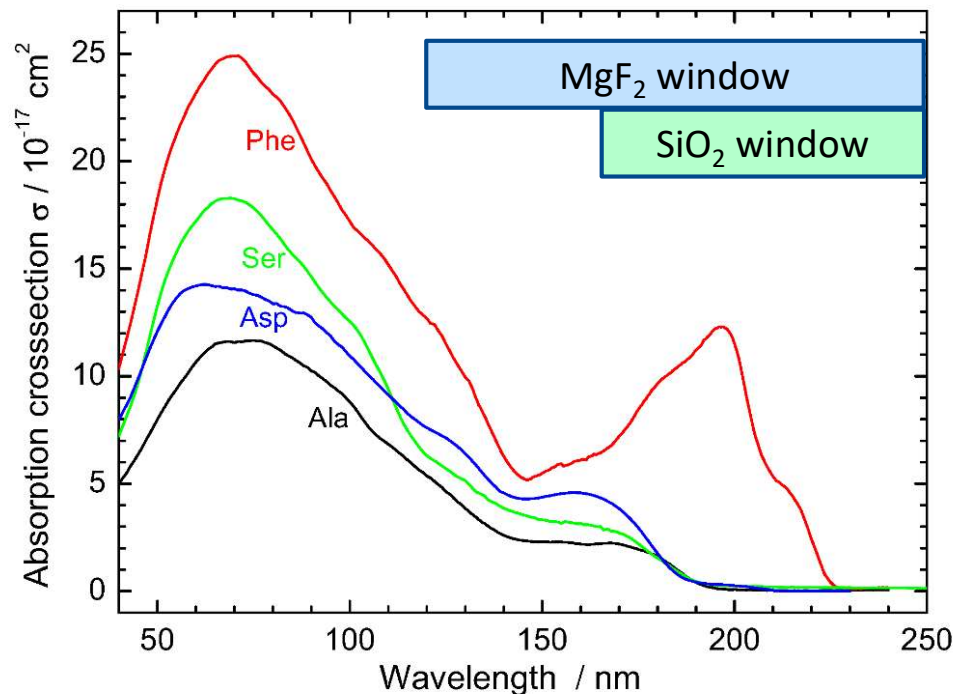
宇宙に存在しうるアミノ酸関連有機物は、宇宙塵に含まれて地球に安定に届くのか？アミノ酸前駆体として運ばれる方が安定ではないか。特に、**高分子量アミノ酸前駆体(CAW)の方が、低分子量アミノ酸前駆体より安定ではないか**、という仮説を解明する。

低分子前駆体ヒダントイン類とアミノ酸の安定性は、地上実験からの予想と異なったため、「たんぽぽ2」では窓材の有無により、**試料が受ける紫外線波長領域が異なる実験**を行って、現在解析中である。

(Kobayashi, et al., 2021)



宇宙環境でのジペプチド、共重合体生成の確認



*ジペプチド生成の確認(再確認・精度向上)

安定同位体標識アラニン薄膜の曝露

*VUV吸収スペクトルの効果

試料 アラニン vs. フェニルアラニン

窓材 SiO_2 vs. MgF_2

*共重合体が生成するか

アラニン + セリン (極性アミノ酸)

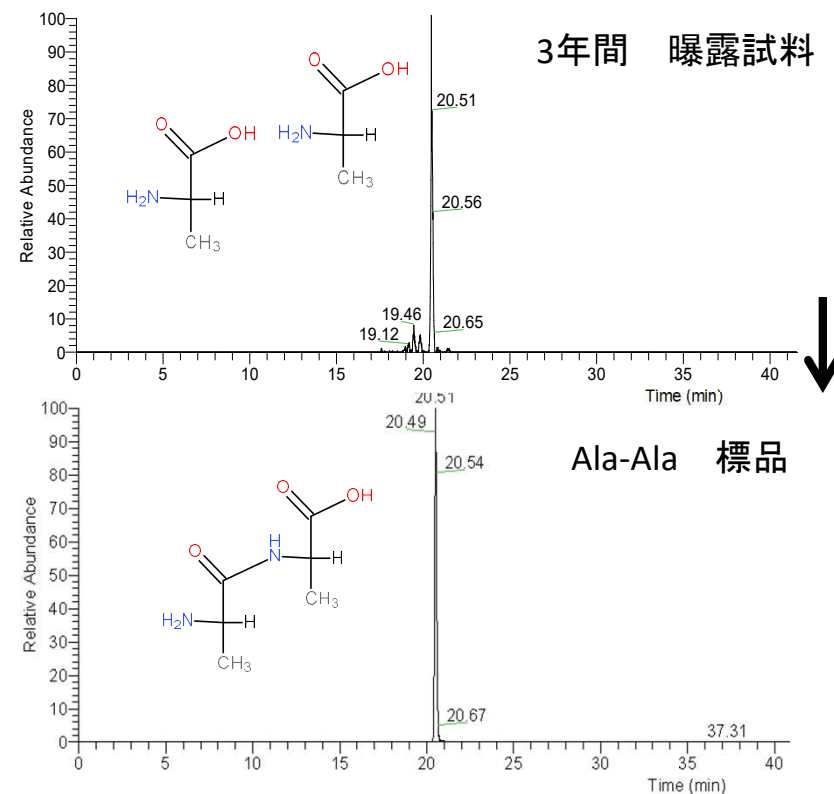
アラニン + アスパラギン酸 (酸性アミノ酸)

*ペプチド鎖の延長の可能性

アラニルアラニン (二量体) から

四量体の生成へ

(三田ほか、2021)



曝露試料のVUV吸収スペクトル

アラニン薄膜中に、Ala-Alaが見出された。

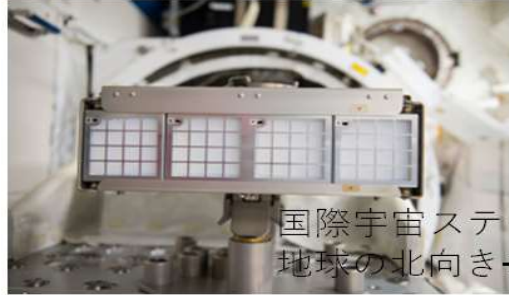
宇宙環境でジペプチドが生成

「たんぽぽ」実験で、紫外線線量計として搭載したアラニン薄膜を分析したところ**アラニンの二量体(ジペプチド)**を検出した。

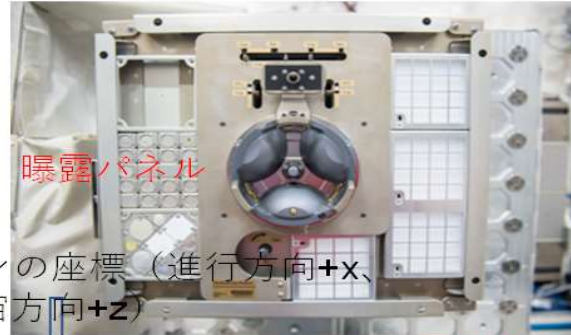
「たんぽぽ2」では、ジペプチド生成の検証のため、安定同位体標識をしたアラニンを用いた再実験と、アラニンにセリンなどを加えた試料への宇宙曝露を行うことで、**共重合体やさらに長いペプチドの生成**を確認中である。

三方向曝露の「捕集パネル」による宇宙塵・スペースデブリ捕集と地球周回軌道上の固体微粒子フラックス経年変化の計測

進行方向 ← 反ISS面 M N P Q -Y面



国際宇宙ステーションの座標（進行方向+x、地球の北向き+y、宇宙方向+z）



進行方向 ↓ D 宇宙面捕集パネル

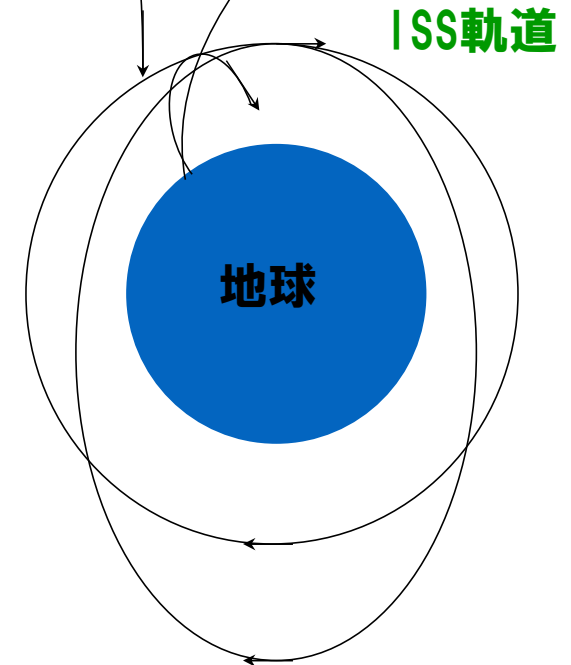
進行方向捕集パネル H J K L -X面



track ID	ISS x / μm	ISS y / μm	ISS z / μm
D2_0000	-646.8294783	-1994.288855	-2600
D2_0009	0	0	-2000
D2_0028	0	0	-2000
D2_0030	0	0	-360
D2_0047	0	0	?
D2_0067	1342.738074	-1714.92165	-2800
E2_0000	0	0	-3120
E2_0001	75.98856942	-409.9976314	-280
E2_0008	0	0	?
E2_0012	112.0060506	119.9857668	?
E2_0020	-59.99626716	89.99463054	-360
E2_0033	196.0241043	-331.9874126	-400
H1_0000	-3300	-225.3899719	-137.2009432
H1_0001	-3600	-1768.893103	-4.939694242
H1_0002	-2200	0	0
H1_0003	-3500	-2126.627646	-249.8213325
H1_0004	-800	0	0
N2_0014	685.9815331	-1140	-808.0236011
N2_0021	232.0013973	-60	-100.0116056

