

宇宙探査における惑星保護と汚染管理

～ JAXA 宇宙科学研究所における取組み ～

木村駿太（宇宙科学研究所学際科学研究系 特任助教）

菅原春菜（宇宙科学研究所太陽系科学研究系 特任助教）

小澤宇志（研究開発部門第二研究ユニット 主任研究開発員）

鈴木宣寛（宇宙輸送技術部門鹿児島宇宙センター射場技術開発ユニット 主任研究開発員）

川島秀人（宇宙輸送技術部門鹿児島宇宙センター射場技術開発ユニット 技術領域主幹）

鈴木志野（宇宙科学研究所学際科学研究系 准教授）

<目 次>

1. はじめに (鈴木志野)
 2. 惑星保護の概要、世界と JAXA での現状 (木村駿太、小澤宇志、鈴木志野)
 3. サンプルリターンミッションにおける汚染管理の概要と MMX における汚染管理計画 (菅原春菜)
 4. 種子島レポート (木村駿太、小澤宇志、菅原春菜、鈴木宣寛、川島秀人、鈴木志野)
 5. おわりに (鈴木志野)
-

18 世紀前半にアントニ・ファン・レーウェンフックは自作の顕微鏡で一滴の雨水を見て「うなぎがいる」と思ったらしい。人類が初めて微生物を「目で見た」瞬間だ。その後、19 世紀半ばにルイ・パスツールは、微生物が化学物質を変換して生きる（活性を持つ）ことを人類で初めて認識し、19 世紀後半にロベルト・コッホは微生物培養技術を確立して微生物の塊を肉眼で見た。そして現在、人類は培養によらずとも環境中に生きる微生物の DNA、RNA、タンパク質、代謝物すべての生体分子から生命情報を引き出す技術を手に入れた。まるで、宇宙望遠鏡が、様々な線種でそれまで見えていなかった宇宙空間に広がる「何か」を見たことで、宇宙科学を発展させてきたように、肉眼では見るることのできない微生物を、人類は様々な方法で認識する術を獲得し、微生物学の知識を深化させてきた。

惑星保護方針とは、地球の微生物で他の天体を汚染しない、もしくは、他の天体の生命で地球を汚染しないという方針だ。COVID-19 を経験した我々にとって、後者の理解は容易であろう。一方、前者の「他の天体を地球生命で汚染しない」には本質的にどういった意味・意義があるのだろうか？月と惑星の汚染に対する潜在的な問題が初めて提起されたのは、1958 年第 7 回国際宇宙科学会議であるとされるが、本格的に微生物除菌を伴う探査が行われたのは、1970 年代の米国による火星探査計画・バイキング計画である。微生物がいない環境など存在しないと言われるほどに微生物に適した星となった地球に住む微生物学者たちが火星の大地の画像を見た時「微生物がいて何らおかしくない」と感じただろうことは容易に想像がつく。バイキング計画では、火星生命の存在を「活性」で検出する実験が遂行されたが、結果的には生命の存在の明確な証拠を得ることなく計画は終焉した。バイキング計画では、地球から火星に持ち込んだ微生物を火星生命として検出する可能性を恐れ「全探査機を乾熱滅菌する」という、とてつもなく大掛かりな方法をとった（図 1-1）。それは単に、偽陽性を恐れただけでなく、火星に地球微生物を持ち込んだ場合、地球微生物が自己増殖して将来の火星生命探査を台無しにしてしまうこと、微生物の増殖により火星の環境を大きく変えてしまうこと（大袈裟に聞こえるかもしれないが、例えば光合成（細菌）は、過去一現在に至るまで、地球の大気組成を規定する重要因子である）を懸念したためでもある。これらが「他の天体を地球生命で汚染しない」ことの本質である。惑星保護方針はバイキング計画以前から現在に至るまで、国際宇宙空間研究委員会（COSPAR）による国際基準のガイドラインとして記されている。



図 1-1 バイキング・ランダーの乾熱滅菌準備中

仰々しい響きをもつ（と私は思う）「惑星保護方針」であるが、微生物汚染管理を伴う方針が明確に規定されているのは、現状、火星と海洋天体のみである。具体的な微生物汚染管理プロセスは、探査機に付着する微生物を除菌し、孢子化した微生物が規定値以下であることを、19 世紀後半にコッホが開発した微生物培養法により評価・証明するという極めてシンプルなプロセスだ。よって、語弊を恐れずに言くと、惑星保護方針に準拠する形で火星着陸探査を行うことは、惑星保護的には極端に難しいことではない。近年は、1970 年代のように「探査機丸ごと乾熱滅菌」のような大掛かりな滅菌を行うのではなく、除菌・滅菌した部品を清浄度管理された施設で組み立てて、最終的に探査機に付着する孢子数が規定値

以下であることを証明するだけだ。ただそれは、単純な火星着陸探査を行う場合で、これがもし火星着陸生命探査となると一段難しくなるし、火星の特別区域（今でも生命を宿している可能性のある場所）での着陸探査となると、とてつもなく難しくなり、今のところ特別区域の惑星保護方針（探査機につき上限 5 孢子）を満たす孢子化微生物の検出技術は世界に存在しない。また最初に述べたように、近年、培養せずとも環境に生きる微生物の生体分子から直接生命情報が引き出せるようになった結果、地球に生きる微生物の 99.9%は培養できていない（正確には培養方法が分からない）ことが明らかとなった。それに伴い、惑星保護関係者の間でも培養法による検出だけでは不十分という議論がなされており、私も（というか、良識のある微生物学者は皆）同様の見解を持っている。実際 NASA や ESA の火星着陸探査では、火星に持ち込んだ可能性のある微生物の DNA サンプルやゲノム情報を自主的に保持している。惑星保護方針は、基本姿勢は変わらずとも、科学の発展に合わせてアップデートされていく。

でも、日本の皆さまには安心してもらいたい。ISAS では現在、除菌技術、微生物培養や DNA による微生物検出技術、ゲノム解析技術など惑星保護に必須となる各種基盤技術を鋭意整備中である。また、近いうちに微生物汚染管理を伴う清浄度管理施設の整備も行う予定だ。「惑星保護方針があるから火星着陸探査や海洋天体探査はキツイよなー。」などと言わせぬ準備を着々と進めているので、まずは相談してもらいたい。そもそも惑星保護の概念は将来の科学を犠牲にせぬよう 1950 年代の科学者の良心から発せられたものである。そして、ISAS の惑星保護研究者は「惑星保護方針を守れぬものはミッションを行うべからず！」と取り締まるために存在するのではなく、惑星保護方針を遵守しながら各人が望む探査を実現するために存在することを知っておいてもらいたい。（もちろん難しいケースもある。）

ここまで惑星保護方針に関して延々と述べてきたが、それとは別に一般に地球からの持ち込み汚染（地球コンタミネーション）には、無機物・有機物など、各種地球物質が含まれる。幸いなことに、無機物・有機物が自己増殖することはないため、惑星保護方針のような厳密な方針はないが（有機物に関しては有機物目録の提出が必要）、もし、重要なパーツに地球物質含まれるようなことがあれば、現場、もしくは、サンプルリターンにおける物質分析から得られる科学的成果が大きく損なわれることは明白だ。よってそんなことは絶対にさせないための取り組みも ISAS では行っている。ここでは、これら惑星保護と探査機の地球物質汚染管理の ISAS での取り組みの一部を紹介する。

2-1. 概要と現状

惑星保護 (Planetary Protection) 活動の目的は、地球の微生物による他の天体の汚染を防ぐこと (フォワード汚染の防止) と、未知のバイオハザード等による地球の汚染を防ぐこと (バックワード汚染の防止) の 2 つに大別される。前者は、科学探査の価値を損なわないために、探査機に付着する地球微生物の低減と把握が重要である。後者は、地球 (主に人類) を危険に晒さないために、宇宙から持ち帰るサンプル内の地球外生命の存在可能性を検討し、ある程度想定される場合には、帰還サンプルの厳重隔離が重要である。我々は現在、主に無人探査時のフォワード汚染の防止に向けて活動している。

