

JAXA惑星物質試料受入(キューレーション)設備 —惑星物質科学の新たな展開に向けて—

矢田 達^{1,3}, 藤村 彰夫^{2,3}, 加藤 學^{2,3}, 惑星物質試料受入設備検討委員会

1. サンプルリターンミッション の意義

「他山の石」と言う言葉がある。広辞苑を引くと、「他山の石以て玉を攻むべし」の意味として「よその山から出た石でも、自分の宝石を磨くのに用いることができる」、とある(原典は中国戦国時代の詩集「詩経」)。この自己研鑽に役立つ他人のもの・言動を指す「他山の石」の教訓は、惑星物質科学においても通ずる。地球外の天体の試料を人類が初めて手にしたアポロ・ルナ計画では、月が地球同様に分化・火成活動を経た天体であること、地球の地殻・マントル物質と比較してよく似ているが、揮発成分に乏しいこと、岩石学的証拠から過去に地殻・上部マントルが全溶融したマグマオーシャンを形成していたことなどが明らかとなった[1, 2]。このような岩石分化天体の初期形成史が明らかになることにより、地球および地球型惑星の成り立ちについての理解が進み、「比較惑星学」という学問が成立するに至った。まさに、「他山の石」の研究が「自分の石(宝石)」の成り立ちの理解に役に立ったわけで、他の天体の試料を入手して、その物質科学的研究を行う意義は極めて大きい。

「他山の石」、こと地球外の惑星物質試料の入手経路は2つしかなく、落ちてくるのを待つか(もしくは既に落ちたものは探すか)、取りに行くかのどちらかである。

前者が地球上に落下してきている隕石・宇宙塵で、後者が無人・有人の探査機によるサンプルリターンミッションである。前者の利点は試料回収のコストが比較的安価な事である。前者の欠点は、第1にその起源天体・放出地点を特定するのが極めて困難であること、第2に一連の地球環境での風化過程を経ることにより、試料が受ける消耗・破壊・汚染・変質である。これに対して後者の利点は、地球外試料を最低限の地球起源汚染で回収できることと、試料を採集する天体・採集地点が特定され、むしろそれらをターゲットとして積極的に選択できる事である。後者の欠点は試料回収までのコストが高つく事である。しかし、後述にも挙げられるが、サンプルリターンミッションによってもたらされる知見の重要性は計り知れない。

2. サンプルリターンミッション の過去・現在・将来

2.1 過去のサンプルリターンミッション

サンプルリターンミッションの先駆けは、米国NASAのアポロ計画と同時代の旧ソ連のルナ計画による月試料回収である。アポロの6回のミッション(11, 12, 14, 15, 16, 17号)とルナの3回のミッション(16, 20, 24号)により、合計380kgの月の試料が地球上に持ち帰られ、前述の通り月・地球の起源の理解などにおいて長足の進歩をもたらした[1, 2]。

一連の月探査計画によるサンプルリターンの次に、地球外の天体の固体物質試料が地球に持ち帰られたのは、2006年1月に地球に帰還した米国スターダスト

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 技術開発部
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系
3. 宇宙航空研究開発機構 月惑星探査推進グループ 研究開発室

(Stardust) 探査機による，彗星Wild2の塵試料である。帰還した回収試料の物質科学的研究により，捕獲された彗星の珪酸塩質の塵の中に，高融点鉱物が確認された[3, 4]。原始太陽系星雲にあったダストが変成を受けずに保持されていると考えられている彗星の塵に高融点鉱物があると言うことは，彗星のような氷微惑星の集積が起こった原始太陽系星雲の外縁部にも，同じ原始太陽系星雲の高温領域で形成された物質が到達していたことを意味し，原始太陽系星雲において固体物質の攪拌が非常に広範に渡って行われていた事を示唆している。