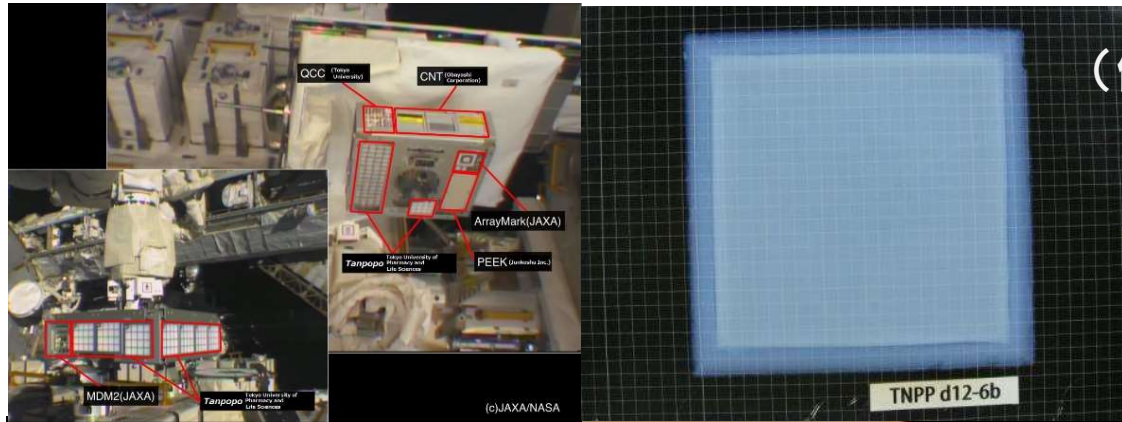
「宇宙塵」：ST4
(天然の地球外微粒子)

「微生物」を含む塵：ST1 (天然の地球由来微粒子)



「スペースデブリ」：ST6 (人工物の破片)

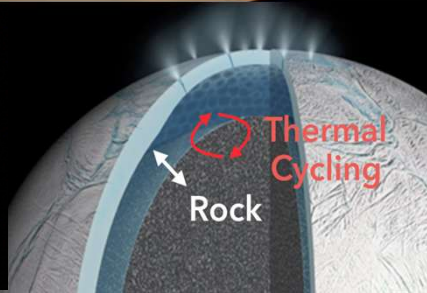
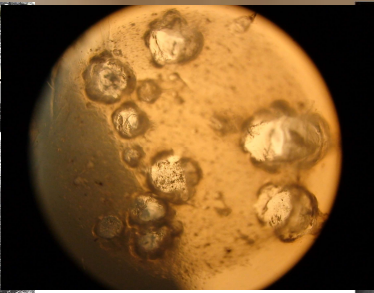
将来の海洋天体サンプルリターンに向けた超高速衝突物質捕集材の宇宙実証：たんぽぽ1 & 2 捕集パネル搭載 二層式0.01g/cc疎水性および親水性エアロゲル



(例)たんぽぽ初期分析による超高速衝突痕：D1宇宙面（メテオロイド起源、短トラック型）



(Courtesy: JAXA, NASA, Tanpopo Project, K. Fujishima)



たんぽぽ捕集パネル・エアロゲル上超高速衝突痕集計

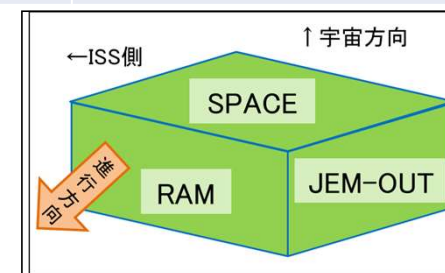
[2015.05.26~2019.08.06、3方向、36枚#] (2020.03.20 現在)

試料グループ	曝露期間	曝露時間 (日)	宇宙面 (個/ 枚)	進行面 (個/ 枚)	反JEM面 (個/枚)	小計 (個/枚)
2016A	2015/5/26 ~2016/6/14	386	7/1	20/3	41/4	68/8
2016B	2015/11/11 ~2017/3/10	486	51/3	--	--	51/3
2017A	2016/6/29 ~2017/7/19	386	180/4	25/4	50/4	225/12
2018A	2017/7/28 ~2018/7/18	355	117/4	41/4	TBC/4	158+TBC/12
2019A	2018/7/25 ~2019/8/6	377	--	8/1	--	8/1
合計	----	---	355*/12	94/12	91+TBC/12	540+TBC/36

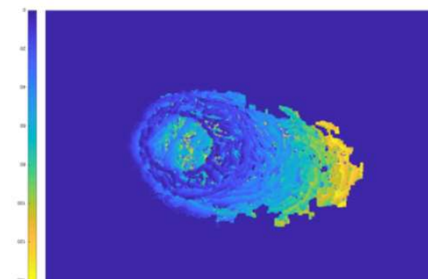
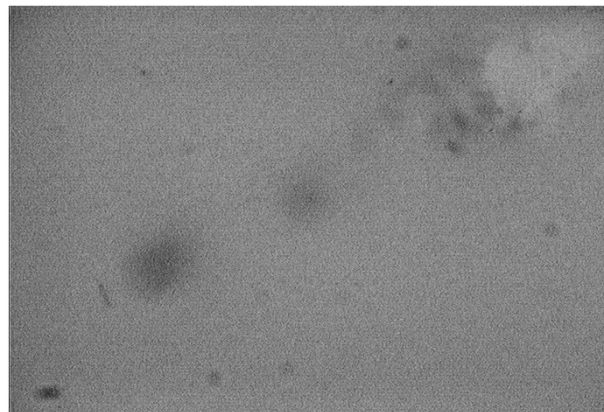
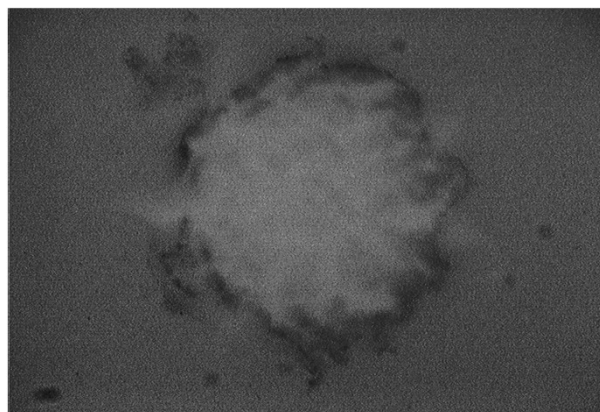
= 捕集パネル一枚当たり、エアロゲルの有効曝露面積は52 cm²

* = 宇宙面には、ISS構造部への衝突イジェクタ群による二次衝突痕が多数含まれる

- ➔ 4年間の宇宙曝露実験で、36枚（~1870 cm²）の捕集パネル・エアロゲル上に540個以上の超高速衝突痕が同定・初期分析・アーカイブされ、学術的優先度に基づいて詳細分析に回されている。
- ➔ 他に、ISS近傍からの放出物の低速衝突も、多数確認された。

