

はやぶさ2 サンプラーで めざすサイエンス

－ サンプラー現状報告 －

橘 省吾¹, 澤田 弘崇², 岡崎 隆司³,
高野 淑識⁴, 中村 智樹⁵, 岡本 千里²,
矢野 創², 唐牛 譲², 石橋 之宏²,
安部 正真², はやぶさ2 サンプラーチーム

¹北大理 ²JAXA ³九大理 ⁴JAMSTEC ⁵東北大理



「はやぶさ2」が解く太陽系のなりたちと進化

太陽系始原物質の科学は（1）太陽系史をそれ以前の母分子雲や銀河での物質進化史につなげ、（2）初期太陽系から惑星誕生までの化学進化を追うことをめざす。

近年の始原物質研究の進展のひとつに地球外有機物研究がある。Dや ^{15}N に濃集した有機物が発見され、分子雲や初期太陽系円盤外縁部起源の有機物だと考えられている。また、Wild2彗星有機物は熱変成が進んでおらず、より始源的である可能性が示されている。これらの有機物は低温の化学反応を追うことが可能な物質である。さらに、O, C, NはH, Heに次いで多い元素であり、近年、CHON系ガスと原始星進化との関連も調べられている。また、ALMA部分運用が始まり、CHON系ガス分子種や同位体組成の分布の高空間分解能観測が期待される。CHON系固体物質から得る情報は、天文観測によるガス情報とあわせ、（1）のサイエンスが推進されることが期待できる。

微惑星で液体の水が促進した有機物の化学反応の証拠も見つかっている。始原隕石中アミノ酸のL体過剰と隕石の水質変成の程度との相関の可能性が指摘されている他、同一隕石において、水質変成が進んだ岩片ほど、同位体過剰をもつ有機物の量が少ないという報告もある。小惑星で水的作用が地域的または時間的に異なった可能性を示唆するものである。小惑星での有機物の多様化は、地球に有機物がもたらされる前の最終進化といえ、その解明は、初期太陽系円盤→微惑星→地球という流れのなかで、惑星・生命材料物質の変遷を辿るという（2）のサイエンスに対応する。

CHON系物質（特に有機物）は分子雲から原始惑星系円盤、小惑星までの熱過程において、相変化することで様々な固体をつくり、長期間にわたる広い温度領域のイベントのトレーサーとなりうるが、その性質ゆえに長期間のプロセスが混在し、解読を難しくしている。さらに、有機物は多様な化学組成を持ち、条件の変化が構造、官能基、化学組成、同位体など種々に連続的に変化するため、鉱物学・岩石学の手法の適用が困難という問題もある。CHON系物質の多様化に重要な水も小惑星内を移動し、鉱物や有機物に痕跡を残しながら失われていくため、解読を困難にする。

この問題の解決に重要なのは、**プロセスが起きた場の情報を得ること**である。地球外物質科学において、地質学的情報の欠落は古くから問題であったが、CHON系物質を基軸とした次世代地球外物質科学には場の情報を得ることは特に重要である。それを可能とするのは、サンプルリターン探査である。**リモセン観測で天体スケールでの水や有機物の分布をさぐり、回収試料の分析データから小惑星プロセスを解読する。**

初期太陽系を結節点に分子雲，銀河へと時間を遡り，また地球や海，生命と進化を辿るのに適した小惑星は，炭素質コンドライトとの関連が示唆されている**C型小惑星**である．炭素質コンドライトは**小惑星での大規模な熱変成を受けておらず，小惑星以前の太陽系の歴史がよく保存**されている．また，炭素質コンドライトはメインベルト小惑星の大半を占めるC型小惑星起源と考えられるにも関わらず，隕石としては稀少である．軌道もしくはサンプリングバイアスのためと考えられるが，隕石コレクションの内，初期太陽系史を概観できる試料は実は少ない．宇宙塵には始源物質がより保存されている場合が多いが，小さなサイズのためにどのような天体でどのようなイベントを経験したのかについての理解が困難である．炭素質コンドライトには水質変成を受け，かつ有機物が存在するものもある．これらに類似した試料が回収されれば，小惑星内での物質進化，特に有機物の進化を明らかにできることが期待される．