また，天体の固体物質ではないが，2001年に打ち上げられた米国ジェネシス（Genesis）ミッションでは，地球－太陽間のL1点において27ヶ月間多種のメディアによる太陽風物質の収集を行った後，2004年9月，地球に試料を帰還させた。残念ながらパラシュートが開かず，帰還カプセルはユタ州の砂漠の地表に激突したが，破損したメディアは回収され，各種の科学分析が行われている。例えば，希ガス分析により，これまで月試料などの研究により議論されてきた太陽風の高エネルギー成分は物質表面への打ち込みと宇宙風化によって産み出されたもので，独立した単成分ではない，との報告がもたらされた[5]。

2.2 現行のサンプルリターンミッション

現行のミッションとしては，今年4月末に地球への帰還についた探査機「はやぶさ」がある。「はやぶさ」は可視・近赤外スペクトルタイプでS型に分類される近地球型小惑星，(25143) イトカワの試料を2010年6月に地球へ帰還させる予定である[6]。2005年11月に実施された2度のタッチダウン時のサンプル採集においては，試料を巻き上げる為の弾丸は発射されなかったと推定されているが，タッチダウンの衝撃で巻き上がった小惑星表面の微粒子が捕獲されている可能性があると考えられている。探査機のカプセル帰還に成功し，サンプラーの中に試料が回収されていた場合は，人類初の小惑星からのサンプルリターンとなり，その

後の物質科学的研究による成果が期待されている。

2.3 将来のサンプルリターンミッション

日本の将来のサンプルリターンミッションの「はやぶさ2（仮称）」では，イトカワとはスペクトルタイプの異なるC型小惑星から試料を帰還させることを計画している[6]。更に，その次の小惑星探査計画も検討中である。

海外では米国がC型の近地球型小惑星からのサンプルリターンを行うOSIRISミッションを，欧州宇宙機構（European Space Agency, ESA）が無人探査機による火星サンプルリターンを計画している。今年中に月探査機「嫦娥（Chang'e）1号」を打ち上げるとしている中国が「嫦娥3号」における月からのサンプルリターンミッションを，来年中に月探査機チャンドラヤーン1号（Chandrayaan-1）の打ち上げを予定しているインドがチャンドラヤーン2号による月からのサンプルリターン計画を，それぞれ発表している。月では日本もサンプルリターンミッションを検討中である。

このように近年，国内・海外で多数のサンプルリターンミッションが計画・進行中である。

3. 帰還惑星物質試料キュレーション設備の機能

これらのサンプルリターンミッションによる地球外物質試料の受入のため，特別な設備が必要となる。貴重な帰還惑星物質試料は，数量的にも限定されており，適切に管理・保管される事が望まれる。これらの試料はその後の適切な研究に供されるまで特質を損なうことなく取り扱われる必要がある。このような惑星物質などの自然科学試料とそれに関連した文献やデータなどの管理に関わることを総称して，キュレーション（curation）という。これには試料やデータの取り扱い，初期記載，保管，管理，配分が含まれる。

3.1 試料の取り扱い

惑星物質試料キュレーション設備として，クリーン

ルーム内に雰囲気制御を行ったクリーンチェンバーを設置し、その内部で帰還惑星物質試料を取り扱うことにしている。この方式を用いる理由は、汚染の防止に有利なためである。

3.1.1 汚染の防止

汚染には、対象天体や帰還試料から地球環境への汚染と、地球環境からの対象天体や帰還試料への汚染がある。前者が問題とするのは、地球生命・環境に有害な物質の放出である。特に危機的な影響をもたらすと考えられているのが、未知の有害地球外生命による汚染である。この為に宇宙科学委員会 (Committee on Space Research) では、宇宙検疫 (Planetary Protection) について国際的規約を設定し、全ての地球外探査に対してその遵守を求めている[7]。特に地球外生物の存在の可能性が議論されている天体からの帰還探査については、地球-月系への帰還探査機の衝突の回避、帰還探査機の完全殺菌、帰還試料の封じ込めが義務づけられているが、現行の日本のサンプルリターンミッションの「はやぶさ」が対象としたイトカワは該当の天体に当たらない。本キュレーション設備では帰還試料への地球物質からの汚染防止に注意を払っている。

探査機による対象天体への汚染も、宇宙検疫で対象天体の化学状態に応じて規定がある。これについては、この設備で将来ミッションにおいて探査機が対象天体の汚染を防止する為の研究や方法についての検討を行い、汚染防止の実現に向けての提案を行うことを検討している。