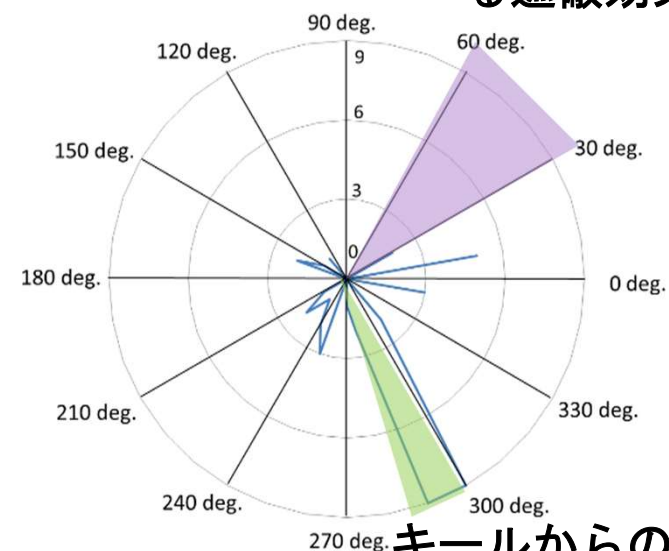


衝突痕の三次元形状と分布から探る二次イジェクタ・遮蔽効果

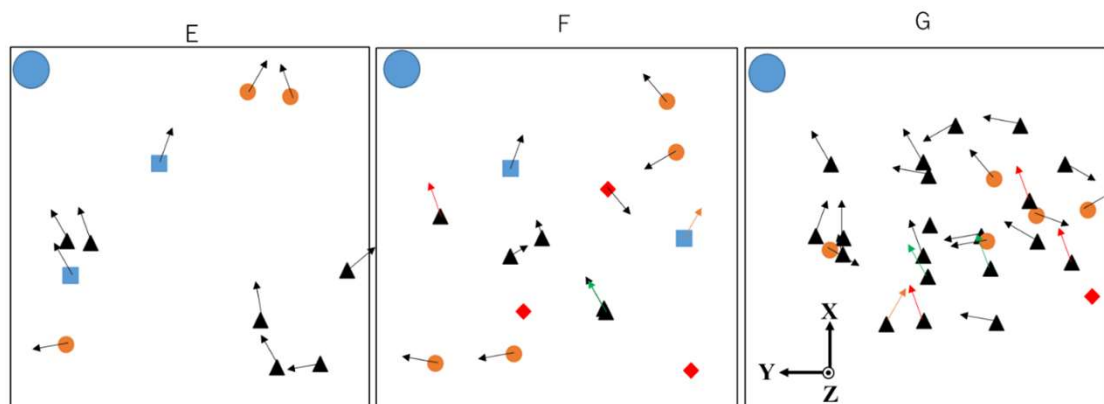
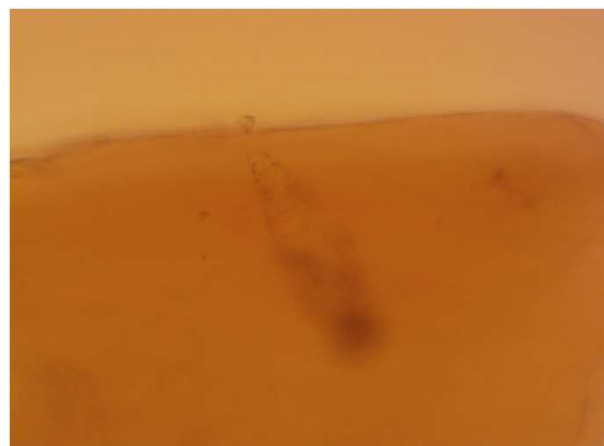
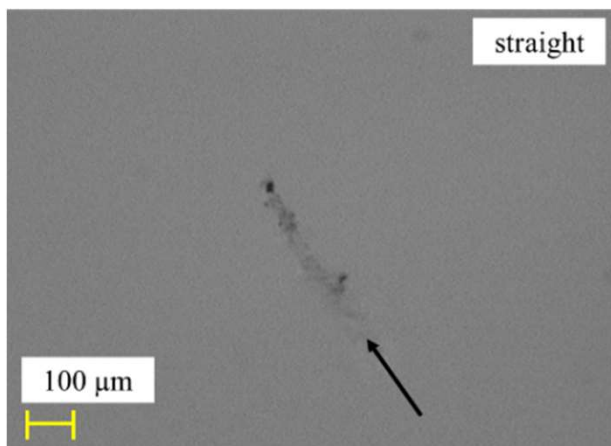
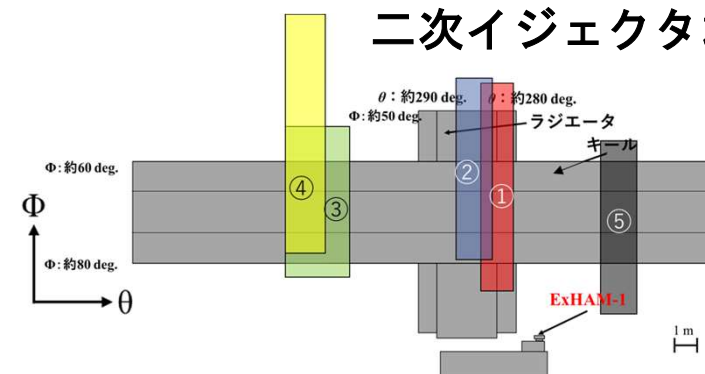


三次元形状から衝突立体角を導出

SEDA-APによる遮蔽効果

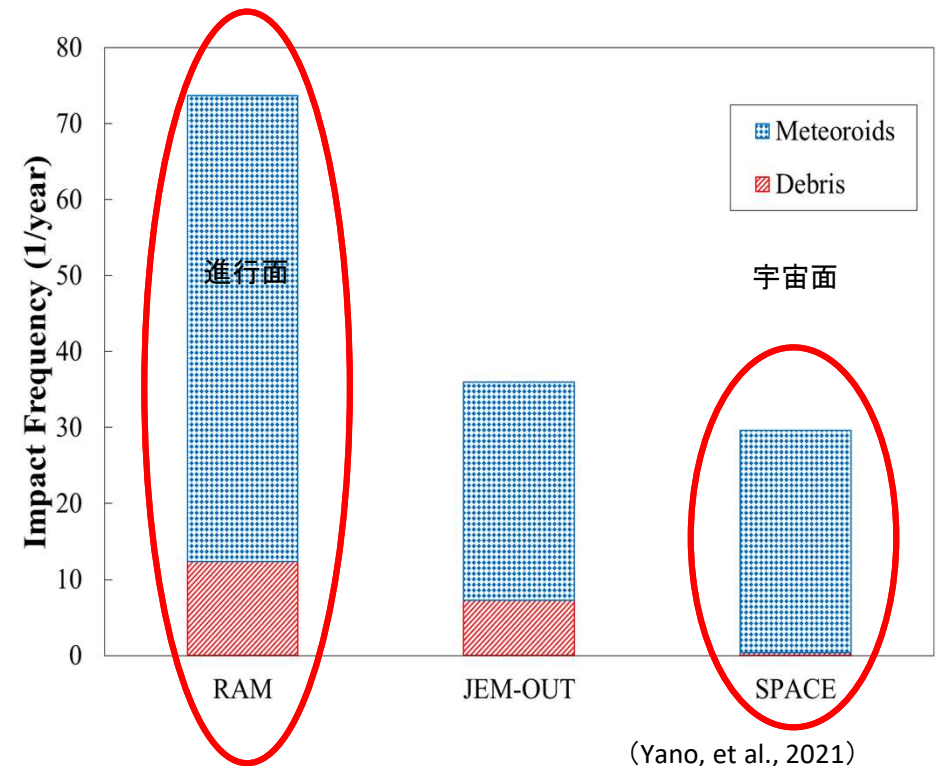
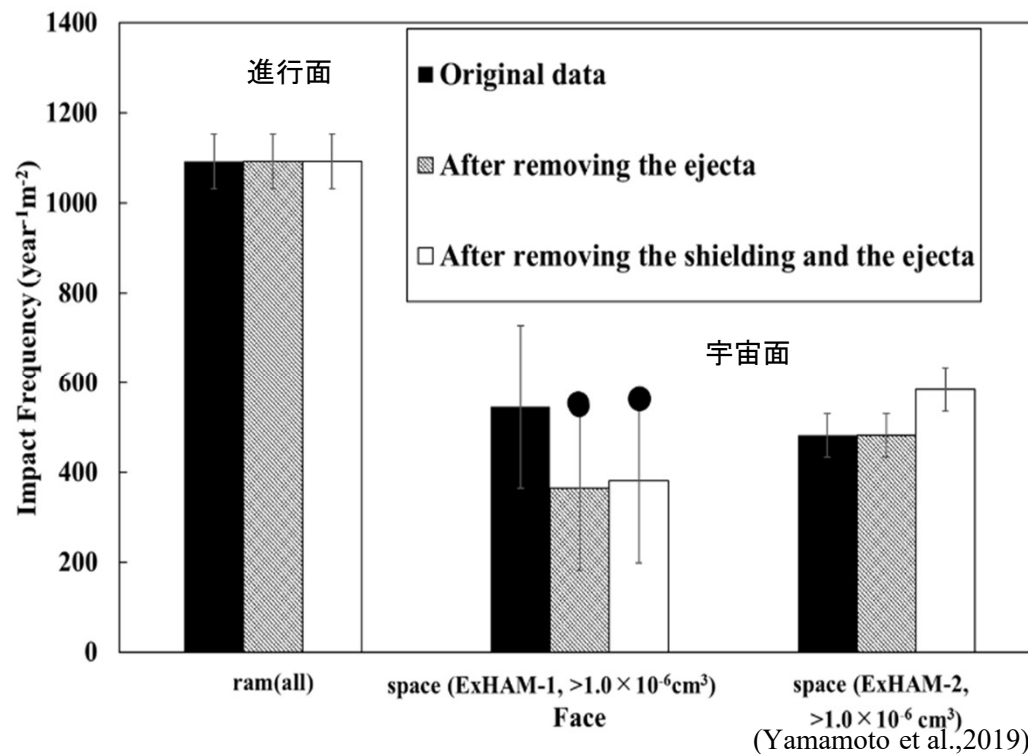