「はやぶさ」サンプルリターン計画で，隕石と小惑星の関係が明らかになったが，イトカワは熱変成によって，小惑星以前の記録を失っていた．スターダスト探査機はWild2彗星から塵を回収したが，揮発性物質の回収までには至っていない．彗星からの揮発性物質回収は，地球外物質分析が太陽系を越え，初期太陽系円盤→太陽系母分子雲→銀河へと時空間を遡り，銀河の物質科学へと向かう流れであり，将来探査計画の重要なターゲットとなる．一方，「**私たちはどこから来たのか**」を考える人類が「地球」「海」「生命」の材料を求め，それらが生まれた場の進化を理解したいと考えるときには，**始源的な小惑星がターゲット**となる．C型小惑星は地球の揮発性元素の供給源であった可能性もある．**C型小惑星がどのような物質でつくられ，どのような歴史を経たのか，有機物がある場合には，有機物が地球にもたらされる前にどのような進化を遂げたのか**を解明することは大きな意義のあるサイエンステーマである．

はやぶさ2 がめざす**近地球型小惑星1999 JU₃**はC型小惑星に分類され，小惑星での熱による変成の程度が小さいことが期待される．水質変成を受けているか，有機物が存在するかについて，地上観測から結論づけることは現状難しいが，**現在の探査技術で往復探査が可能な小天体のなかで含水鉱物や有機物の回収がもっとも期待される小惑星**である．1999 JU₃ からのリターンサンプルの分析から，「**初期太陽系で物質がどのように進化し，地球や海，生命の材料となったのかに関する物質科学的制約を与える**」ことをめざす．近地球型小惑星であることも考慮し，**小惑星表面での熱過程や表面地質学，小惑星軌道進化への貢献**もめざす．

リターンサンプルのサイエンス

銀河・分子雲	円盤	微惑星（母天体）	メインベルト小惑星	近地球型小惑星
恒星内元素合成 星周ダスト形成 銀河化学進化(年代) プレソーラー粒子 分子雲有機物進化 分子雲有機物 D, ¹⁵ N 濃集, 構造	円盤高温過程・年代 CAI, コンドリュール, メタル, O同位体 母天体形成範囲・過程 円盤内物質循環 バルク組成, O同位体, 金属元素同位体, 組織 円盤有機物進化 構造・組成・同位体	水質変成・年代・条件 含水鉱物, 組織, Mn-Cr 年代, O同位体, 組成 熱変成・年代・条件 共存鉱物, 組織, 温度, Al-Mg, Pb-Pb年代 有機物多様化 バルク組成, 官能基存 在度, アミノ酸 Lee, CHON 同位体	衝撃変成 溶融脈, 高圧鉱物, K-Ar 年代 ラブルパイル形成年代 GCR生成核種 小惑星内部構造 試料バルク密度	宇宙風化・年代 宇宙風化層, 粒子表面, SW希ガス 小惑星表面地質活動 複数表面の宇宙風化 度, 粒子形状 表面熱変成 変成度+SCR, GCR年代 NEA年代 SCR生成核種 (¹⁰ Be, ²⁶ Al, ³⁶ Cl, ⁴¹ Ca, ⁵³ Mn, ⁸¹ Kr.) 相対存在度
母天体サイズ・母天体プロセス・年代 円盤内物質進化 (移動, 微惑星形成)・年代 上記項目に関する回収試料内／採取地点内のバリエーション				
物質進化過程の普遍性・特殊性 OSIRIS-REx 回収試料・リモセン観測との比較, 隕石・IDPとの比較				