宇宙探査では色々な天体が探査対象になるが、どこに行くのか、何をするのか、によって惑星保護上の要求が異なる。COSPAR が定めている惑星保護方針では、フォワード汚染に関してカテゴリー I から IV、バックワード汚染に関してカテゴリー V を定めている^{1,2)}。フォワード汚染に関しては、ほぼ全ての天体がカテゴリー I か II に割り振られている。特筆すべきは火星、木星の衛星エウロパ、土星の衛星エンケラドスである。これらの天体は、生命が存在する可能性が比較的高いことや、地球微生物が持ち込まれた際に現地で増殖する可能性があるため、保護すべき天体と呼ばれる。探査する際には特に厳しい基準として、フライバイやオービター探査にはカテゴリー III、ランダーやローバーといった着陸探査にはカテゴリー IV が適用されることになっている。

カテゴリー I や II の探査計画では、衝突確率解析や、故障確率解析等の数値計算、場合によっては有機物目録の提出が求められる。これは、もしもの際にも火星等の保護すべき天体に衝突する確率が十分に低いことを示すためである。これらの取り組みは、はやぶさや、はやぶさ 2 といったこれまでの日本の探査でも行われてきた。カテゴリー IV ミッションにおいては (衝突確率が高い場合はカテゴリー III でも)、さらに微生物汚染管理が要求される。欧米等、過去に火星着陸探査を実施した宇宙機関では、宇宙機の微生物汚染管理のノウハウを獲得しているが、日本では経験がほとんど無いのが実情である。

2-2. 過去の火星着陸ミッションから学ぶ

宇宙探査機の微生物汚染管理がこれまでどのように行われてきたのかを学びたい。まず、どのようにきれいにするか、について、以下に Mars2020 など、過去の火星着陸探査機のケースを例に挙げる。参考としては、YouTube もわかりやすい³⁾。まず組み立て前のパーツに対しては乾熱、オートクレーブ (高圧高温蒸気) による殺菌が多く用いられる⁴⁾。COSPAR のハンドブックでは 111.7°C 30h や 125°C 6h が目安と記載されているが、実際のミッションではこれより長時間殺菌していることが多い。一方、非耐熱性の素材や、クリーンルーム内での組み立て過程における追加殺菌は、アルコール (IPA; Isopropyl alcohol) ふき取りが多く用いられる^{5,6)}。2012 年に打ち上げられた MSL (Mars Science Laboratory) では全表面積の 89% 以下、全体積の 61% 以下が乾熱殺菌され、全表面積の 11% 以下、全体積の 1% 以下が IPA で処理 (すすぎ洗いまたは拭き取り) された⁷⁾。近年では、低温 (常温) での滅菌方法として、過酸化水素蒸気 (VHP; Vaporized Hydrogen Peroxide) の使用も注目されている⁸⁾。COSPAR で認められている殺菌手法は、基本的には以上である。HEPA フィルターを備えたクリーンルームでパーツを扱うことで、そもそもの微生物汚染の量を少なくする、といった戦略と併せて対応することが重要である。火星探査機のフライトモデル (FM) の、組み立て、試験、打ち上げまでの一連の流れ (ATLO; Assembly, Test, and Launch Operations) は、諸条件により、ISO Class 8 ないし 7 のクリーンルームで行われるこ

とが求められている。

次に、微生物汚染の量をどうやって調べるか紹介する。4 章でも紹介するが、現在は、ワイプ（布）やスワブ（綿棒）を使って探査機表面をふき取り、寒天培地で培養することで微生物汚染の量を数値化する方法が一般的である⁹⁾。一定面積あたりいくつ以上検査という基準が設けられているので、この基準に沿って検査を行う。COSPAR の基準では、80°C、15 分の熱処理に耐える、微生物の spore（芽胞、あるいは孢子）の数を数えることになっている。これは、多くの微生物は宇宙環境の真空、乾燥で死んでしまう一方、休眠状態の spore は宇宙環境でも長期間死なない可能性があるため、宇宙機に付着する spore の数を把握することが重要という考え方だと推察される。一方、後述する *Deinococcus* 属のように、spore を形成せず、80°C、15 分の熱処理である程度死滅するが宇宙環境で生き残る可能性のある微生物も存在していることを考えると、この計測はやや甘い方法である。さらに、「はじめに」、で述べられているように、環境中の 99.9%の微生物は培養不可能であると言われていることを考慮すると、実際に宇宙機に付着している微生物は、もっと多いと認識しておくべきだと考えている。

上記の技術を駆使して火星着陸探査を実現してきた過去のミッション例として MSL のケースをご紹介したい^{7, 10)}。ロケット全体のうち、フェアリングに収納されている、火星地表に到達するフライトシステムに対して微生物汚染管理が求められる（フェアリング内側も汚染管理すべきであるが、現時点で明確な基準は見当たらない）。ここには、クルーズステージや、探査を行うローバー（Curiosity）、ローバーを降ろすためのスカイクレーン等が含まれている。全ての微生物汚染の合計値（内側も含めて）が 500,000 spore、露出した表面の微生物汚染の合計値が 300,000 spore を下回ることが、火星着陸探査（カテゴリーIV、厳密には IVa）には要求されている。また spore の密度は、検査した全ての箇所に関して 300 spore/m² が要求される。この 2 つの基準を共に満たす必要がある。ここで強調しておきたいのは、現状では火星着陸機には完全滅菌

（微生物数ゼロ）は要求されていないということである。我々は培養法を用いていくらか検査を行っているが、これはそこまで厳しい要求値ではないと感じている。（ただし、「はじめに」、で述べられているように、生命探査や特別領域へのアクセスを行う場合は、基準は格段に厳しくなる。）

MSL での微生物数の実測値を図 2-1 に示す。ここでは、フライトシステムの各サブシステムに付着した微生物数の検査結果を集計している。打ち上げ前の微生物汚染の実測値の総計は約 278,000 spore ということで、上限値のおおよそ半数に収まっているため、打ち上げても良いという判定となる。実際にはこの値は保守的（厳

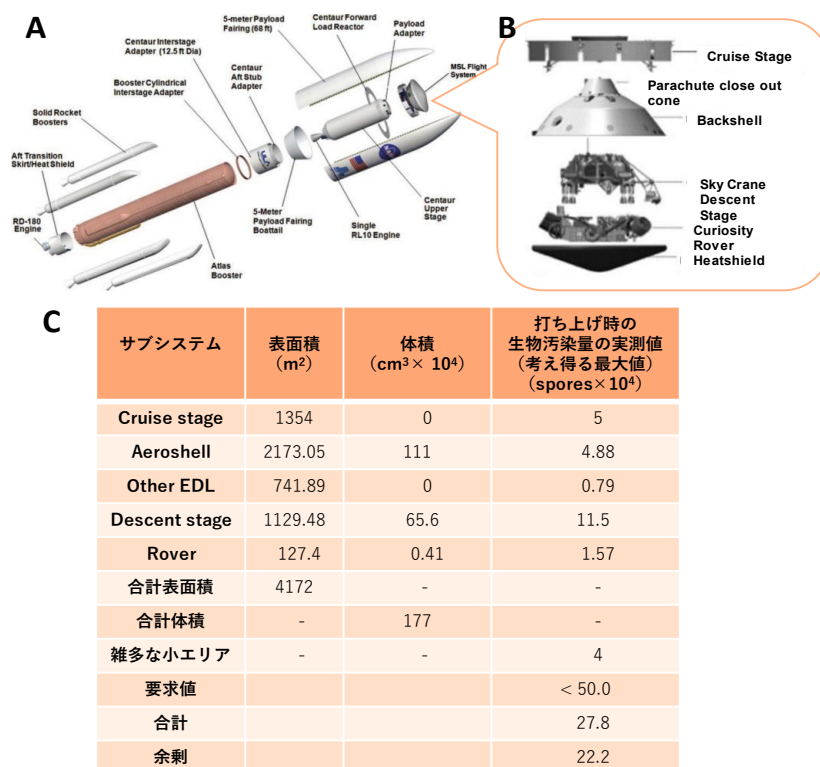


図 2-1. MSL（マーズサイエンスラボラトリー）打ち上げ時の生物汚染量の一覧。A: MSL 打ち上げ形態の分解図。B: MSL フライトシステムの拡大図。C: フライトシステムのサブシステム毎の生物汚染量。Benardini et al. を引用して改変^{7, 10)}。