キールからの二次イジェクタ群

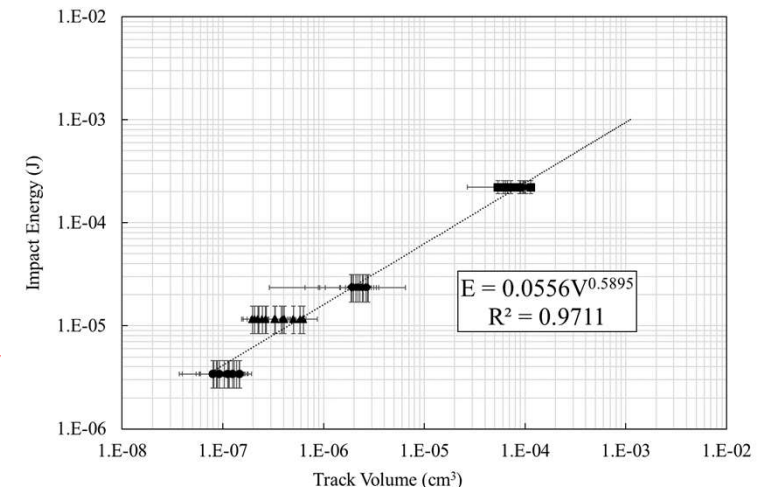


➡ 宇宙面には、(1) ISS 自体が出した低速衝突微粒子、(2) 二次衝突イジェクタ、(3) 物理遮蔽の影響が多く認められる。

二次イジェクタ・遮蔽効果補正後のたんぽぽエアロゲル 実測データと既存微粒子環境モデルの比較

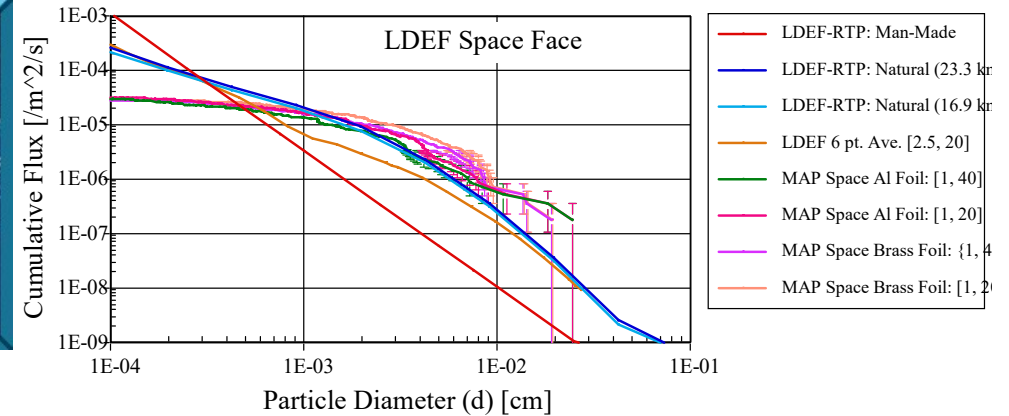
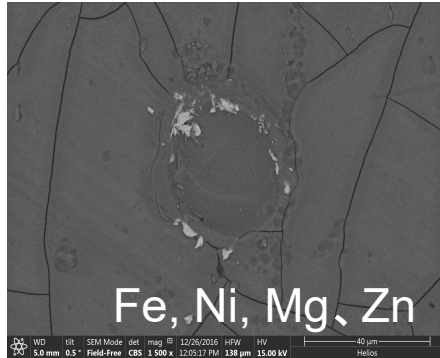
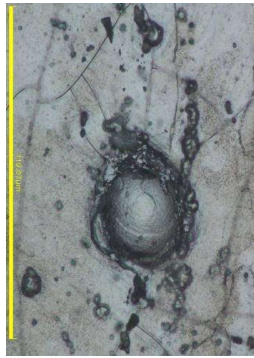


- ➔ 補正後の進行面および宇宙面での微粒子の衝突フラックス値は、**ESAのMASTER、JAXAのTurandotといった既存のLEO環境の固体微粒子環境モデルと整合的であった。**
- ➔ 地上での超高速衝突実験により、**衝突エネルギーと衝突痕体積に正の相関**があることを見出し、衝突フラックスを微粒子サイズの関数とする。



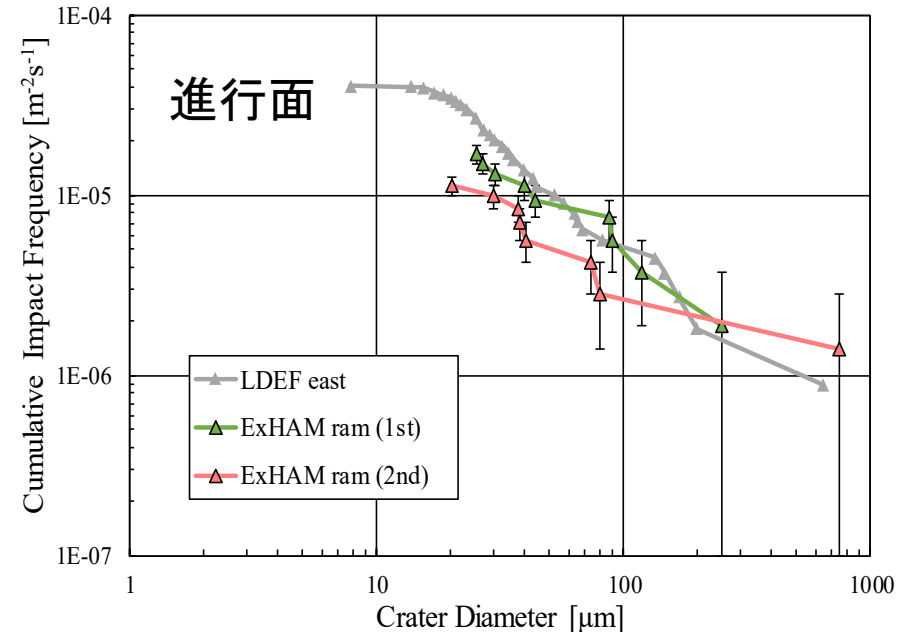
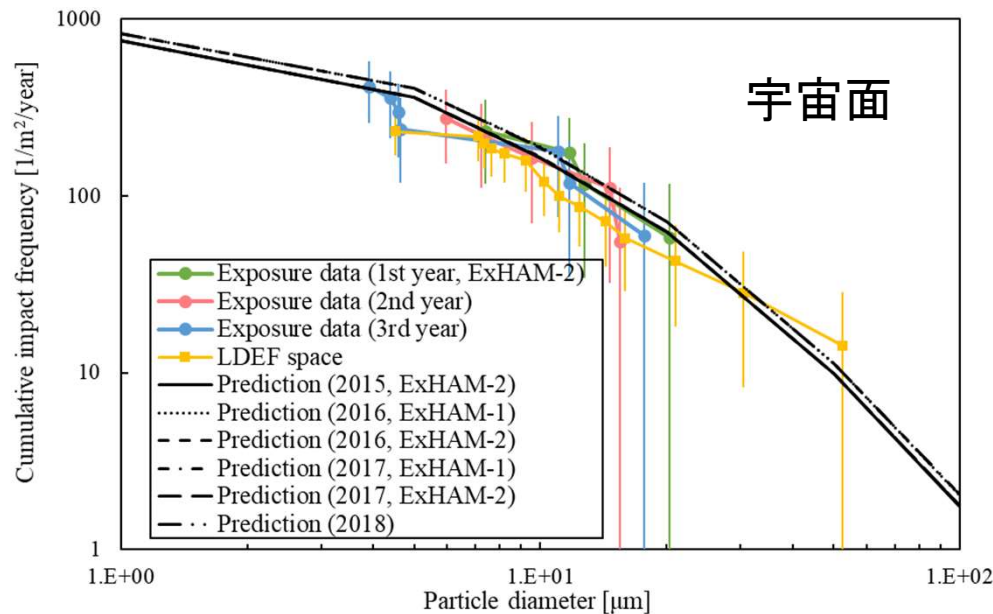
$$E = 0.0556V^{0.5895}$$

たんぽぽアルミフレーム上の超高速衝突痕による 1980年代と2010年代の固体微粒子フラックスの比較



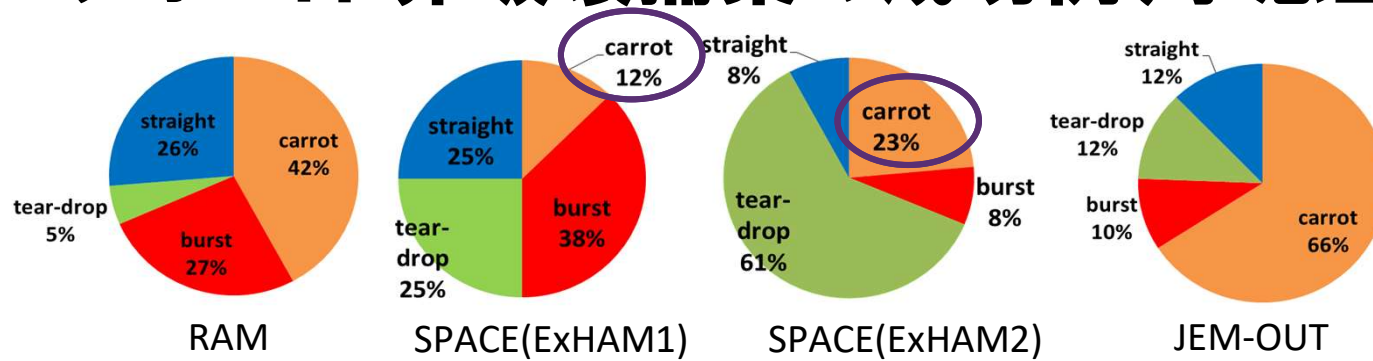
たんぽぽCPアルミフレーム上の
衝突痕とクレーター外縁に残る
宇宙塵起源の元素組成

ISSと同じ地球重力指向三軸姿勢制御のLDEF衛星宇宙面でのアルミ
標的への微粒子衝突フラックス(1984~90年) (Yano, 1995)

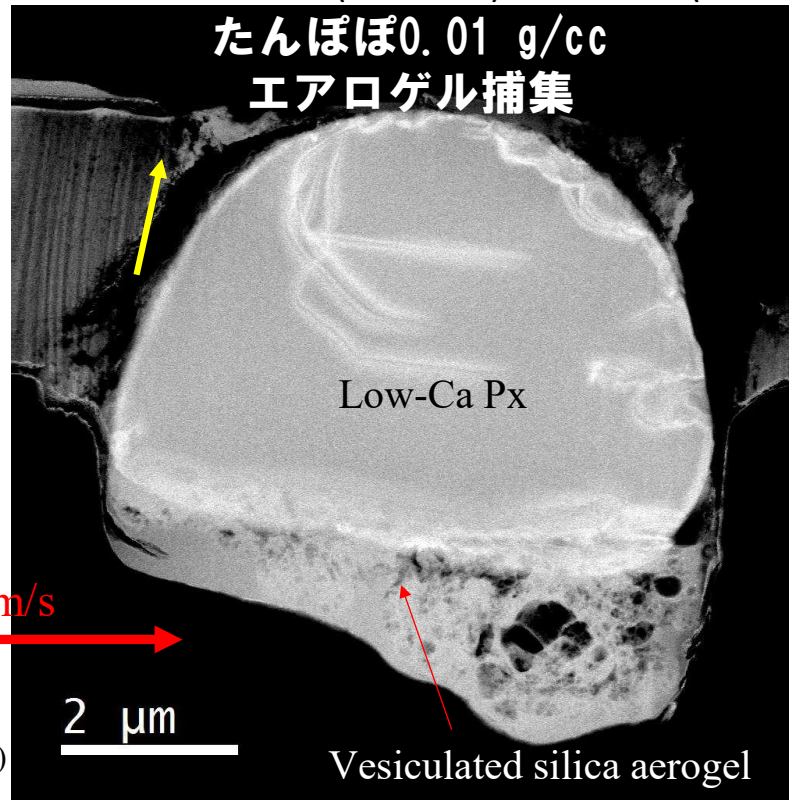


➡ 宇宙面では1984-90年平均と、2015-6年平均、2016-7年平均全てのフラックスが一致する一方、進行面では2015-7年の2年間でフラックス変動が認められた。前者はメテオロイドのフラックスの定常性を、後者は微小デブリのフラックスの経時変化を示唆している。