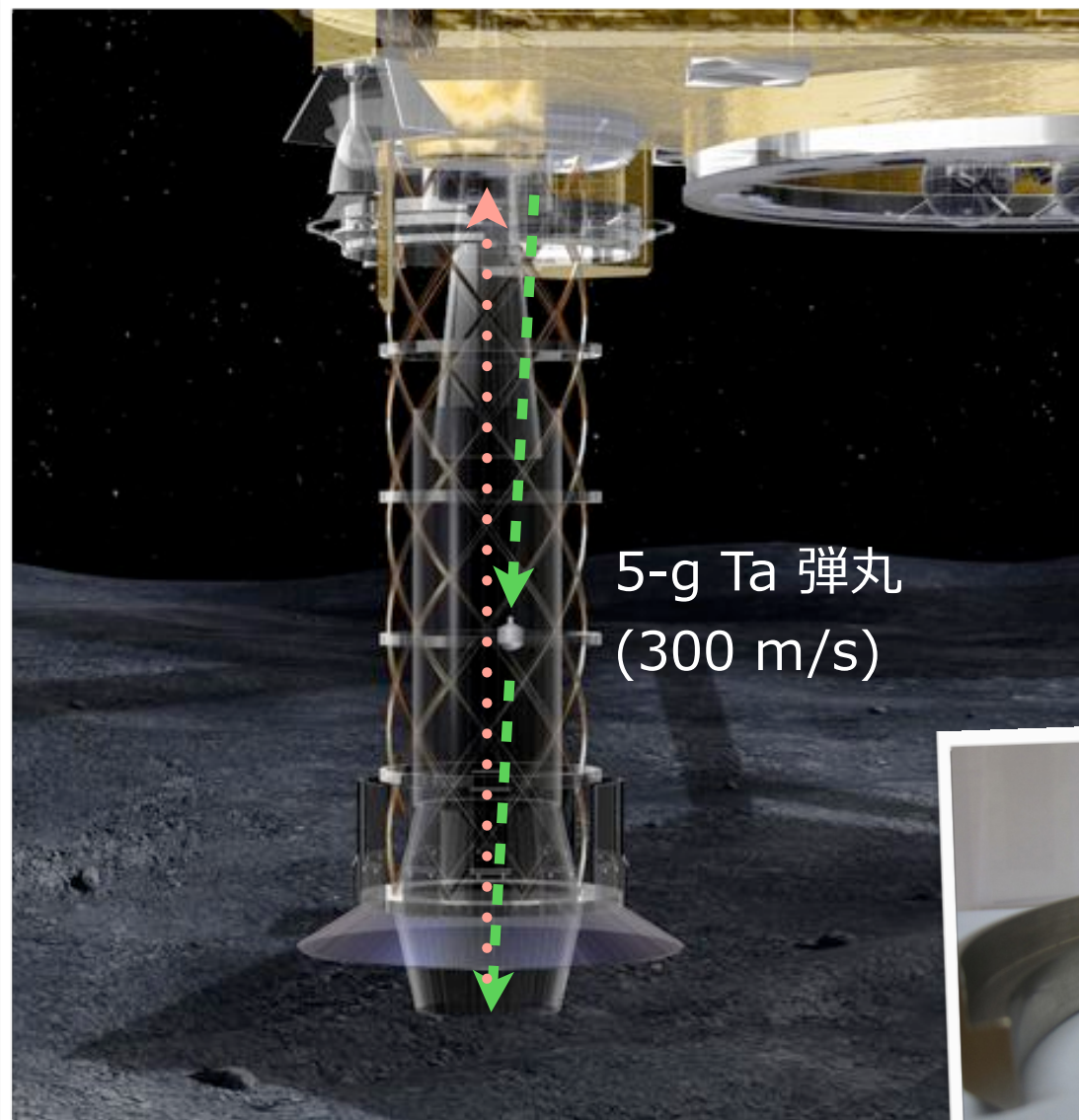
サンプラーへの要求

科学目的	
回収試料のサイエンス	
1	微惑星（1999JU3 元天体）での鉱物・水・有機物相互作用：生命材料物質の最終進化
2	原始太陽系円盤での高温物質形成・有機物進化
3	分子雲での有機物形成：低温環境を記録するCHON系物質
4	銀河の化学進化：プレソーラー粒子・ビッグバン以降につくられた主金属元素 CON
5	太陽系史にわたる小惑星活動史（衝突、宇宙線照射）および近地球型小惑星表面活動
6	太陽系誕生～微惑星～NEAまで全期間の時間軸

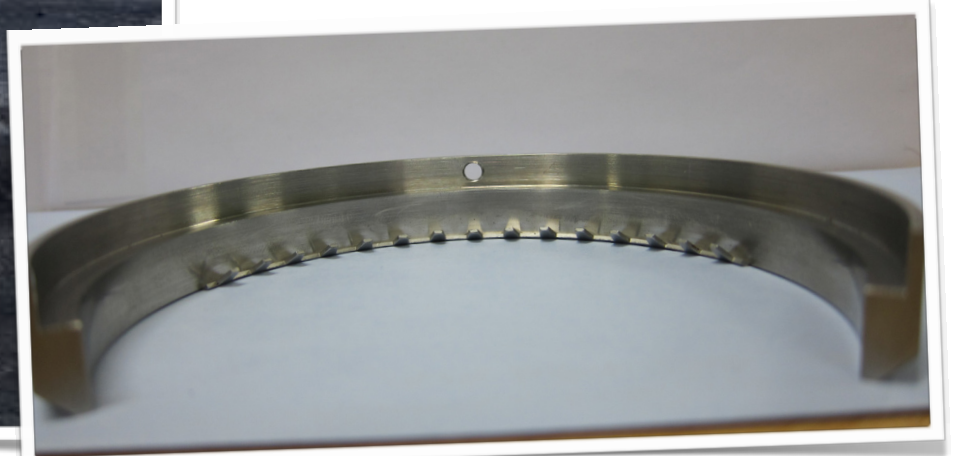
ミッション要求	
試料採取要求	
1	C型小惑星表面の試料を100mg以上採取する
2	試料サイズは数十 μm ~mmサイズをノミナル
3	組成が異なると思われる複数の表面から採取
4	複数の表面から採取したサンプルを可能な限り混在させず、区別して捕獲
5	過度な熱負荷を与えずに採取
汚染管理要求	
6	製造過程から打ち上げまでのコンタミを管理、モニタできること
7	打ち上げから帰還までのキャッチャおよびコンテナ内のコンタミ環境をモニタできること
8	試料接触の可能性のある部品の化学組成・宇宙環境耐性が既知であること
揮発性物質採取要求	
9	カプセル回収後、速やかにコンテナから直接ガスを採取できるようにすること
10	コンテナは大気圧に対し、リーク量が $<1\text{Pa}/100\text{時間}$ であること
キュレーション要求	
11	コンテナ内試料室は地上キュレーションが容易におこなえる構造・表面状態であること