しめ) な値となっていて、考え得る最大値となっている。例えば、探査機の全体を実際に調査するのは困難なので、一定の面積あたり最低 1 か所、というサンプリングをした後に、総面積あたりに換算して値を大きくしている。そのため、実際に 278,000 spore が検出されたわけではないが、そのくらいの微生物が付いている可能性がある、ということ表現している。また、微生物数を検出出来ない樹脂、炭素繊維や塗料等には、30 spore/cm³ を一律に計上している。

それにしても、「微生物、けっこういるな」、と思われる方もいらっしゃるかもしれない。私も正直少しそう思ったが、探査機を組み上げる環境では多くの人が作業するため、探査機を一旦きれいにしても清浄度を保つことは難しく、容易に再汚染されてしまう(人間を無菌にすることはできない)。特に多くのメーカーの方々とともに複数の箇所で製作、統合される宇宙機では、汚染ポイントは多く存在している。我々は実際に探査機の汚染管理をしたことはないので、500,000 spore 以内に収め、これを実証するためには、様々な難所・落とし穴があるのだと思われる。しかしながら火星着陸探査を実施するためにはこれを達成する必要があるので、そのために今行っている研究を次にご紹介する。

2-3. 殺菌技術の検証

我々はまず、惑星保護に必要となる殺菌技術を検証した。結果の詳細は最近発表した論文を参照頂きたいが¹¹⁾(後日、日本語での紹介文を宇宙研 HP で公開予定)、以下にかいつまんでご紹介する。宇宙機はクリーンルームで組み立てられることになるが、クリーンルームといえど、人や物資の出入りが伴うため、無菌状態ではないことが知られている。実際に NASA のクリーンルームや、クリーンルーム内で組み立て過程の探査機の表面からは幅広い種類の細菌が検出されている^{12,13)}。また、細菌以外の、古細菌や真菌類の検出報告もある。用いる殺菌手法は、こういった幅広い種類の微生物を殺菌できるべきである。殺菌手法やその効果は、古くから様々な文献で報告されてきたが、自分たちで実際にその効果を確認しておく必要があると考えた。

殺菌試験には、耐熱性の spore (日本語では芽胞) を形成する *Bacillus atrophaeus*、放射線耐性菌として知られる *Deinococcus radiodurans* など、惑星保護上重要な 4 種の微生物を選定した¹⁴⁾。特に *B. atrophaeus* は、NASA の惑星保護ハンドブックにおいても、生物汚染量評価の標準菌として記載されている¹⁵⁾。我々はこれらの微生物を乾燥させた後、乾熱、アルコール、過酸化水素や紫外線等、計 7 種の手法で殺菌試験を行い、その後の生残を調べた。

オーブンにて乾熱処理した結果、*B. atrophaeus* の芽胞は、他の 3 種よりも突出した熱耐性を備えていることが確認できた。ただし滅菌(生存細胞数が検出限界以下になった状態)は達成できており、さらに温度を上げていくとより素早く滅菌できた。アルコール処理は、乾燥した菌体に 70% のイソプロピルアルコール(IPA)を滴下することで行った。*D. radiodurans* などほとんどの微生物は 1-3 分という短い処理時間で滅菌が確認された一方、*B. atrophaeus* の芽胞は IPA 滴下による死滅はほとんど認められなかった。これはすでに報告されていることではあるが、クリーンルーム内での組み立て過程における追加殺菌としてよく用いられる IPA ふき取りは、IPA 自体には芽胞に対して殺菌効果がほぼ無く、ふき取りによる物理的な除去で、結果的に微生物汚染の低減を実現していると考えられた。ただし、殺菌はできていないということを念頭に置かなければならない。以上のように、乾熱および IPA に対しては *B. atrophaeus* は圧倒的に他の 3 種と比べて高い耐性を示した。一方で、例えば紫外線殺菌では *B. atrophaeus* は比較的簡単に滅菌できるが *D. radiodurans* などなかなか滅菌できなかった。このように、手法によっては芽胞よりも耐性の高い微生物が存在することに注意すべきである。

今回実証を行った範囲では、4 種すべての微生物を滅菌できたのは乾熱のみであり、乾熱が優れた殺

菌手法と確かめられた。ただし乾熱は宇宙機のコンポーネント（具体的には、電子機器、バッテリー、モーター等が想定される）にダメージを与えてしまうケースがあるため、どの殺菌手法を用いるかは、部材の適合性ととも検証する必要がある。注意が必要なのは、現状、COSPAR で許可されているのは、乾熱・湿熱を含む熱滅菌、IPA、および、VHP であり、それ以外の殺菌法を用いる場合は、詳細な検証データを求められる可能性が高い。

2-4. 現時点で考えている宇宙機の微生物汚染低減のフロー

研究結果を踏まえて、微生物汚染低減に関する現時点の方針を図 2-2 に示す。宇宙機のコンポーネントレベルから、クリーンルームへの導入、宇宙機の組み上げと試験、射場近くへの輸送、フェアリングへの格納、射点への移動といった各フェーズにおいて微生物汚染の低減、あるいは清浄度の維持が必要である。汚染量は、随時テストする必要がある。組み上げに伴って露出しなくなった表面は、再検査・

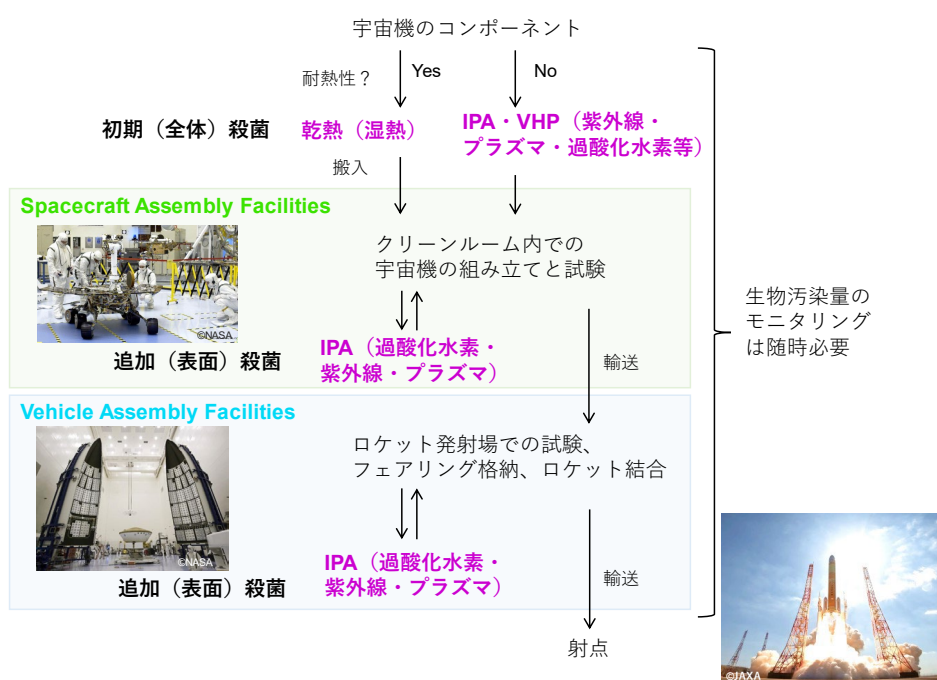


図 2-2. 宇宙機の微生物汚染を低減するための殺菌手法の選択肢。カッコ内は、汎用されている方法ではないが、場合によっては用いる可能性のある方法。Kimura et al.を改変¹¹⁾。