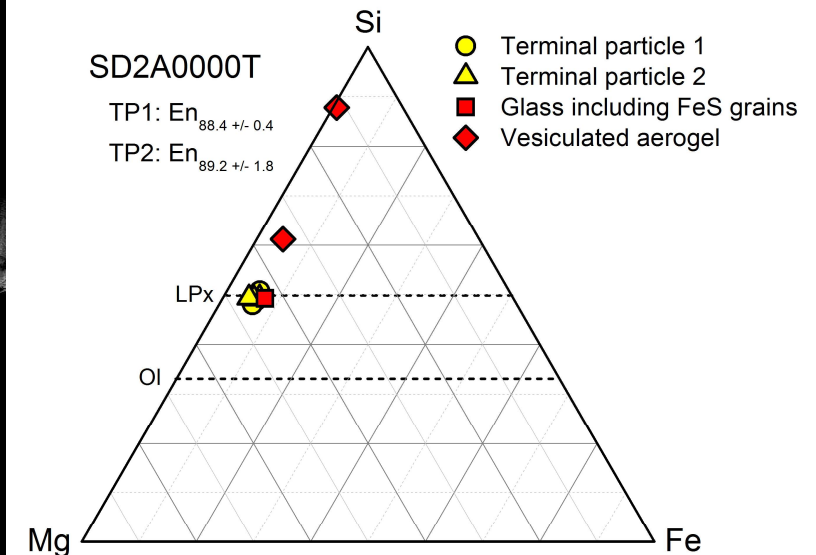
たんぽぽエアロゲルによる メテオロイド非破壊捕集の成功例(小惑星塵)



Hayabusa: Science Issue (2011)



Vesiculated silica aerogel



Tanpopo: (Yano, Noguchi, et al., 2018)

→ 宇宙面のCarrot Track形状衝突痕では、衝突方向はアブレーションで変形し、外縁は溶融エアロゲルと一部混合するものの、**微粒子内部にはLow-Ca Px鉱物結晶が維持されており、平均会合速度10+km/sの小惑星塵の非破壊捕集に成功した。**

たんぽぽ3、4で期待される成果



たんぽぽ
2015-2019
ExHAM1/2

たんぽぽ2
2019-2020
ExHAM1

たんぽぽ3
2020-2022
ExHAM1

たんぽぽ4
2022-
ExBAS

生体関連有機物

* アミノ酸・前駆体

前駆体の
種類と安定性

膜厚の効果
UV遮蔽効果 (->QCC)
UV吸収波長の効果

宇宙起源有機物
分解から合成

* アラニン

VUV光量測定
ジペプチド生成

ジペプチド生成
共重合・鎖長延長

ヌクレオチド合成

微生物

* 放射線耐性菌

生存率
DNA修復系

機能評価
Mnの効果

金属鞘微生物

* 陸棲ラン藻

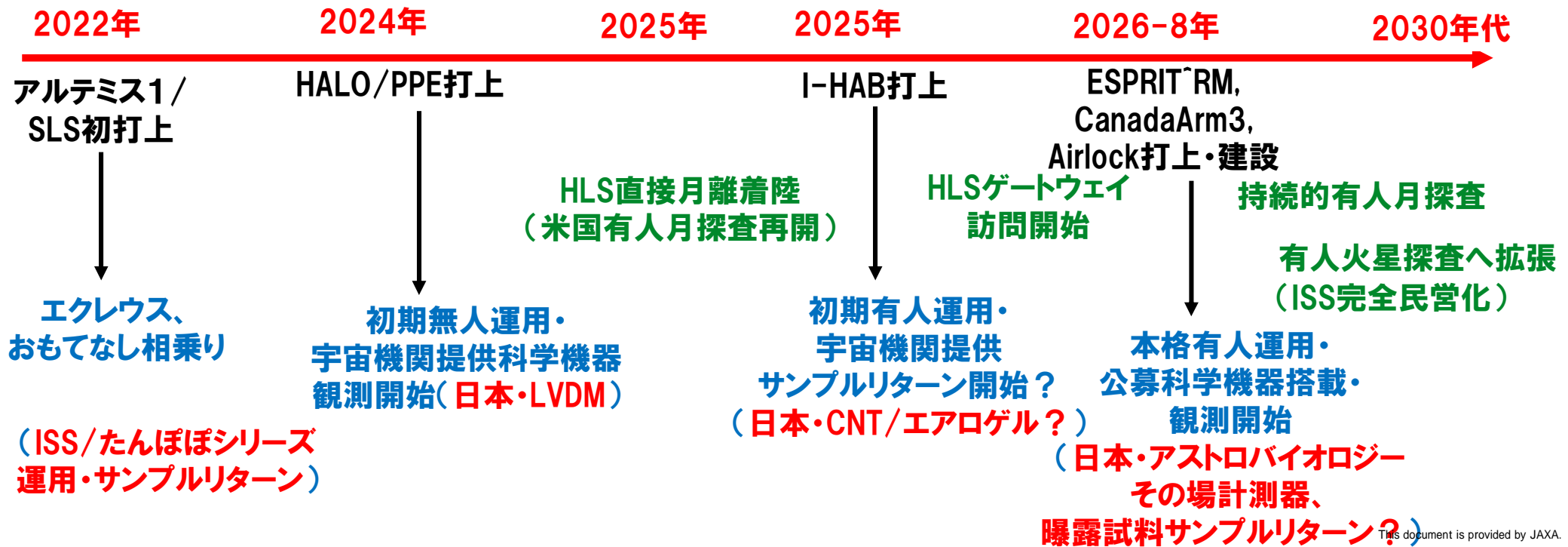
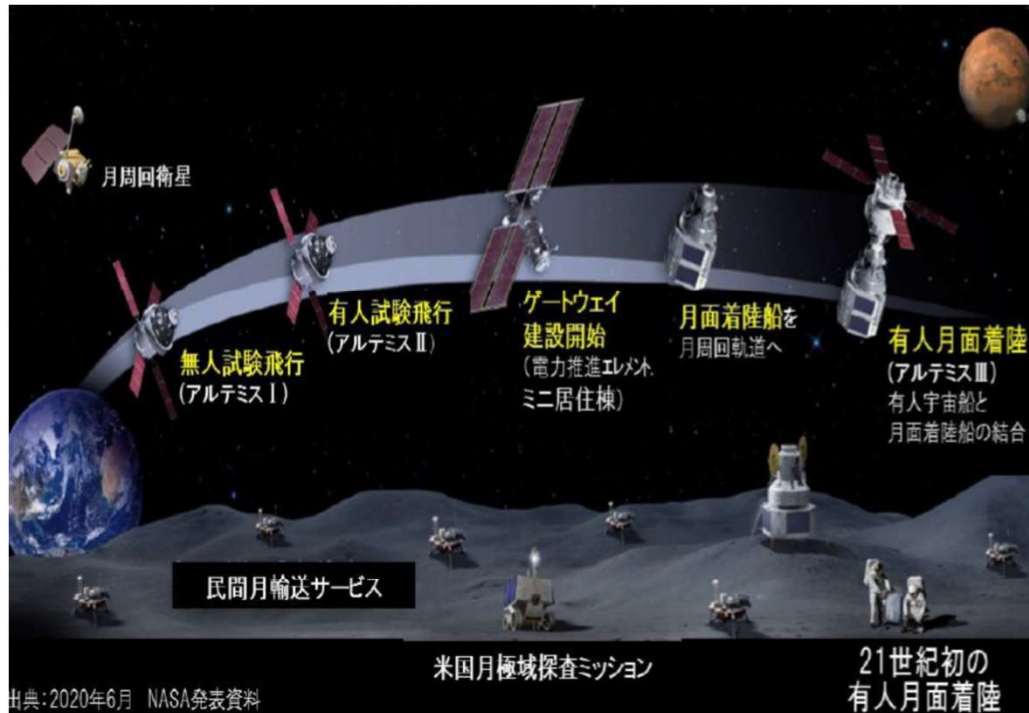
生存率