化学的汚染は無機物質と有機物質で対応が異なるため、この2種類に大別できる。それぞれは、気体・液体・固体の三相を取り、その相の状態で汚染の種類と対応が違う。無機・有機の気体分子の汚染については、試料を扱う雰囲気制御をすることにより最小限に抑えるように配慮する。この為に、試料の取り扱い、保管をおこなう雰囲気は真空か高純度窒素に保つ。無機や有機の液体や固体による汚染については、クリーンチェンバーという閉鎖された清浄な環境で防護する。特に

粒子による汚染は、化学的汚染のみでなく後述の生物的汚染の担体ともなるので、これを防止することは重要である。クリーンチェンバーの環境は高純度窒素雰囲気に保たれ、持ち込む治具や装置なども事前に十分に洗浄されており、また、粒子・塵発生源を限ることが可能な小さな空間である為に、内部の地球源微粒子のゼロに近づけることが出来る。クリーンチェンバー内の清浄度を維持する方策である洗浄については、それぞれの機器や容器に対応した方法を検討し、採用している(4.3章参照)。

上述は化学的汚染を主眼にしたが、この他に重要なものとして生物的汚染がある。この汚染は、地球環境中の細菌・バクテリアなどが主要な汚染源であり、クリーンチェンバー本体内部、クリーンチェンバー内に導入される機器や試料容器などについては複数の方法で殺菌及び洗浄する事を考えている。

3.1.2 紛失の防止

クリーンチェンバーという閉鎖環境で試料を扱うことにより、試料が地球環境に紛れ識別できなくなる事態を防ぐ事を考えている。この為、クリーンチェンバーで窒素循環を行う際の吸い出し口にもフィルターを設け、クリーンチェンバーからの試料の漏れ出しを防止することを考えている。クリーンチェンバー内は試料取り扱い終了後、注意深く試料の回収を行う事を想定して準備している。回収された塵は試料が混入しているものとして取り扱う。

3.2 初期記載

惑星物質試料キュレーション設備の機能の一つとして求められるのが、試料の特徴の記載である。初期記載では試料の汚染防止と全量回収を目指すので、その為に注意を払ったクリーンチェンバー設計となっている。また、同号他稿で述べられる、はやぶさ初期分析チーム[8]の行う分析内容も初期記載に含まれるので、そこらも是非ご参照いただきたい。

まず、汚染・紛失防止の観点から、基本的にはクリーンチェンバー内に試料がある状態での記載を行う。

帰還試料はシールされたコンテナに収納されていると期待しているので，その内部の残留ガス（重希ガス）を捕集する事を予定している．前述のはやぶさ初期分析チームの一機関においてガス質量分析が行われる予定である．次に，試料の光学観察を行う．高倍率の観察は試料を汚染しないよう，クリーンチェンバー外から長作動距離顕微鏡により行う事を想定して準備している．この光学観察データを解析することにより，試料の粒度分布についての情報も得られる可能性がある．試料の秤量もクリーンチェンバー内に組み込んだ電子天秤で実施する予定である．十分に試料がある場合には，クリーンチェンバーの赤外分光用の窓から赤外分光観測により光学特性を測定する予定である．

また，試料のより高倍率での観察，定性元素分析を行う事が出来るように，エネルギー分散型X線分析装置を備えた走査型電子顕微鏡（SEM-EDX）を準備する．帰還試料を導通性物質で汚染しないように，低真空での試料観察・分析が可能なものを選定している．観察時の試料室雰囲気は高純度窒素と想定しているが，電子線による試料の変質や試料表面への雰囲気中の汚染分子のたたき込み効果などにより，ある程度試料は汚染されると考えられる．

3.3 保管

惑星物質試料キュレーションにおいて，試料の保管は試料の捕獲時の状態を維持するのが望ましい．地球外天体の試料は多くの場合，もともと真空環境にあった事が多い為，当設備での長期間試料保管は真空雰囲気で行う事ができる．試料を取り扱うクリーンチェンバーには保管庫が取り付けられており，初期記載が終了した後はこの保管庫に試料を収納し，真空状態でクリーンチェンバー本体から切り離し，その状態を維持したまま保管する．なお，保管庫は適宜クリーンチェンバー本体に取付けて試料をクリーンチェンバー内に戻せる仕様である．