耐熱性のコンポは、乾熱や、場合によっては湿熱で滅菌し、宇宙機組み立てクリーンルームに搬入する。非耐熱性のコンポは、過酸化水素蒸気やアルコール等で殺菌し、クリーンルームに搬入する。微生物をどのくらい殺菌しなければいけないかは、初期菌数によるだろう。よって、もしいずれの殺菌手法も適用困難な場合は、できる限り清浄度の高い環境で製造された部品を用いることが望ましい。クリーンルームに搬入した後は、組み上げ・各種試験に伴って人が作業を行うことで再汚染が想定されるので、表面の追加殺菌を適宜行う。これは、IPA ふき取りが最有力である。

その後ロケット発射場へ輸送し、フェアリング収納を行う建屋に搬入される。ここで検査した微生物数を、ほぼ最終値として扱う可能性が高い。この時点で上限値を達成できなければ追加殺菌を要するので、慎重に、時間を確保して行うべきだろう。上限値を十分に下回っていることが確認できたら、フェアリングに収納し、ロケットと結合する。フェアリングには作業用ドアが取り付けられているので、収納後もペイロードにアクセスしての作業、あるいは微生物汚染の検査は可能だが、人の接近による汚染が危惧されるため、フェアリング収納以降は可能な限り人の接近は行わないことが望ましい。

再殺菌は困難であるし、汚染度の高い部品があれば、他の部品と近づけるべきではないからである。前述の通り、火星着陸探査（カテゴリーIVa）においては宇宙機の完全無菌は要求されていないため、事前にコンポーネントごとに許容値を設定しておくことが重要である。組み上げの各段階にチェックポイントを設けておき、設定した許容値を下回っていることを確認した上で次の段階へ進むといった戦略が考えられる。

2-5. まとめ

火星着陸のようなカテゴリーIV ミッションの実現に求められる惑星保護上の課題は表1のように示される。各項目の進行状況を述べると、生物汚染量の低減については、2-4 で述べたように、ある程度の方針は見えてきたものの、各コンポーネントに対してどの殺菌手法を用いるべきか、や、あるいはなるべく耐熱性に出来ないか、といった検討は、各担当者と惑星保護担当の間でミッションの早期から個別に行うべきであると考えている。生物汚染の検出とモニタリングは、培養法による量的な評価を行う最低限の手法は習得できている。一方で、条件として課されてはいないものの DNA サンプルやゲノム情報の保持は、国外ミッションでは常識的に行われており、この点は今後体制を整える必要がある。クリーン設備の構築は、宇宙研で新たに行うべきと思われる。関係メーカー各位や、射場関連施設でどの程度新規に整備が必要かは、情報収集中である。その一部は、4 章にて紹介させていただく。これらの情報、技術が整ってくると、探査機の清浄度を保って組み上げるフローの確立と、COSPAR による審査・承認を得る準備を進められると考えている。

以上、手短ではあるが、火星着陸探査等のカテゴリーIV ミッションを行うための惑星保護の、達成すべき課題と現状との距離感をご紹介させて頂いた。今後得た情報や技術によって変わる可能性があり、さらには COSPAR の惑星保護方針自体も随時見直されるものであるが、まずは、火星着陸探査や海洋天体探査（海外ミッションへの相乗りを含む）を目指す方々の、「惑星保護ってよくわからないし面倒くさそうだな」、という思いをわずかでも払拭する助けとなれば幸いである。

表 2-1. 火星（着陸）探査を行う上で求められる惑星保護上の課題と進行状況.

課題	進行状況
クリーン設備の構築	一部新たに必要
探査機の清浄度を保って組み上げるフローの確立	今後の課題
探査機にダメージを与えずに生物汚染量を低減する方法の獲得	ある程度達成
生物汚染の検出とモニタリング技術の獲得	最低限は達成
COSPARによる審査・承認	今後の課題

【References】

- 1) Kminek *et al.* (2019) An online-only supplement to Space Research Today, **205**.
- 2) COSPAR (2021).
https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPPolicy_2021_3-June.pdf
- 3) Smithsonian National Air and Space Museum (2021).
<https://www.youtube.com/watch?v=yBJ1TwCNtPc>
- 4) European Cooperation for Space Standardization (2008) ECSS-Q-ST-70-53C.
- 5) Grotzinger *et al.* (2012) *Space Sci.* **170**, 5-56.
- 6) European Cooperation for Space Standardization (2013) ECSS-Q-ST-70-57C.
- 7) Benardini *et al.* (2014) *Astrobiology* **14**, 27-32.
- 8) European Cooperation for Space Standardization (2013) ECSS-Q-ST-70-56C.
- 9) European Cooperation for Space Standardization (2008) ECSS-Q-ST-70-55C.
- 10) Benardini *et al.* (2014) *Astrobiology* **14**, 33-41.
- 11) Kimura *et al.* (2023) *Front. Microbiol.* **14**, 1253436. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1253436>
- 12) Moissl *et al.* (2007) *FEMS Microbiol. Ecol.* **61**, 509-521.
- 13) Schwendner *et al.* (2020) *Sci. Rep.* **10**, 1-11.
- 14) Craven *et al.* (2021) *Int. J. Astrobiol.* **20**, 1-28.
- 15) NASA (2022) NASA-STD-8719.27.

3. サンプルリターンミッションにおける汚染管理の概要と MMX における汚染管理計画 (菅原 春菜)

惑星保護が地球から他天体への地球微生物の持ち込み（フォワード）と、他天体からの地球への地球外微生物の持ち帰り（バックワード）の 2 方向からの汚染を対象とするのに対し、探査機の汚染管理（Contamination Control）が対象とするのは地球物質のみである。サンプルリターンミッションにおける汚染管理の目的は、国際条約を遵守するといったものではなく、純粋にリターンサンプルの質の担保であり、それぞれのミッションが設定した理学ミッション要求を満たすために行う基本的な行為となる。しかし、自らがハードルを設定するとは言え、理学目標に沿った適切なハードル＝汚染許容量が設定されるのであり、日本だけでなく、世界中の科学者、ひいては未来の科学者の期待を背負っているのである。

サンプルリターンミッションは、NASA のアポロ計画から始まり、GENESIS ミッションによる太陽風粒子のサンプルリターン、Stardust ミッションによる 81P/Wild2 彗星塵のサンプルリターンが実現され、次に JAXA の Hayabusa ミッションおよび Hayabusa2 ミッションが小惑星 Itokawa および Ryugu からのサンプルリターンに成功し、そして 2023 年 9 月に小惑星 Bennu から帰還したばかりの NASA の OSIRIS-REx ミッションと続く。さらに、我々 JAXA の火星衛星探査計画（MMX）は火星衛星フォボスからのサンプルリターンを目指しており、その先には NASA 主導の Mars Sample Return（MSR）が火星本体からのサンプルリターンを目指している。

サンプルリターンミッションにおける探査機の厳格な汚染管理の重要性が浮き彫りとなったのは Stardust ミッションである。彗星塵のリターンサンプルに含まれる有機物、特に生命の誕生に必須とされるアミノ酸のような有機分子の発見は Stardust ミッションにおける理学目標の 1 つであったが、サンプル捕集に使用したエアロゲルやその周囲のアルミホイルから種々の有機物の汚染物質が見つかった¹⁶⁾。特に問題となったのは、アミノ酸の一種である ϵ -アミノ-カプロン酸（ ϵ -amino-n-caproic acid : EACA）が高濃度で見つかったことである。EACA の同位体組成（ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）も含めた詳細な分析結果から、EACA はナイロン 6（nylon 6）の加水分解生成物であり、NASA ジョンソン宇宙センター（JSC）のキュレーション施設で使用していたナイロンを含むバッグ等に由来することが明らかになった。この Stardust ミッションを契機に NASA の汚染管理計画は見直され、そこで得られた教訓（Lessons & Learned）は、OSIRIS-REx ミッションの汚染管理計画に生かされている¹⁷⁾。一例を挙げれば、アミノ酸の汚染源となるようなナイロンやラテックスのようなアミノ酸ベースのポリマーの使用は禁止されている。