波長依存性

火星などでの利用
レゴリスの存在
コケへの応用
イネ種子の生存率

生物の宇宙生存
生存率から機能利用

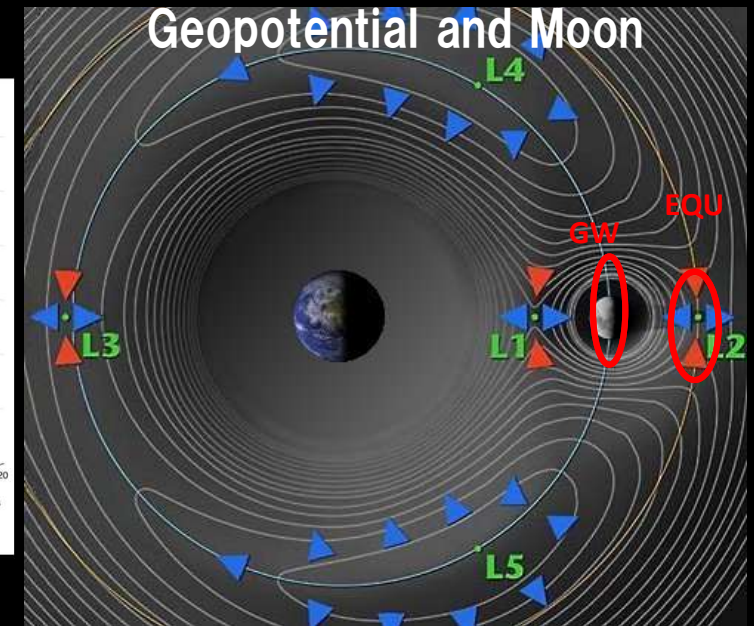
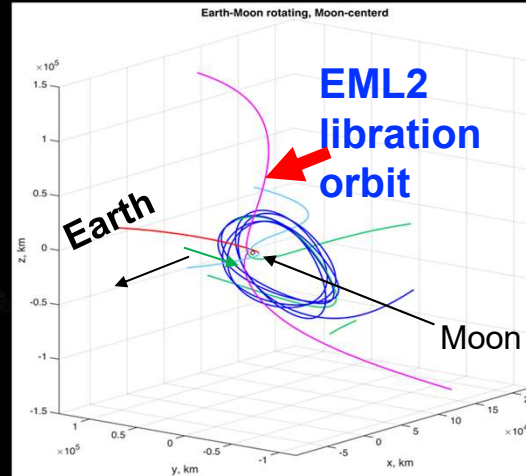
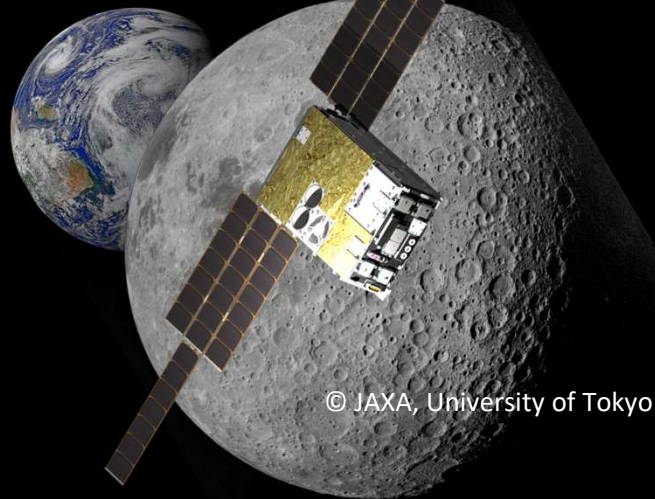
ISS～ゲートウェイ～アルテミス・ロードマップと科学観測機会の展望



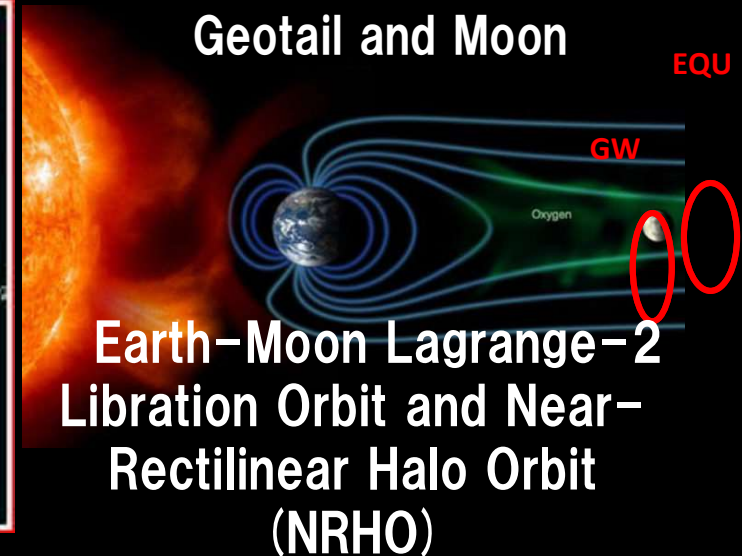
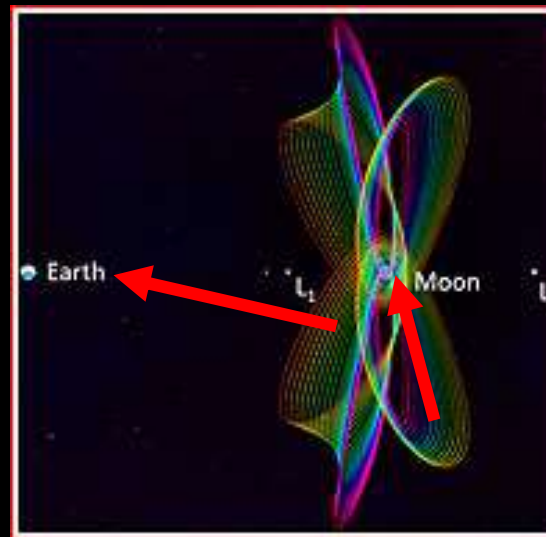
ゲートウェイ上におけるアストロバイオロジー実験の可能性：

最初期（2020年代前半）はその場計測のみ、
有人段階（2020年代後半以降）ではサンプルリターンも

EQUULEUS (2022~) in EML2



Gateway (2024~) in NRHO



ゲートウェイ初期段階で期待される 科学・工学・探査への貢献

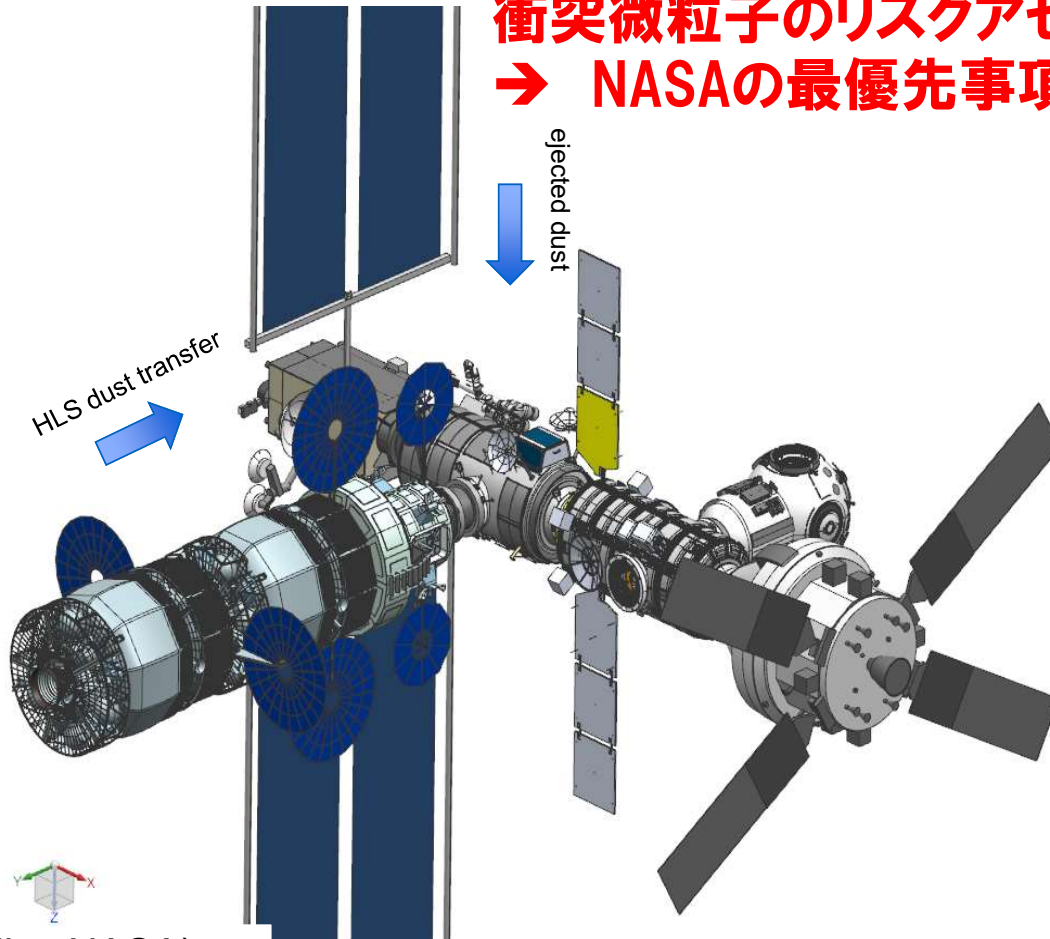


科学： ヴァンアレン帯の外側環境での地球起源生物の生存可能性。スペースデブリが混在しない、宇宙塵のみの地球・月近傍ダスト環境の連続計測・試料採取、など。

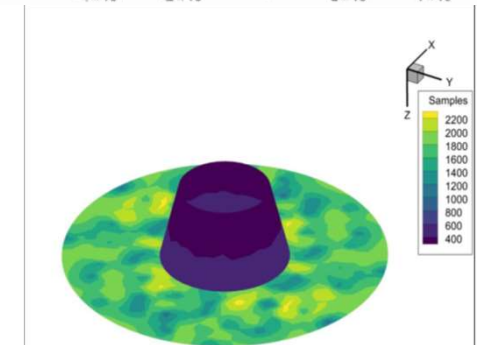
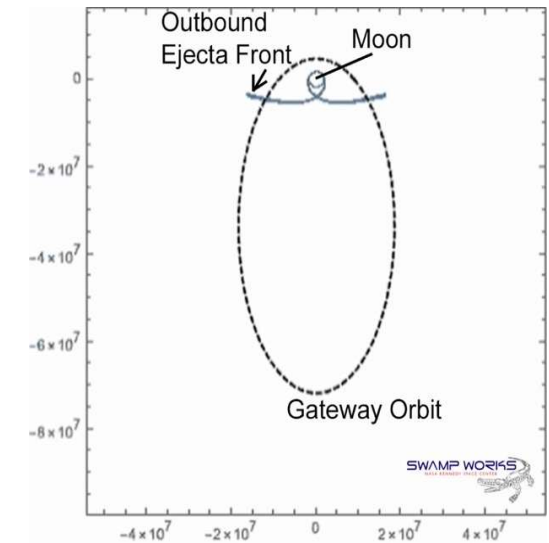
工学： 月面レゴリス環境の近傍軌道への影響評価。