システム要求	
運用要求	
1	リモセン結果に基づき、地質条件の異なる3箇所からのサンプリング
2	折り返しサンプリング方式での回収試料収納のための減速
3	ONC-W1によるサンプリング地点の詳細画像（1-2 mm/pix）撮影
4	リモセン機器による全球規模マッピング（サンプリング前）
5	リモセン機器によるサンプリング地点観測（ $<1\text{m}/\text{pix}$ ：着陸精度以下）
6	ランダーによる着陸地点近傍（着陸地点類似箇所）表面撮影（ $<1\text{mm}/\text{pix}$ ）

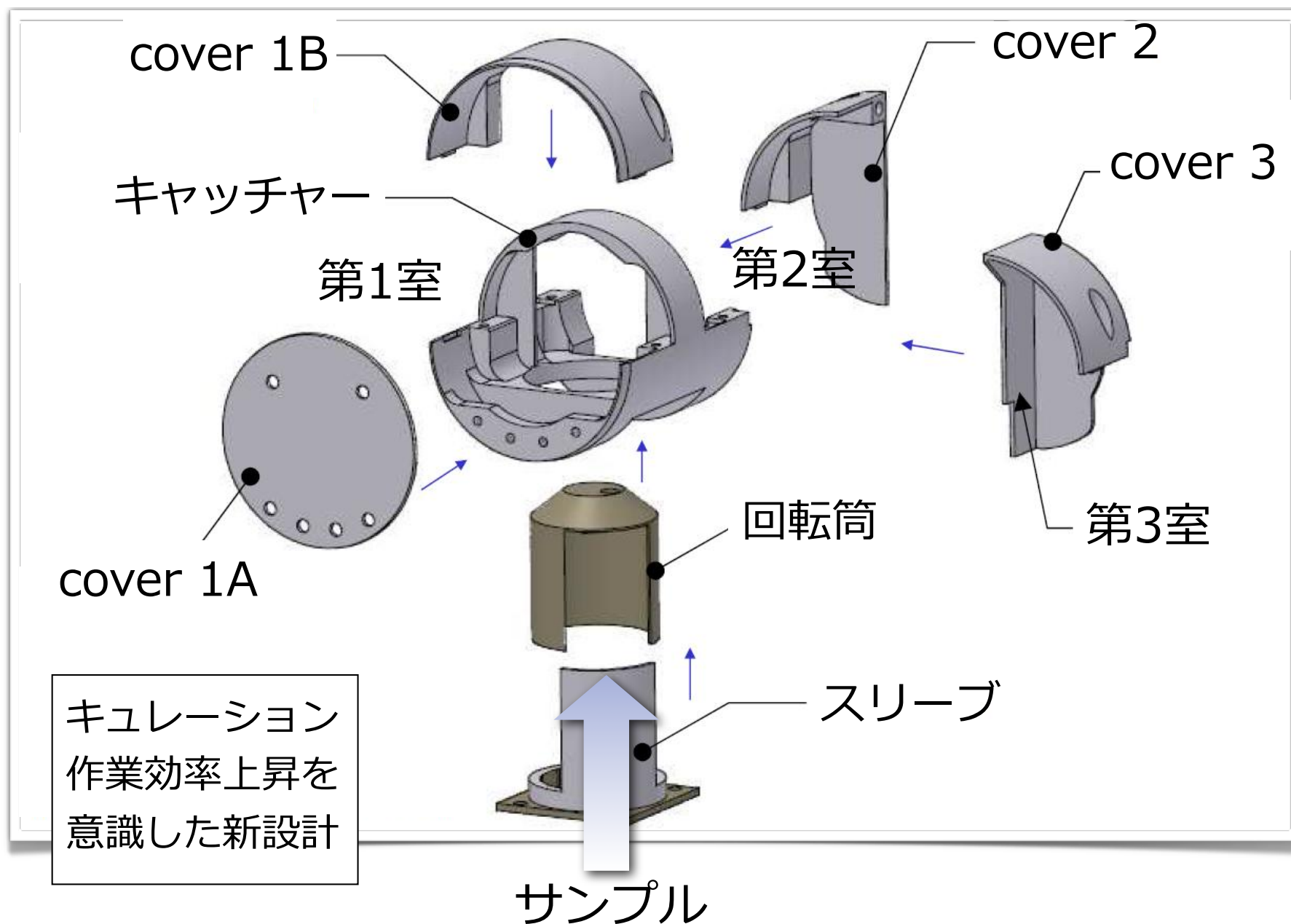
サンプラー：試料採取



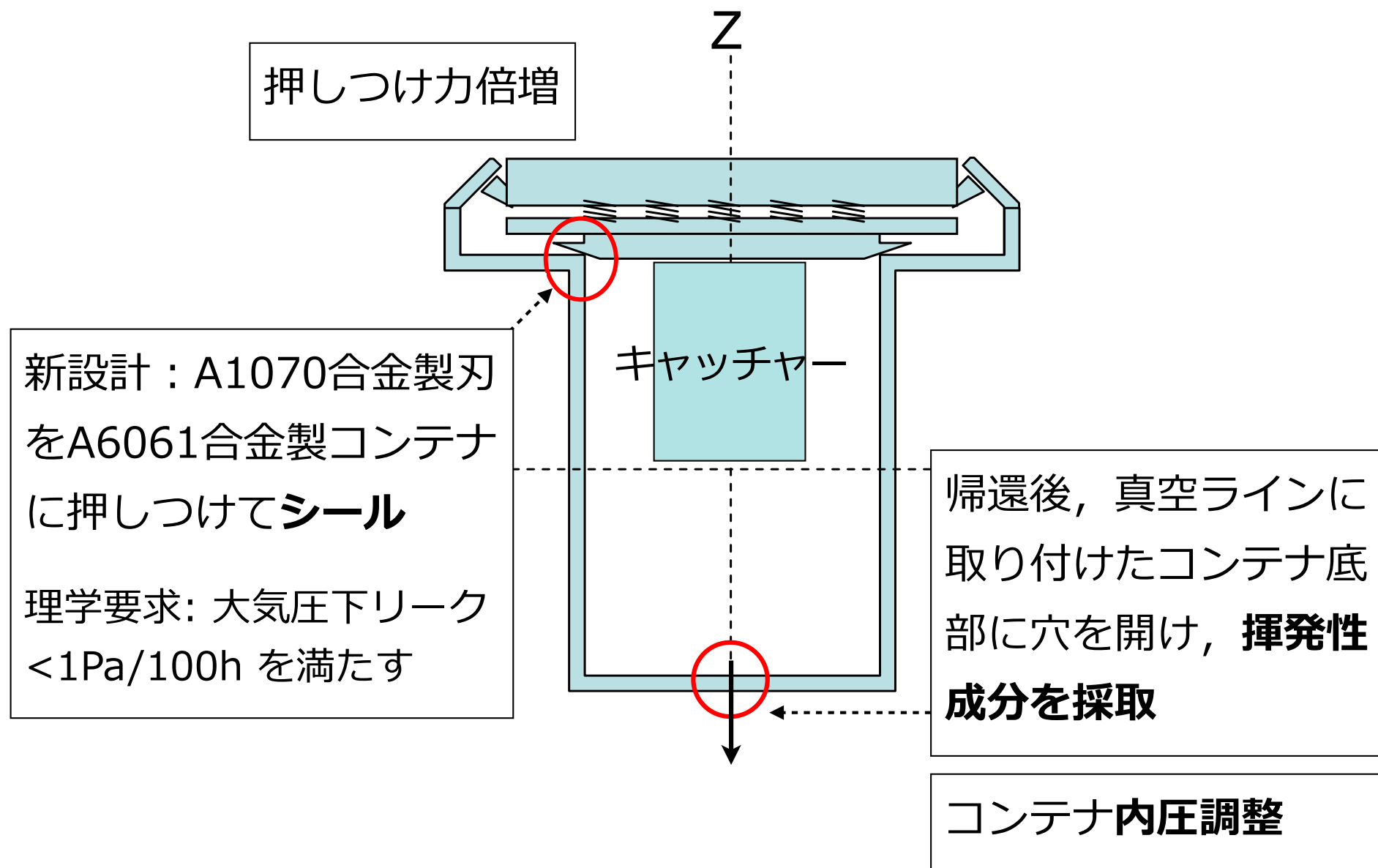
- はやぶさ方式を踏襲
- ミッション要求:
総量 100 mg
- ホーン部先端の折返部
によるサンプリングを
新規追加