探査機の汚染管理（Contamination Control）の基本は、(1) 汚染物質を混入させないこと、そして、(2) 万一、混入した場合にはその汚染物質を識別できることである。ミッションではまず、理学目標に対応してそれぞれの汚染物質の許容量がミッション要求として定義される。この汚染許容量はリターンサンプルの総量とその中に含まれる各物質（理学ミッション要求の対象となる物質）の存在量、そして理学ミッション要求を達成するための科学分析に必要なサンプル量などを考慮して、総合的に導き出されている。MMX では、許容できる汚染物質の上限値の多くは、リターンサンプル中に想定される存在量の 1/1000 に設定されている。この対象物質は地球上に存在する物質であるが、その種類は多岐にわたる。対象物質は大きく分けて、有機物質と無機物質の 2 つに大別され、さらに希ガス（He）などのガス分子も対象となる。有機物質としては、アミノ酸や脂肪族・芳香族炭化水素、カルボン酸、ヒドロキシ酸、アミン、アミド、アルコール、アンモニアなど、炭素質コンドライトに見つかっているような有機分子が対象となっている。無機物質については、MMX では特に、火星衛星の起源を判定する上で重要なク

ロム (Cr) やチタン (Ti) が挙げられ、さらに年代測定に必要なハフニウム (Hf)、タンゲステン (W)、ウラン (U)、鉛 (Pb)、ルビジウム (Rb)、ストロンチウム (Sr)、サマリウム (Sm)、ネオジウム (Nd) に加え、他の希土類元素やモリブデン (Mo) などが対象となっている^{18, 19)}。

汚染管理のミッション要求を達成するための取り組みは、探査機の設計段階から始まる。ミッション要求として挙げられた汚染物質が混入しないような材料の選定が不可欠であり、特に、サンプルリターンミッションにおいては、サンプラーが汚染管理の要となるため、理学チームはサンプラーへの汚染の混入を最小化すべく、材料の選定から部品の洗浄、保管等をサンプラー工学チームと協力して行なっている。時には、工学的な要求（例えば摩擦係数など）と理学的な要求（汚染度の低さ）が一致しないこともあるので、お互いにどこまで譲歩できるのか、擦り合わせが重要である。しかし、工学的な設計上、どうしても汚染物質となりうる材料を使用しなければならない状況も出てくるため、万一、そのような汚染物質がリターンサンプル中に混入した場合に備えて、汚染物質をすぐに同定できるよう、材料の一部をサンプル片として保管している。

最終的な設計が確定し、フライトモデル (FM) の組み上げが始まると、ATLO (Assembly, Test, and Launch Operations) と呼ばれる汚染管理のクリティカルフェーズに突入する。ATLO は打ち上げまでの最終段階であり、かつ、最も多くの人 (=汚染源) が関わるフェーズでもあるため、汚染管理の最繁忙期である。MMX では、FM の組み上げ環境の詳細な汚染評価と、コンタミクーポン (Contamination Monitoring Coupon) を用いた、経時モニタリングの2種類を汚染管理の一環で行なっている。前者の FM 組み上げ環境評価では、サンプラー開発に関わる各メーカーの FM 組み上げ用のクリーンルームに出向き、浮遊塵捕集機を用いた大気中の汚染物質のサンプリングと、有機溶媒（イソプロパノール）とシリカウールを用いた机や棚などに集積した汚染物質のワイプサンプリングを行なっている（図 3-1）。

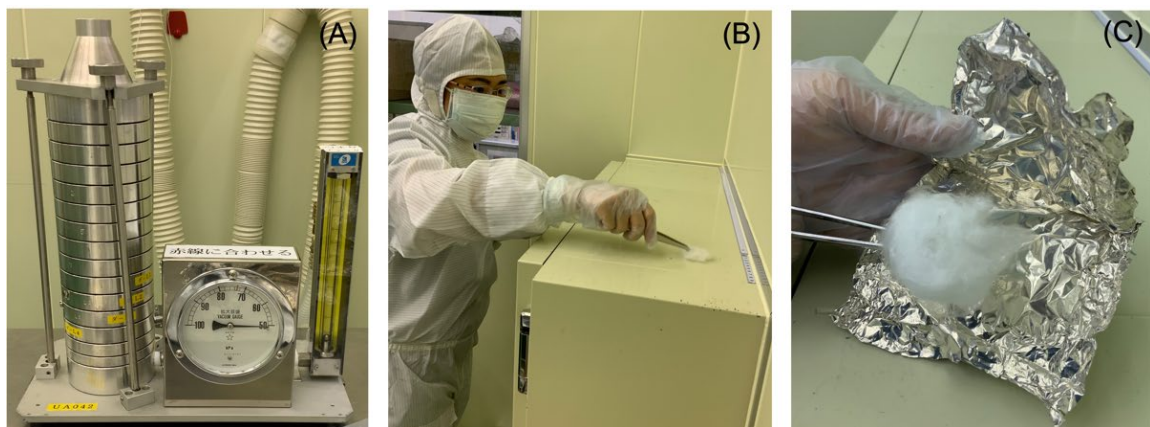


図 3-1. FM 組み上げクリーンルームでの環境評価試験の様子。(A) 浮遊塵捕集機、(B) イソプロパノール+シリカウールを用いたワイプサンプリングの様子、(C) ワイプサンプリング後の状態

後者のコンタミクーポンを用いた経時モニタリングでは、Hayabusa2 のレガシーを受け継ぎ、同様のコンタミクーポンセットを使用している（図 3-2）²⁰⁾。このコンタミクーポンセットはガラス製やアルミニウム製のシャーレやディスク、プレート、サファイアガラス製のディスク、さらにはカーボンテープなど、様々な素材から構成されており、様々な汚染物質のサンプリングやその後の分析方法に対応している。さらに、サンプラーには万一の汚染物質の混入に備えて、ウィットネスプレート (Contamination Knowledge Witness Plate) と呼ばれるサファイアガラスのディスクも搭載されている。

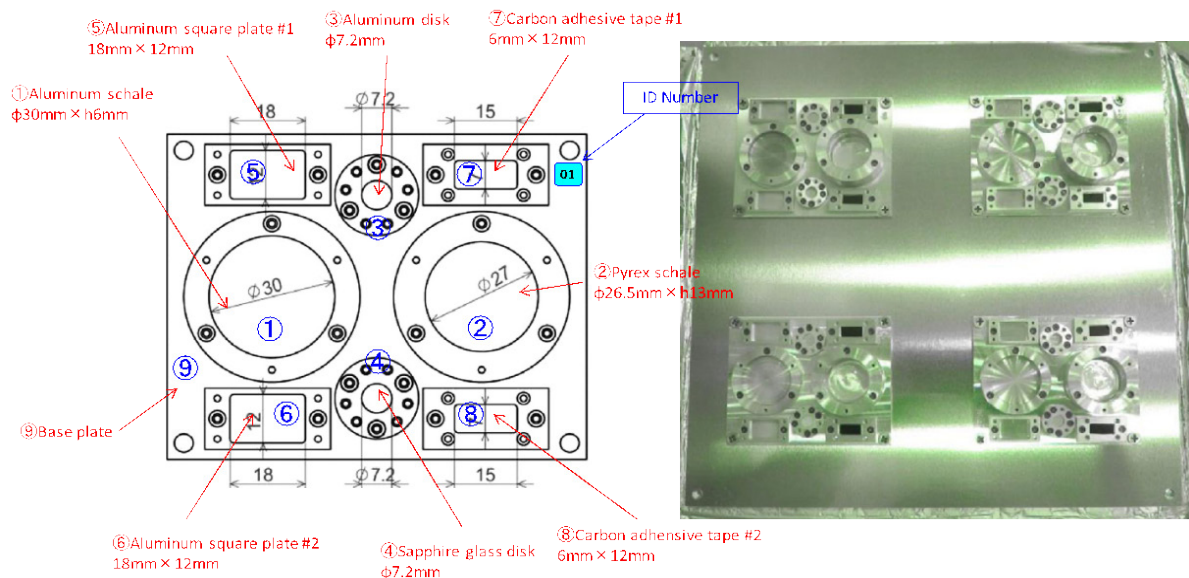


図 3-2. Hayabusa2 ミッションにて使用されたコンタミクーポンセットのデザインと写真²⁰⁾

また、MMX では、惑星保護（2 章参照）の観点も取り入れ、FM 組み上げ環境における微生物汚染評価も実施している。Hayabusa2 ミッションでは微生物汚染の概念は取り入れられていなかったが、NASA の OSIRIS-REx ミッションではすでに、探査機の振動試験場の環境中に存在する微生物の DNA 塩基配列に基づく同定などが行われている¹⁷⁾。