探査： ゲートウェイ, 月面離着陸機等有人システムへの**低速衝突微粒子**のリスクアセスメント。

→ **NASAの最優先事項**



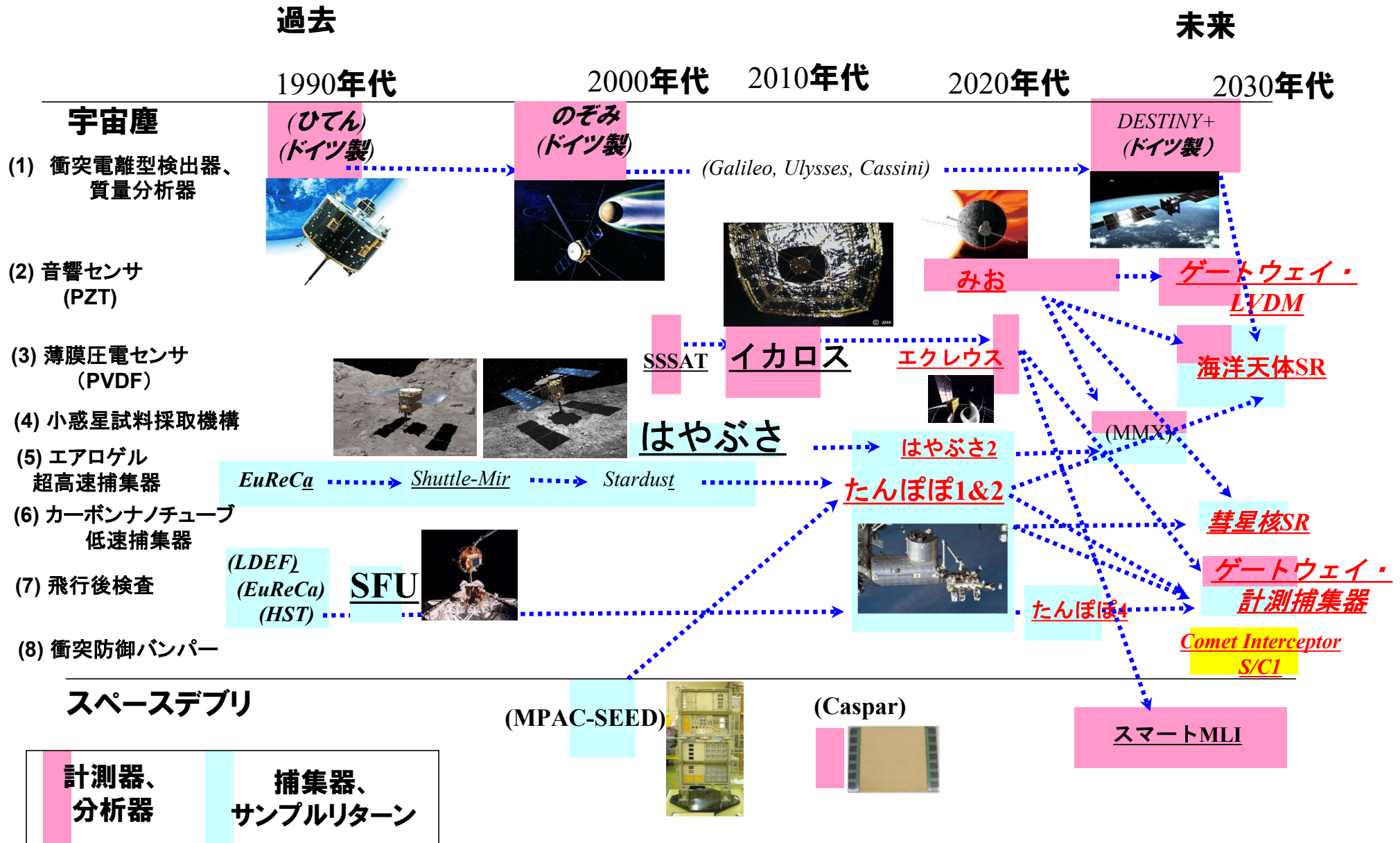
(Credits: NASA)



Gateway dust transfer heat map

This document is provided by JAXA.

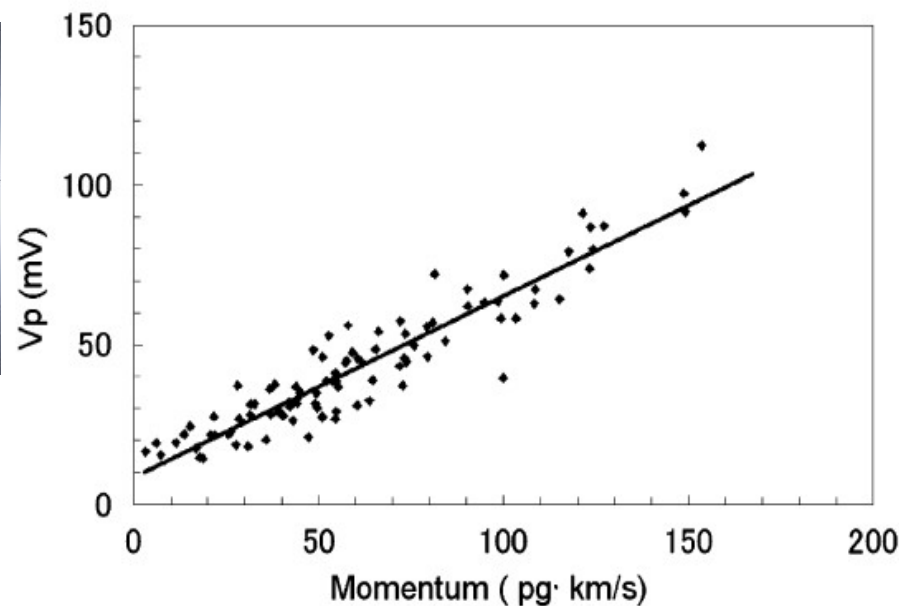
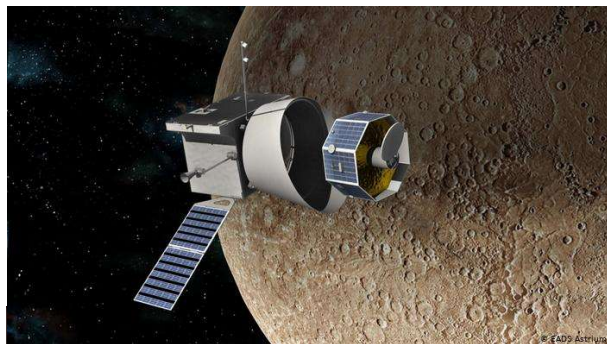
日本の宇宙塵計測・捕集技術の系譜： ゲートウェイへの貢献可能性



(Note: 太字 : 国内開発、下線 : ISAS開発、*斜字* : 国際協力)

(2024年～) LVDM/低速ダストモニタ

NASAの要請に応え、**ベピコロンボ搭載MDMベースのゲートウェイ用低速ダスト計測器**をJAXA国際宇宙探査センターの元で開発し、SORI/PPEモジュール搭載のESA計測機器パッケージ (ERSA) に統合。**ゲートウェイ最初期に、日本が貢献する科学計測機器となる。**またパッシブ実験装置だったたんぽぽシリーズから、その場計測機器の開発へ、**日本のアストロバイオロジー宇宙実験を発展**できる。



Dynamic Range: $10 \sim 10000 \text{ pg} \cdot \text{km/s}$

Max. Event Rate : 1 event/1msec

(e.g.) 5 μm diameter regolith (density 2 g/cm^3) at 1 km/sec impact gives $\sim 130 \text{ pg} \cdot \text{km/s}$ of momentum

The same particle at 100 m/sec impact gives $\sim 13 \text{ pg} \cdot \text{km/s}$ of momentum

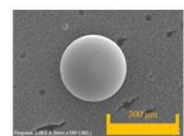
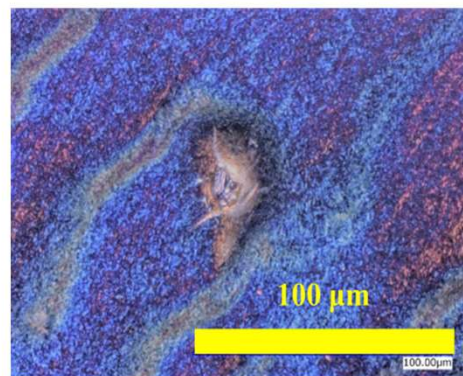
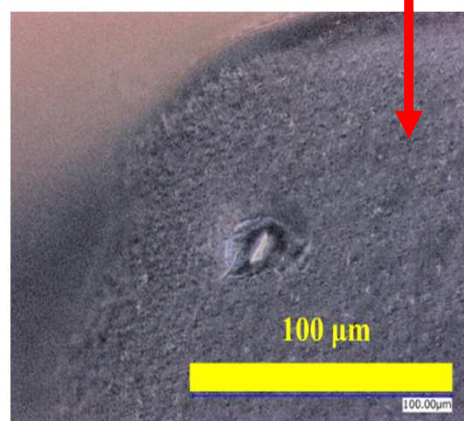
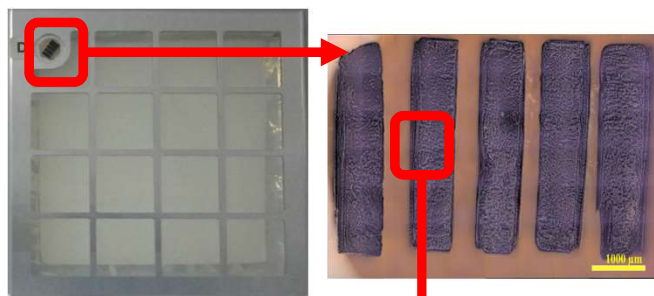
50 μm -size particle at 10 cm/sec impact gives $\sim 13 \text{ pg} \cdot \text{km/s}$ of momentum