3.4 配分

惑星物質試料キュレーションにおいて，重要な要素の一つが試料の配分である．前述の初期記載の為の試料配分から始めて，初期記載の結果に基づいた，研究者からの要求に応じての試料配分が求められる．配分時の試料の汚染・紛失のリスクを少なくするため，配分作業はクリーンチェンバー内で行う予定である．配分用試料は精密洗浄された石英容器等にクリーンチェンバー内で収め，研究者に配布する事を検討している．試料配分については今後決められる事項であるが，惑星物質試料キュレーション設備は決まった方針に従って配分が出来るように準備を進めている．

4. 惑星物質試料キュレーション設備の仕様

この章では，宇宙航空研究開発機構（相模原キャンパス）に建設中のキュレーション設備の仕様をまとめる．

4.1 クリーンルーム

4室から構成される当設備のクリーンルームの概要を図1に示す．試料を取り扱うクリーンチェンバーが置かれる惑星物質試料処理室は，部室内の粒子清浄度が米国連邦標準（Federal Standard 209E, 1ft³ (0.028m³) 中の粒径0.5μm以上の塵の最大許容存在度で表される）でクラス1000，クリーンチェンバーが置かれるエリアでクラス100と，当設備で最もクリーンな部屋である．SEM-EDXが設置される電子顕微鏡室と，試料準備室は共にクラス1000である．クリーンチェンバー及びクリーンルームに関係する機器，治具，容器などの加工・洗浄を行う設備を導入する加工・洗浄室はクラス10000となっている．更衣室からクラス10000の加工・洗浄室と，クラス1000以下の試料準備室に入る為に，それぞれ別々のエアシャワーを設けており，クリーンルーム用衣類もこの2つで違うもの

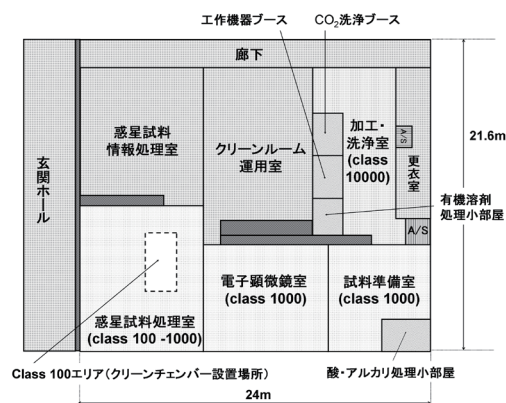


図1: JAXA 惑星物質試料キュレーション設備クリーンルーム平面図. 清浄度クラス 100 ~ 10000 の部屋が4室準備される.

を用意する予定である. クリーンルームの空気は全て各部屋の天井に設置されるフィルターファンユニット (Filter Fan Unit, FFU) から供給される. クリーンルーム内の気流は一部外気が導入されている以外は閉鎖されており, FFUを介して空気を繰り返し循環することにより, 部屋内空気を清浄に保っている. また, 試料を取り扱う惑星試料処理室を最もきれいに保つため, 更衣室<加工・洗浄室<試料準備室<電子顕微鏡室<惑星試料処理室の順番に部屋内気圧が高くなっていて, 気流が後者から前者の方向に流れるようになっている. クリーンルームのFFUにはボロンフリーのULPA (Ultra Low Penetration Air) フィルターを用いており, 元素汚染についても配慮がなされている.