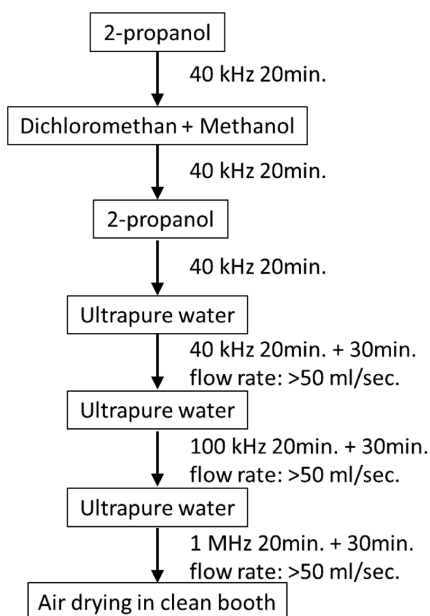


図 3-3. ISAS キュレーション施設で行うフルコース洗浄のフロー²¹⁾

そして、FM の最終的なシステム総合試験が終了した後に行われるのがリファーブと呼ばれるプロセスである。サンプラーなどのサンプルに触れるような機器類は部品ごとに分解され、ISAS のキュレーション施設にてフルコース洗浄と呼ばれる最高レベルの洗浄プロセスにかけられる（図 3-3）²¹⁾。フルコース洗浄は様々な有機溶媒と超純水を使用した超音波洗浄プロセスであり、対応する粒子径に応じて超音波洗浄における周波数も 3 段階に変更して行なう。MMX では、このフルコース洗浄方法を NASA とも共有し、可能な限り ISAS のフルコース洗浄に準ずる形で NASA の開発する P-サンプラー（Pneumatic sampler）の洗浄に生かされている。

リファーブされた部品はもう一度、組み上げられ、種子島宇宙センターにて他の機器類と合流する。サンプラーは外環境からの汚染物質の混入を防止するため、窒素ガスを封入された袋に密閉された状態で輸送され、射場でも可能な限り窒素パージが行われる予定である。第 4 章にて詳細は述べるが、種子島宇宙センターは探査機の搬入から打ち上げまで隙間なく綿密に清浄度管理が行わ

れており、安心して探査機打ち上げまでの最終段階を迎えることができる。

しかし、探査機の打ち上げ後も気を抜くことはできない。打ち上げ直後（約 3 時間後）にも射場環境の汚染物質のサンプリングを行い、万一の汚染物質の混入に備えるのである。そして、サンプルリターンカプセルが帰ってくるまでに、クリーンルームの中にキュレーションチャンバーを整備し、サンプルの受け入れ態勢を整えるが、ここでの汚染管理も不可欠である。また、カプセル回収時の周辺環境の土壌サンプリングも忘れない。

探査機の汚染管理は、絶え間ない地味で地道な作業の連続のように感じられるかもしれないが、リターンサンプルをこの手で分析できる日を夢見て、この長い道のりを完遂すべく日々精進している。NASAでも一流の研究者たちが自分たちのサンプルの質を守るため、汚染管理に携わっている。地球外からもたらされるリターンサンプルは人類の宝であり、この宝を地球上の汚染から守り、未来へ繋げていくのが我々の責務であると考えている。

【References】

- 16) Sandford S. A. *et al.* (2010) *Meteoritics & Planetary Science* **45**, 406–433.
- 17) Dworkin, J. P. *et al.* (2017) *Space Science Review* **214**, 19.
- 18) Usui T. *et al.* (2020) *Space Science Review* **213**, 49.
- 19) Fujiya W. *et al.* (2021) *Earth, Planets and Space* **73**, 120
- 20) Sawada H. *et al.* (2017) *Space Science Review*, **208**, 81–106.
- 21) 唐牛, 他 (2014) *地球化学* **48**, 211–220.

4. 種子島レポート (木村駿太、小澤宇志、菅原春菜、鈴木宣寛、川島秀人、鈴木志野)

4-1. JAXA 種子島宇宙センター内の探査機関連設備について

これまでの章でも述べられている通り、微生物汚染管理は、宇宙機を組み立てたのち、フェアリングに格納し、ロケットに結合し、打ち上げられるまでの一連の流れで達成される必要がある。種子島宇宙センターにおいて探査機が取り扱われる施設は、大きく分けて STA (Spacecraft Test and Assembly

Building; 衛星試験棟)、SFA (Spacecraft and Fairing Assembly building; 衛星フェアリング組立棟)、VAB (Vehicle Assembly Building; ロケット整備組立棟)、LP (Launch Pad; 射点) の4つである(図 4-1)。VAB 以外の施設は複数存在している。

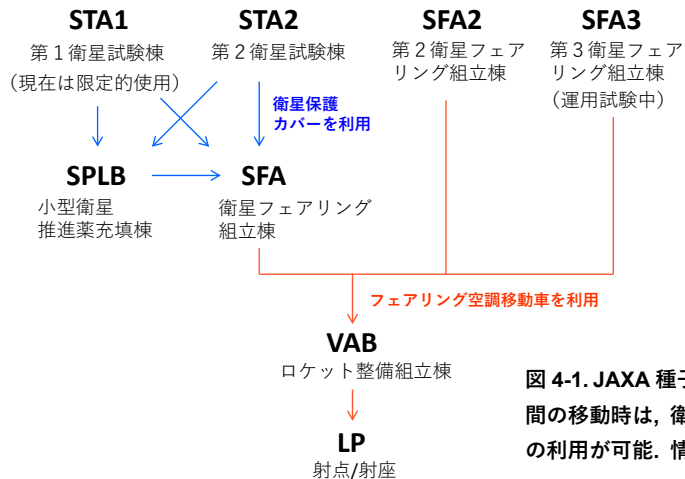


図 4-1. JAXA 種子島宇宙センター (TNSC) における探査機の動線。建屋間の移動時は、衛星保護カバー (青) またはフェアリング空調移動車 (赤) の利用が可能。情報は 2023 年 10 月現在。

4-2. 探査機が経験する環境

SFA2 および、新設された SFA3 は、STA2 と SFA の機能を併せ持っており、衛星のチェックアウト、推進薬充填、フェアリング取り付け、カウントダウンまでの一連の作業を実施することができる。惑星保護を必要とする探査においては、建屋間の移動を最小限にする方が合理的であるため、ここでは SFA2 および SFA3 について、惑星保護的視点からの見解を述べる。SFA 系で衛星が取り扱われる部屋は、主にエアロック室、ペイロード組立室、フェアリング組立室であり、いずれもクリーンルーム運用が可能である (図 4-2)。トレーラーで運ばれて来た探査機は、大扉からコンテナごとエアロック室に搬入される。大扉を閉め、部屋の清浄度が規定値になった後コンテナを開き、その後、最奥のペイロード組立室に搬入される。各種の準備・組立および機能試験を行った後、必要に応じて推進薬が充填される。隣接するフェアリング組立室にてフェアリングに格納された後、再びエアロック室から VAB に向けて搬出される運びとなる。推進薬充填の際には、ヒドラジンや NTO (四酸化二窒素) といった有毒ガス/液から身を守るために推進薬防護服 (スケープスーツ) を着用しての作業が必要になる (図 4-3)。



図 4-2. SFA3 室内の様子。左：エアロック室と外を繋ぐ大扉。SFA3 はシートシャッターを採用。右：フェアリング組立室。フェアリング組み立て作業台不要の設計になっている。左奥はペイロード組立室に繋がっている。



図 4-3. 推進薬充填時に着用するスケープスーツ。着用者由来の汚染は要確認。



図 4-4. フェアリング空調移動車 (No.2) .SFA 系から VAB への移動時に使用される.かなり大きい. ちなみに運転席はものすごく小さい.