サンプラー：試料収納



サンプラー：揮発性物質保持



サンプラー現状 [1]

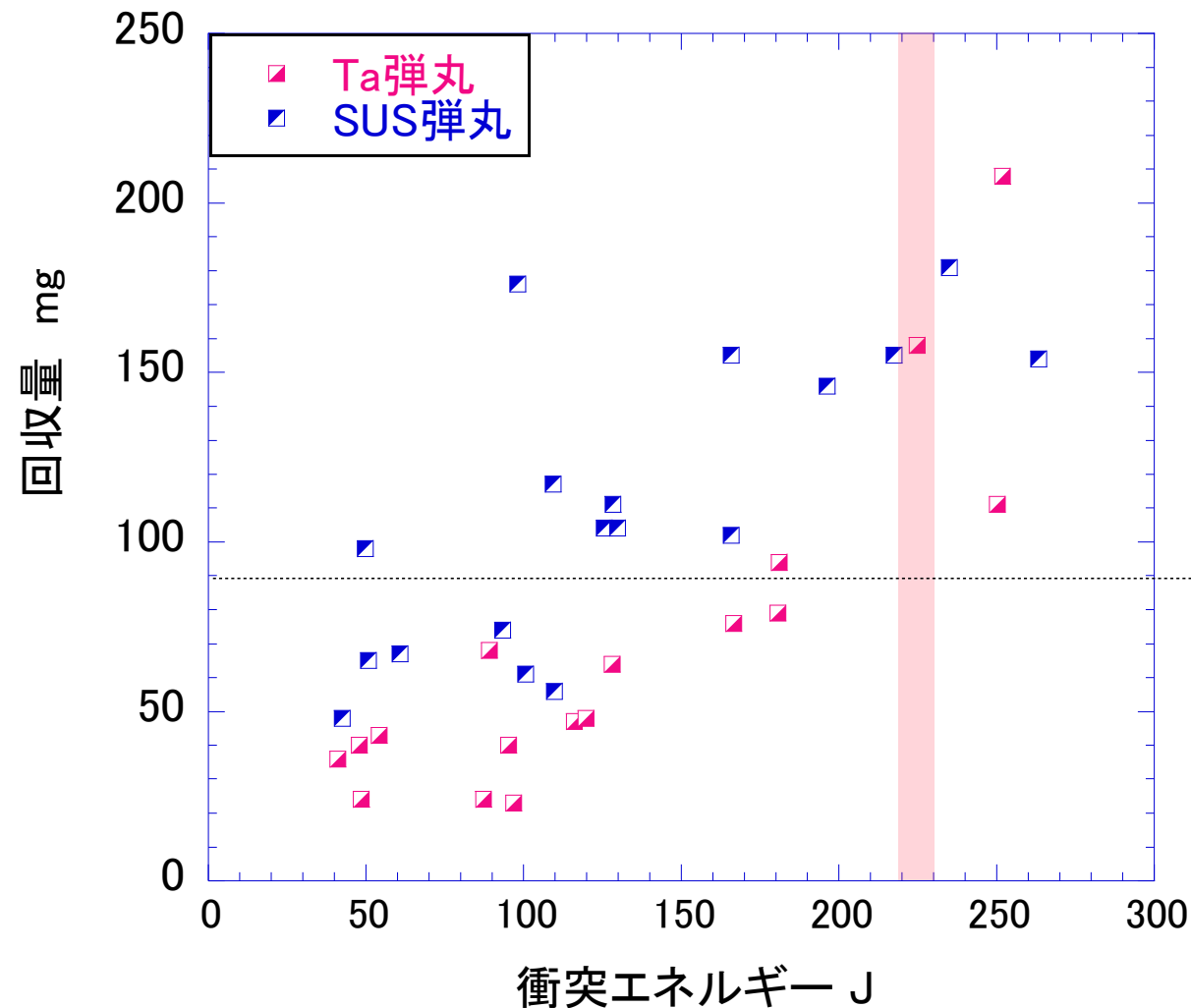
✓ FM総合試験内でのサブシステム試験終了
サンプラーハードウェア完成

✓ サンプラ洗浄・保管 [汚染**軽減**]
環境モニタ [汚染**把握**]