試料容器等の精密洗浄には酸やアルカリ溶液, または有機溶剤による薬品洗浄が有効であるが, これらの薬品の蒸気は閉鎖気流循環系であるクリーンルームからは分離する必要がある. 当設備の試料準備室には酸・アルカリ処理小部屋, 加工・洗浄室には有機溶剤処理小部屋を設けており (図1), これらの小部屋の空気はクリーンルーム側から小部屋に給気され, 屋外に排気される. 薬品処理を行う小部屋の内装, 設置機器・什器はそれぞれの薬品に耐性のある材質を用い, 腐食・劣化を防ぐ配慮が施してある. 加工・洗浄室に簡単な工作機械を設置するためのブースとCO₂プラスト洗

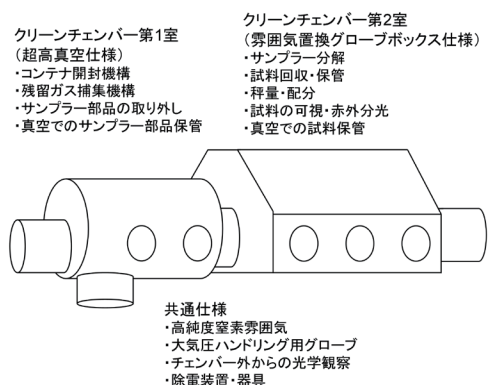


図2: 惑星物質試料キュレーション設備クリーンチェンバー概念図. 主に超高真空仕様の第1室と雰囲気置換グローブボックス仕様の第2室から構成される.

浄を行うためのブースも設けられる予定で, これらのブース内の大気もクリーンルーム大気を汚染しない様に直接屋外に排気される.

クリーンルーム各部屋の設備として, 比抵抗値 $18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の超純水が供給される. 試料容器の精密洗浄を行う目的で更に高純度の比抵抗値 $18.2\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の超純水精製装置を酸・アルカリ処理小部屋用に設置している.

4.2 クリーンチェンバー

クリーンルームの惑星試料処理室の清浄度クラス100の領域に, 帰還試料を取り扱うためのクリーンチェンバーを設置する. 図2に示すとおり, クリーンチェンバーは超高真空から大気圧室素雰囲気までカバーする仕様の第1室と, 大気圧室素雰囲気での操作を主目的としたグローブボックス仕様の第2室からなる2室構成となっている.

第1室で超高真空から大気圧室素雰囲気を準備する理由は, このクリーンチェンバー内でサンプラーの開封作業を実施し, 重希ガスを含む残留ガスをサンプリングする作業を行うためである. 「はやぶさ」の様に真空状態でサンプリングを行い, その状態を保って帰還するとサンプラーの開封時には宇宙空間 (小惑星表面近傍) と同じ真空状態となる事が望まれる. その為,

可能な限り清浄な超高真空環境の実現を目指した。一方、不幸にしてサンプラーに大気などの混入があった場合、粉体状試料の飛散防止の為、内圧とほぼ等しい圧力の高純度窒素雰囲気での開封が望まれるが、これについても対応している。クリーンチェンバーの清浄な真空環境と高純度窒素雰囲気は、超高真空仕様で高温ベークされたクリーンチェンバー、ドライスクロールポンプ＋ターボ分子ポンプの真空排気系、高純度の液体窒素から気化させ、その後、窒素精製装置を介して、クリーンチェンバーに導入される窒素によって実現される。これらを実現する為、補機類はクリーンルーム直下の地下階機械室に設置され、クリーンルーム環境の清浄化を助けている。真空度及び真空の清浄度(質)は四重極質量分析計、改良型超高真空用真空計によりモニターし確認される。第1室の作業は上述した希ガスサンプリングの他に、超高真空中でのサンプラーの一部部品の保管、大気圧窒素雰囲気でのグローブ作業もある。グローブは超高真空時にはゲートバルブを介してクリーンチェンバーから分離されているが、窒素雰囲気ではクリーンチェンバー内グローブ作業が可能となっている。窒素の純度は大気圧イオン化ガス質量分析計及び差動排気型四重極質量分析計を用意してリアルタイムでモニターを行う体制を取る予定である。

試料の取り扱いで注意を払った点は静電気への対策である。グローブ作業時、クリーンチェンバー内は高純度窒素が導入されている為、極めて水分量が少なく、誘電体である珪酸塩質微粒子などの試料は著しく帯電する事が予想される。こうした場合、ハンドリング前に適宜除電を行わないと、試料が容器・治具に付着して離れなかったり、或いは同電荷による斥力で跳んで見失ったりと、取り扱いに大きな影響を来す事が懸念される。現在、紫外線・ α 線を主体として電荷を中和する対策案を検討している。これらで対応できない場合は、軟X線の利用も視野に入れる。