図 4-5. VAB2 高層棟. 上: 上を見上げている. 特徴的な (ロケットがすっぽり収まる) 形の昇降床越しに見える天井は開閉式で, クリーンルーム運用時は閉じる. 下: 下を見下ろしている. けっこう怖い. 写真上部に映る, 跳ね上げ式の仕切扉はクリーンルーム運用時に閉じ, これより上がクリーンルームとなる.

フェアリングには専用の局所空調が確保されており、清浄度がさらに高く保たれる。SFA 系から VAB への移動の際は、衛星フェアリング運搬台車上に結合し、専用の牽引車で運搬される。この時フェアリング空調移動車が追従し、温湿度、清浄度の管理された空気が送りこまれる設計になっている (図 4-4)。空調移動車は 2 台現有している。

フェアリングに格納されたペイロードの VAB への搬入時には、ロケットの一段目、二段目 (+ 固体ロケットブースタ) は既に VOS (Vehicle On Stand) によって ML (Movable Launcher; 移動発射台) 上に組み上げられている。高さ 81 m を誇る VAB は低層棟、中層棟および高層棟に分けられ、フェアリングが結合する高層棟はクリーンルーム運用が可能である (図 4-5)。衛星フェアリング VOS によってロケット上段に結合してからは、衛星フェアリング内は ML のアンビカルマストから伸びたダクトによってクリーン空調が供給され、かつ陽圧が維持されるため、外気 (といっても VAB 内はクリーンルーム) は基本的には侵入してこないと考えられる。フェアリング内部にアクセスしての作業は、ペイロードの汚染の可能性があるため、必要最小限に留めるべきだろう。

VAB の高さ 67.5 m の引き戸 (!) (ギネス記録) が開いた後は、ML 運搬台車 (通称ドーリー) によってゆっくりと LP に運搬され、打ち上げの時を待つことになる。移動開始後はペイロードにはアクセスできなくなり、人由来の汚染の心配は不要となる。アンビカルマストからフェアリング内へのクリーン空調供給は、VAB 内、ML 移動時、LP 着後と、切り替えは要するものの瞬断なく可能である。打ち上げ時はフェアリングからダクト・ケーブル類が切り離され、ハッチが素早く閉じられる。フェアリング内は陽圧に保たれており、打ち上げ後、通気口からゆっくりと空気が外に出ていくため、外気は侵入してこない仕組みになっている。ロケットが大気圏外まで到達するとフェアリングが分離する。ここまで来ると、地球微生物が付着する可能性は無視して良いと言って良いだろう。

以上、ロケット発射場にペイロードが搬入されてから、宇宙空間に到達する (= 地球微生物汚染から解放される) までの流れを駆け足で追いかけた。火星着陸探査等の宇宙探査ミッションには、組み立てから打ち上げまでの一連の流れをクリーンルーム環境下で行うことが求められている。TNSC では、SFA2 または 3 に搬入することを想定すると、搬入以降、現有の設備で常にクリーン環境下に置くことが可能であると確認できた。つまり、TNSC に関しては、微生物汚染の実数値を算出するための

(仮設の) バイオバーデン実験設備を設置することができれば、惑星保護的運用に資する基盤設備は整うだろうというのが、現状の見立てである。

4-3. 微生物汚染検査の予備試験

クリーンルームと一口に言っても清浄度のレベルはさまざまで、人が出入りする宇宙機組み立てクリーンルームは、基本的には無菌環境ではないのが一般的な認識である。つまり、クリーンルーム環境下での作業であっても探査機にはいくらかの微生物が付着してしまう。これを検査し、探査機に付着した微生物の総量が基準値以下であることを示すことが、火星着陸探査等のミッションには要求される(2章を参照)。今回、参考値として TNSC 室内の微生物量検査を行ったので、その様子を報告する。今回我々が検査を行ったのは、あくまで、HEPA フィルターを通した空調は動いているが、衛星が搬入されておらず、クリーンルーム運用がなされていない状態での建屋であるが、TNSC では衛星を扱う各建屋は、衛星搬入前に毎回、特別清掃を行った後にクリーンルーム運用を行う。

我々は、SFA3 でエアースAMPLINGを行った。その結果、クリーンルーム運用をしていない 2023 年 10 月現在の状態であっても、空中浮遊菌数および浮遊粒子数の観点から、火星探査機の ATLO フローに要求される ISO8 と同等以上の清浄度であることを確認した。実際に探査機が取り扱われる際の、クリーンルーム運用されている SFA3 であれば、ISO8 のクリーン環境を満たすことは問題ないと考えている。

また、ポリエステル製のワイプ(布)を用いた代表的な直接拭き取り検査の方法を示す(図 4-6)。



図 4-6. 惑星保護で一般的な微生物数検査法. ここではワイプ(布)の例を示す. 左: 組立室の壁をワイプで拭き取る筆者. 畳み直ししながら 3 方向に丁寧に拭き取る. 中央: 50mL 容量のチューブに入れ、ISAS に輸送されたワイプ. 右上: 試料培養中の寒天プレート. 右下: 培養後の寒天プレートの一例.

大きな表面積をもつ探査機表面の微生物汚染量は、下記の方法で検査することになる。細かな箇所等は別途、スワブと呼ばれるポリエステル製の綿棒で行うことになる。まず、滅菌水で湿らせた手のひらサイズのワイプで、検査したい箇所を 60 x 60 cm 拭き取る。拭き取った後、緩衝剤入りの水に懸濁して、冷蔵保存する。今回はこの状態で神奈川県相模原市にある JAXA 宇宙研 (ISAS) に輸送した後、寒天培地で培養した。培養時間はメソッドによって異なるが、ここでは 3 日間程度である。培養後、微生物のコロニー数をカウントする。目視できるほどの微生物のコロニーは、数多くの細胞の集合体だが、1 細胞が増殖して形成したものと見なす。すなわちここでは、1 コロニーは、1 細胞由来の微生物汚染と評価する。チューブごと熱処理をすることで芽胞(ここでは主に細菌の芽胞)以外の細胞を死滅させてから培養した値を評価する方法が最も標準的に扱われているが、熱処理せずに培養した際の値や、培養用の培地や培養温度等を変えた際の値も取得して控えておくのが丁寧であると考え

られる。あくまで参考値ではあるが、探査機を扱う建屋の壁や床を拭き取って微生物を培養した結果、火星着陸機に要求される微生物汚染量の上限值である 300 芽胞/ m²を下回っていた試料も認められた。火星着陸探査を行うために達成すべき清浄度が、遠いレベルではないことが感触として確かめられた。

4-4. TNSC 視察を終えて

今後であるが、まずは、クリーンルーム運用されている建屋の微生物汚染量検査、実際に製造されたペイロード表面の微生物汚染量検査を行い、惑星保護プロトコルを固めていくとともに、現状の設備で、探査機が惑星保護の基準をどれくらい逸脱しているか、の距離感をつかみたいと考えている。今回の訪問を経て、微生物汚染管理を伴うミッションにおいては、プロジェクトの初期、あるいは立ち上げ前から、各方面とこれまで以上にコミュニケーションをとって進めることが大切であると改めて感じた。