- ・キュレーション施設にて洗浄・打ち上げまで保管
- ・一啗み試験時コンタミクーポン観察
炭素系粒子 ≫ 無機物粒子（洗浄作業で除去可能）
- ・コンタミクーポン保管
（キュレーション・初期分析まで）

サンプラー現状 [2]

✓ 1/1スケール [1G] プロジェクトタ試験

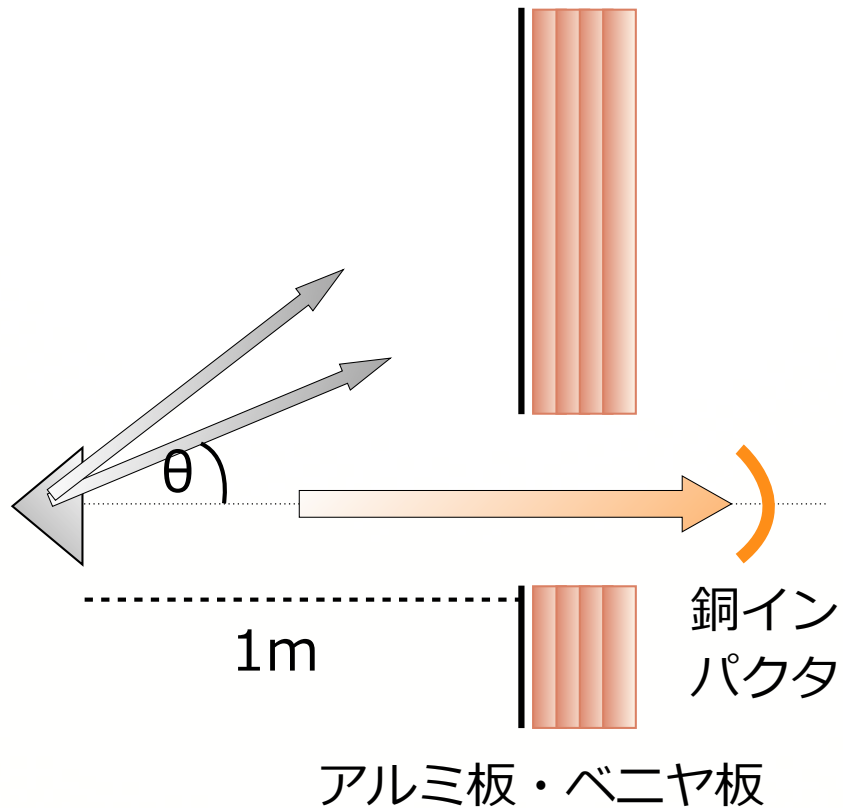


1 mm ビーズ
1G 条件で回収量：
>100 mg

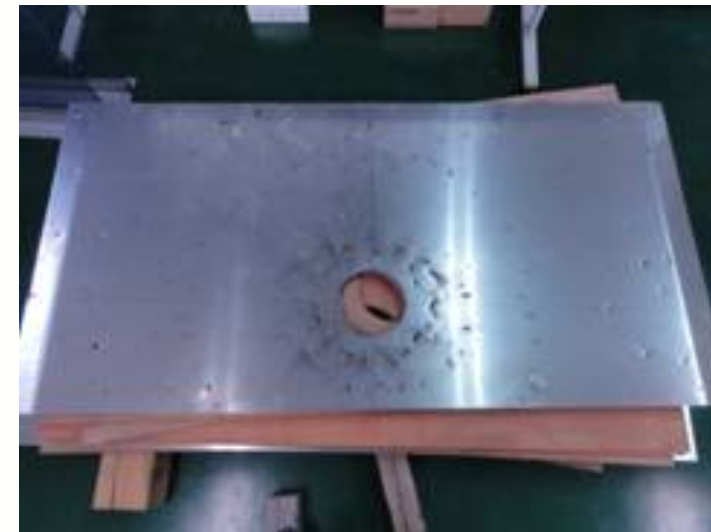
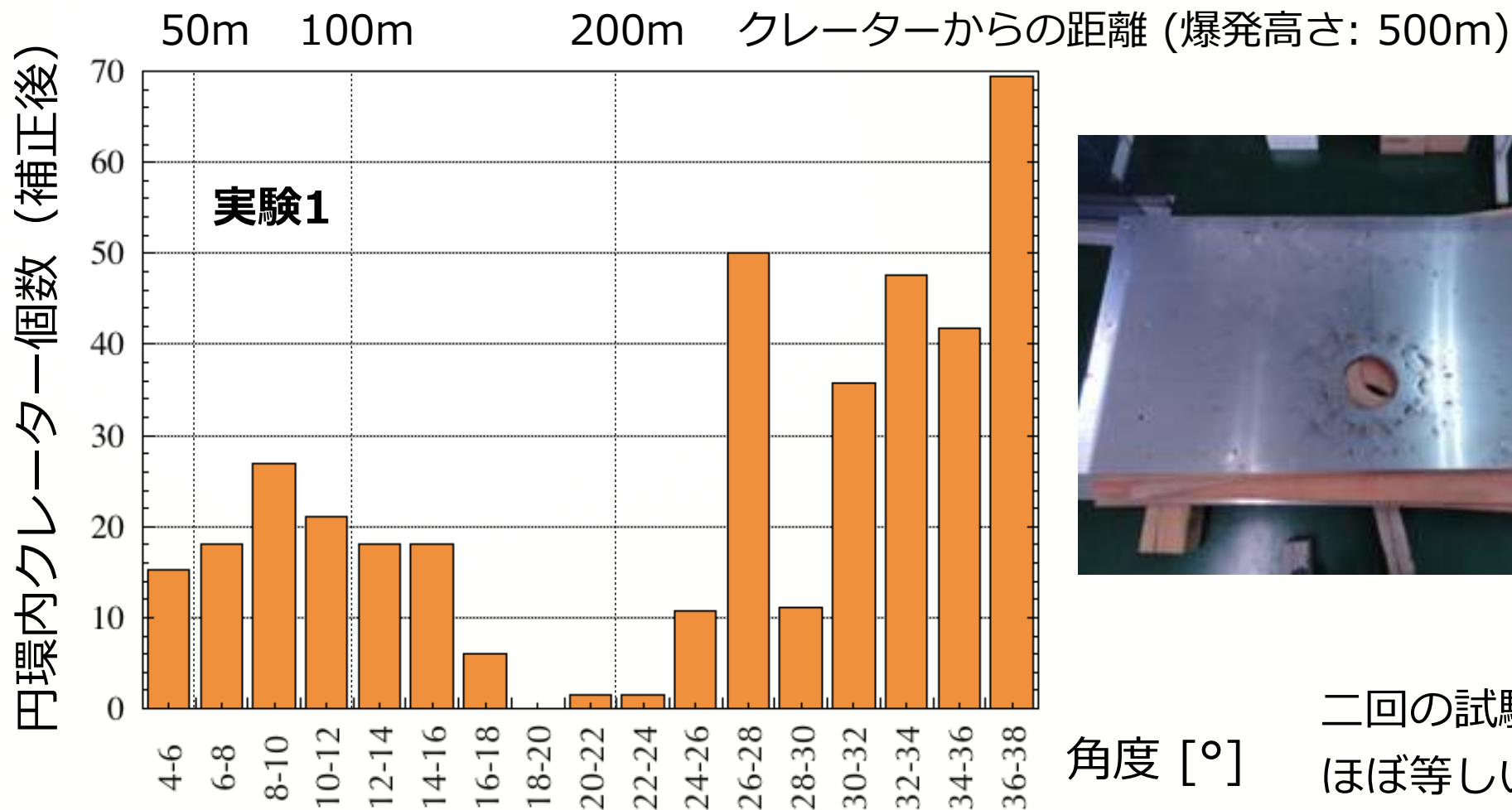
μG 環境でのより
正確な収量推定に向け、
シミュレーションとの
比較を今後進める予定

サンプラー現状 [3]

✓ **SCI** 爆破破片飛散分布評価 [サンプリング時汚染評価]



1/2スケール SCI 試験： インパクト以外の破片空間分布・
組成評価



二回の試験で
ほぼ等しい結果

サンプリング地点周辺での >mm サイズ破片 : <1個 / 100 m²

破片組成分析を実施予定

まとめ

- ✓ はやぶさ2 サンプラーは、太陽系のなりたちと進化を記憶する小惑星試料を地質情報とともに地球での汚染を最小限に持ち帰ることを目標
- ✓ ハードウェアは完成。洗浄を経て、打ち上げまで保管。地上汚染は軽減・把握をめざす
- ✓ より正確な収量見積もり・帰還後の開封手順確立など、試料の科学的価値をより高める準備を継続