クリーンチェンバー第2室では、基本的に大気圧高純度窒素雰囲気でのグローブを用いて作業を行う。この高純度窒素は第1室と同等のものを供給する。第2室

の特徴としては、第1室より多くのグローブと広い作業領域を備え、より柔軟に多種の大気圧下での作業に対応できる事である。第1室で開封され、数点の部品を取り外したサンプラーは、第2室に搬送された後、治工具により解体され、試料の取り出し・回収を行う。第2室は長作動距離顕微鏡による高倍率顕微鏡観察、クリーンチェンバー備え付けの電子天秤による秤量、備え付けの石英窓を介しての赤外分光による光学特性測定など、試料の初期記載を行う為の機能を備えている。また、試料を配分用の容器に移し替える作業などもこの第2室で行う予定である。回収後の試料を保管庫に搬送し、真空雰囲気での保管する為の機能を有している。

4.3 洗浄及び清浄度確認用機器

クリーンルーム内には洗浄対象、除去汚染対象に応じた洗浄用の装置が用意される。サンプラー外面や治工具外面などの汚れを力学的に除去する為に、CO₂ブラスト洗浄が用意されている。これは粒子の汚染除去にも有機膜の汚染除去にも有効な方法である。サンプラー外面などの有機汚染除去に活用できる洗浄手段としては、大気圧プラズマ洗浄装置もある。治工具や真空部品などの粒子汚染および有機汚染に対する粗洗浄用に超音波洗浄装置がある。また、治工具、試料容器などの表面に付着した生物の殺菌の為、UVオゾン洗浄装置が、また、より一般的に生物学的汚染を取り除く目的で有機物焼却用高温乾燥機が準備されている。石英ガラス製やテフロン製の試料容器等の洗浄のために、酸・アルカリ処理小部屋にクリーンドラフトやクリーンエバポレーター（独立の給排気系と、加熱用のホットプレートを備えた清浄なボックス）が設置されている。

洗浄後、有機膜汚染の清浄度確認手段として接触角計などを、粒子汚染除去の確認には光学顕微鏡、SEM-EDXなどを用いる予定である。しかし、これ以上の酸・アルカリなどによる精密洗浄の清浄度評価や、重希ガス採集システムの評価などについては、機関外

協力研究機関の協力で実施する。

[8] 山本哲生, 2007, 遊星人, vol.16. No.2, 165.

5. 今後の予定について

惑星物質試料キュレーション設備は平成19年度(2008年3月末まで)に完成する予定である。2010年の「はやぶさ」の回収試料帰還をにらんで、平成20年(2008年)4月からは装置の試験運用が開始される予定である。完成後は大学共同利用研究設備として、運用される予定である。

謝 辞

本設備立ち上げにご尽力された関係者の方々、特にキュレーション設備の検討に関してご協力を戴きました方々、また「はやぶさ」プロジェクト関係の方々にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。本稿執筆に当たっては、遊星人編集部の方々には多大なご迷惑をおかけしましたことを、ここにお詫びいたします。遊星人編集部の叱咤激励がなければ、本稿は完成に至らなかったことは想像に難くありません。どうも有り難うございました。

参考文献

- [1] 永原裕子, 1997, 比較惑星学, 岩波書店, 東京, 52.
- [2] Taylor, S. R., 1979, Nature, 281, 105.
- [3] Brownlee, D. E. et al., 2007, Science, 314, 1711.
- [4] Zolensky, M. E. et al., 2007, Science, 314, 1735.
- [5] Grimberg, A. et al., 2006, Science, 314, 1133.
- [6] Yoshikawa, M. et al., 2006, Abstract of
Workshop on Spacecraft Reconnaissance of
Asteroid and Comet Interiors (LPI contrib..
No. 1825) , p81.
- [7] COSPAR/IAU Workshop on Planetary
Protection, 2002, chaired by Rummel, J. D.,
Williamburg, USA.