(Refer Miyachi, et al., Shibata, et al., Kobayashi, et al.) (Image credits: JAXA/ISAS, ESA, BepiColombo MDM Team)

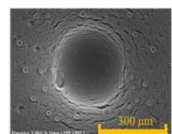
(2025年～?) 試料回収可能時代への発展:

超高速突捕集＝科学主体：たんぽぽエアロゲルを応用

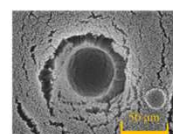
低速衝突捕集＝探査主体：たんぽぽカーボンナノチューブを応用



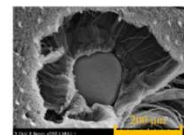
表面捕集 (I)
 $D = 284 \mu\text{m}$, $v = 2.2 \text{ m/s}$



表面反発 (II)
 $D = 345 \mu\text{m}$, $v = 7.7 \text{ m/s}$



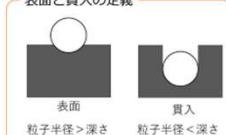
貫入反発 (III)
 $D = 50 \mu\text{m}$, $v = 32 \text{ m/s}$



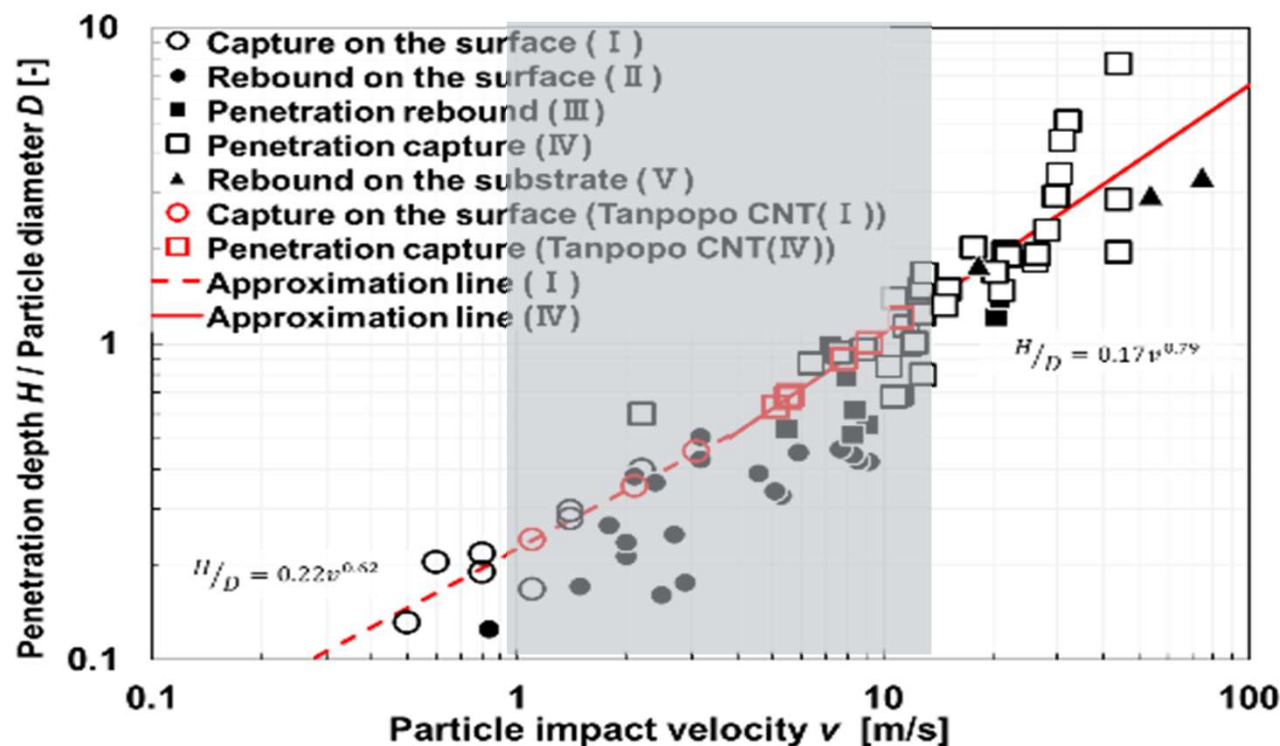
貫入捕集 (IV)
 $D = 203 \mu\text{m}$, $v = 22 \text{ m/s}$



裏面反発 (V)
 $D = 434 \mu\text{m}$, $v = 18 \text{ m/s}$



表面と貫入の定義
表面 粒子半径 > 深さ
貫入 粒子半径 < 深さ



→ たんぽぽ全捕集パネルに設置されたCNTカーペットは、ISS自体やドッキングする宇宙船等が出す低速デブリを捕集しており、地上校正実験の結果より、衝突速度は数m/s～数十m/sオーダーと推定される。

→ 月面離着陸、彗星ランデブー時の低速ダスト捕集に応用可能。

(Serizawa, Yano, et al. 2021)

「我が国のアストロバイオロジー探査戦略2014-2024」

(「アストロバイオロジー宇宙探査の目標・戦略・工程表2019」より)

(1) 日本独自装置の開発を主軸に進める

- 無着陸サンプルリターン装置
- 生命徴候探査顕微鏡
- 高分解能質量分析装置(アミノ酸分析装置)

(2) 国際探査計画へ、独自装置で参画を目指す

- 火星着陸探査
- 氷衛星(海洋天体)探査

(3) 国内の中大型計画へ主体的に参画を目指す。

(4) 小型公募プロジェクトによる特定科学に特化した火星着陸探査, および国際火星有人探査への参画を目指す

→ 「サンプルリターンと生命徴候探査」の二本柱戦略

→ たんぽぽ、ゲートウェイはこの戦略の第一・二歩に位置付けられる。

ゲートウェイ公募段階でのアストロバイオロジー関連 利用実験提案： 8件（2018年段階：山岸明彦先生集計）

宇宙環境（放射線、紫外線、微小重力）利用実験

1. 地球生物の宇宙暴露実験に基づく長期宇宙生存可能性の検証（横堀伸一）
2. 原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の場としての深宇宙ゲートウェイ利用（三田肇）
3. 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験（別所義隆）

月近傍微粒子（宇宙塵）計測・捕集実験

4. 宇宙塵連続計測と定期サンプルリターンによる月近傍固体微粒子環境の解明（矢野創）

月面・地球観測

5. 月面衝突閃光観測から探る彗星・小惑星起源メテオロイドの衝突頻度と含有有機物の月面生存環境の評価（阿部新助）
6. 月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物を検出する（中川広務）
月から地球散逸大気をみる（中川広務）

宇宙探査技術開発

7. 微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明（登尾浩助）
8. 惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発（鈴木庸平）

2020年代以降のアstroバイオロジーの諸課題と ISASの貢献可能分野例、たんぽぽ&ゲートウェイの活用機会

アストロバイオロジーの諸課題	天文観測	地上・宇宙実験	太陽系探査
fp: 惑星系形成	惑星系円盤分光、 黄道光構造分光	ガス=>塵生成・化学進化 (たんぽぽシリーズ 、 μG実験)	小天体探査(はやぶさ2 # 、 LUCY、Psyche、彗星核サンプルリ ターン)、宇宙塵計測(ゲートウェ イ 、DESTINY+、MMX)
ne:ハビタビリティ	系外惑星観測、 Cold Jupiter+衛星探索、 プルーム観測(ポストひさき)	火星アナログ環境、海洋天 体内部海底アナログ環境	NASA海洋天体探査(エウロパク リッパー、 ドラゴンフライ)、ESA/ J UICE 、中国木星衛星探査
fl: 生命前駆物質	恒星間天体観測 (オウムアムア、ボリソフ彗星 等)	宇宙有機物曝露&宇宙塵 採集・分析(たんぽぽシリー ズ 、 ゲートウェイ)	小天体探査(はやぶさ2 # 、彗星 核サンプルリターン)試料分析、 新発見彗星/恒星間天体探査 (Comet Interceptor)
fl: 生命誕生	N/A?	合成生物学、極限環境生物 探索(大気球微生物採取)	N/A?
fl: 生命伝播	恒星間天体観測?	地球微生物宇宙曝露(たん ぽぽシリーズ 、 ゲートウェイ)、 地球エアロゾル射出機構	月面、火星での「地球隕石 (Earth Relic)」探索(国際宇宙探査)
fl: 生命探索 (地球共通祖先)	N/A?	火星隕石分析	火星生命探査顕微鏡 、 火星サンプルリターン
fl: 生命探索 (The 2 nd Genesis)	SETI電波観測	深海生命圏探索 温泉生命探索	海洋天体プルーム試料分析 、 Starshot Breakthrough



どうもありがとうございました

謝辞:

科研費
KAKENHI



自然科学研究機構

アストロバイオロジーセンター