探査機を丸ごと滅菌するという大胆な方策に出たバイキング計画の初飛行から、2025 年で 50 年が経とうとしてる。この 50 年の間に、探査機も搭載機器も当時とは比べ物にならないほど高性能かつ精密になり、微生物解析技術も生命科学の日進月歩の発展と共に革新した。こうした科学技術の発展がもたらす状況の変化に加え、火星本星のサンプルリターン、火星有人探査計画、民間の火星探査計画、海洋天体探査計画に押される形で、惑星保護は今、大きな変革を余儀なくされている。

本企画では、今後の日本の惑星保護・汚染管理をリードすることが期待される ISAS 若手研究者 2 名を中心に、両項目における ISAS の現状の取り組みをまとめていただいた。重要な情報をコンパクトにまとめてくれているので、ぜひ参考にしてもらいたい。本稿では、惑星保護に関しては、火星着陸探査や欧米の海洋天体探査へのサイエンス機器搭載に関心のある方々に必要となる、フォワード汚染に対する惑星保護の情報を盛り込んだ。しかし、世界的にはサンプルリターンに伴うバックワード汚染（他天体の生命による地球汚染）、中でも火星本星からのサンプルリターンに対する惑星保護が議論の中心の 1 つとなっている。よって、バックワード汚染の惑星保護について、最後に少し触れておく。

火星本星は生命の存在可能性があることから、COSPAR の惑星保護方針では、火星本星からのサンプルリターンは「制約付き (restricted)」、すなわち「生物学的に安全な実験室 (BSL4 以上) での科学研究によって、そのサンプルに地球外生命が存在する証拠がないことが証明されるまでは、外に出すことはできない。」となっている。しかし、「ない」ことを科学的に証明することは事実上不可能であることや、「生物学的に安全な実験室」とはどういうものかに結論がでていないことなどから、現状、その進展は緩やかなものとなっている。

サンプルリターンを伴う MMX も 2018-19 年に COSPAR の審査を受けている。火星本星と火星衛星フォボスの物理的距離が比較的近く（約 6,000 km）、多くの火星物質が隕石としてフォボスに降り注いでいるため、火星衛星上で採取するサンプルに、火星由来の生命（微生物）を含む可能性が否定できないからだ。中身の詳細については藤田和央博士が ISAS ニュース²²⁾に記しているので、興味のある方はぜひ読んでいただきたいのだが、実は、2018 年、海洋研究開発機構の연구원だった私は、ロンドンで行われた MMX のサンプルリターンの惑星保護要件に関する国際委員会（事実上の審査的なもの）の委員として参加した。MMX は火星圏から、というよりカテゴリー IV の天体を持つ惑星圏からサンプルを持ち帰る人類初のミッションであり、火星衛星サンプルリターン計画はかつて「制約付き」と判断されたこともあるので、議論はかなり紛糾した。しかし、結果的には MMX で行われる火星衛星フォボスからのサンプルリターンは「制約なしの帰還 (unrestricted)」が妥当であろうと判断されるに至った。我々はそこでの議論を consensus study report²³⁾として記録に残したが、その後に行われた 2019 年の NASA Planetary Protection Independent Review²⁴⁾の記録に「MMX の consensus study report を参考にして火星本星サンプルリターンを前進させるように」と記されており、火星本星のサンプルリターンに対する惑星保護に関しても参考となる部分があったことがうかがえる。

ではなぜ、MMX は「制約なしの帰還」が妥当と判断されるに至ったのだろうか？ 藤田博士は、上述の寄稿の中で「過去の火星表層史における巨大隕石衝突、火星放出物の生成、火星衛星への物質輸送、火星放出物の火星衛星への衝突や放射線による滅菌過程などの詳細なプロセスを考慮し、確率的・統計的な分析を行うことによって、火星衛星の微生物汚染分布確率を世界で初めて定量化し、MMX がそこ

で採取するサンプルの微生物汚染確率が 10^{-6} よりも十分に小さいことを証明した。」と記しているのだが、ここで、非常に重要だったのは、「世界で初めて定量化し」の部分である。これまでも定量化してなかったわけではないが、JAXA 惑星保護チームはプロセスにおける各種因子を丁寧に抽出し、それらの因子が与える正・負両面での「フォボスにおける火星由来の推定微生物汚染分布確率」に対する影響をこれまでの科学的知見、および、実験データに基づき、徹底的に数値化した。そのため、審査員である我々は、列挙されている因子とそこで用いられている数値が、科学的に妥当なものであるかを1つ1つ検証することで審査することができ、その結果「制約なしでの帰還が妥当である」と結論付けることができた。しかし、全体のスキームのどこかに論の破綻があったり、定量化の根拠が不明瞭であったりするなど疑わしい点が見受けられた場合は、リスクを恐れ、委員会は直ちに「制約あり」と結論付けていただろう。この JAXA が行った徹底した全プロセスの数値化戦略が、MMX の「制約なし帰還」を可能にしたのだと改めて思う。そして、余談ではあるが、MMX 惑星保護チームは、本審査時に、これまでに地球にもたらされた火星隕石に関するデータを示している（ただし、制約なし帰還の科学的根拠に用いてはいない）。今後、火星圏からのサンプルリターンに関する惑星保護を考える時、「火星隕石」はキーワードになる可能性が高いと私は思っている。MMX は、今後もフォワード汚染・バックワード汚染両方に対して、提出された惑星保護計画通りに進められたかの審査を受けることとなる。また、バックワード汚染に対しても、帰還前審査において、サンプルリターンが可能か否かの最終的な審査を受けることとなる。我々は、数値の根拠となる科学的知見・実験データを、時代に即してアップデートし続ける必要がある。

惑星保護方針とは、1 章に記したように、将来の生命探査ミッションや我々地球生命を守るために作られた方針だ。しかし、この方針を必要十分条件で満たすことができなければ、生命探査に関わる一切のミッションが事実上できないような状況に陥ることもあるのが現状だ。そして、気づくと火星「有人」探査が現実味を帯びはじめており、（膨大な数の微生物が人間を宿主としている）、バイキング計画からこれまで必死に守ってきたものは何だったのか？といった状況になりかねないところまで来ている。

ここからは、完全なる私見だが、国際的な惑星保護体制における ISAS の役割は非常に大きいと思っている。1 章に引き続き、ここでも再び語弊を恐れずに言うと、日本の惑星保護の歴史は浅く、我々は未熟で、挑戦者で、何ら既得権益も持たないからこそ、より大胆に、そして、徹底的に、惑星保護を科学の遡上に乗せる方向へと世界を導くことができるのではないだろうか。そしてそれこそが、適切な発展と保全の両立を実現する唯一の解となるはずだ。本稿でも紹介したように、現在 ISAS では、少なくとも将来の火星着陸探査や海洋天体探査を可能とするためのフォワード汚染に対する惑星保護に関する基盤設備・基盤技術は着実に整備しつつある（2 章）。また、サンプルリターンに関連する汚染管理に関しては、すでに世界をリードしている（3 章）。関係する拠点間での連携も進みつつある（4 章）。そして、これらの実態を若手研究者が担いつつあることも頼もしい。条件はそろいつつあるので、あとは前進するのみである。皆さま、引き続きご協力、よろしくお願いいたします。

【References】

- 22) 藤田和央. (2019) ISAS ニュース 2019 年 10 月号 (No.463). 「読む ISAS・宇宙科学最前線・宇宙探査と惑星保護」で閲覧可能
- 23) COMMITTEE ON PLANETARY PROTECTION REQUIREMENTS FOR SAMPLE RETURN MISSIONS FROM MARTIAN MOONS National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Planetary Protection Classification of Sample Return Missions from the Martian Moons. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25357>.
- 24) NASA Response to Planetary Protection Independent Review Board Recommendations (2019)