

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会  
平成27年度下期 科学技術調査研究助成

「国際宇宙ステーションを活用した有人宇宙探査に関する調査研究」

報告書

平成28年9月

一般財団法人 日本宇宙フォーラム

## 目 次

1. 調査研究の目的.....	1
2. 調査研究の実施内容及び方法.....	2
3. 調査研究の結果.....	4
3.0 有人宇宙探査の概要	
3.1 有人探査に向けた ISS 利用の文献調査	
3.2 有人探査に向けた ISS 活用事例の整理	
3.3 ISS 商業利用	
4. 今後の我が国の有人探査のための ISS 利用に向けた提言.....	54

(参考1) 月探査の各国動向等  
(参考2) Moon 2020-2030 国際シンポジウム出席報告  
(参考3) 長期宇宙滞在  
(参考4) SpaceX 社イーロン・マスク CEO が火星探査計画を公表

## 1. 調査研究の目的

宇宙の起源や宇宙の構造を理解することは人類の知的好奇心や科学技術にとって最大のテーマの一つである。また、有人探査を含めた宇宙探査は、人類の英知の結集であり、知的資産を創出するとともに、宇宙空間における人類の活動領域の拡大につながるものである。

宇宙探査において、世界での主要なプレーヤーの一つである NASA は、米国大統領の方針の下、まず 2020 年代に有人月探査を行うことに加え、小惑星移動・調査探査を行い、2030 年頃には有人の火星探査を行うべく開発を進めている。一方、有人宇宙探査はプロジェクトの規模が大きく、一か国のみで推進するにはコスト的にも、スケジュール的にも難しく、同じく宇宙探査を推進している日本、欧州各国、中国、インド等も宇宙探査で協業していくことを目指している。

平成 26 年 1 月には宇宙探査協業を目指す 35 か国・地域が参加して、政府レベルでの「国際宇宙探査フォーラム (ISEF)」が開催され、人類の活動範囲を小惑星、月及び火星を含む多様な太陽系の目的地へと広げるための取組を協力して進めていく他、国際宇宙ステーション (ISS) が今後の宇宙探査に向けた協力の枠組作りや技術開発の基礎基盤として貢献することが示された。また、ISEF に先立ち、宇宙機関レベルで将来的な国際協働による有人宇宙探査に向けて技術検討を行うためのメカニズムである「国際宇宙探査協働グループ (ISECG)」で協力ロードマップが策定され、ISS での実験を活用しつつ、無人の太陽系探査を行い、最終的には有人火星探査を目指すとしている。

我が国においては、これまで「はやぶさ」などの無人宇宙探査において、世界的な成果を多くあげてきている他、ISS プロジェクトにも参画し、微小重力環境を利用した各種の実験を行ってきている。先に挙げた ISEF や ISECG にもそれぞれ日本政府と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が参加し、将来的な宇宙探査の国際協業に貢献する意思を示している。一方、平成 27 年 1 月に策定された新しい宇宙基本計画にも記載の通り、「国際有人宇宙探査については、計画が今後国際的に検討されるものであることから、他国の動向も十分に勘案の上、その方策や参加の在り方について、外交、産業基盤維持、産業競争力強化、科学技術等に与える効果と要する費用に関し、厳しい財政制約を踏まえつつ、厳格に評価を行った上で、慎重かつ総合的に検討を行う。」とし、有人の宇宙探査について実施するかどうかが我が国としては決定していない。

このような背景の下、既に有人宇宙探査を推進している NASA などでは ISS を有人月・火星探査のための“テストベッド”として位置付け、探査に必要な生命科学、宇宙医学、物理・化学の基礎データとなる実験を実施・計画しており、ISS の「有人探査の準備・実験場としての活用」が進められている。

現在我が国の ISS 利用が所謂、微小重力環境利用による研究開発に留まっている現状に鑑み、既に推進しつつある NASA 等の有人宇宙探査のための ISS 活用実態を調査し、今後の我が国の ISS 利用計画策定に資する情報を整理・分析し、有人月・火星探査に必要となる技術開発・研究を目指すための“我が国独自の ISS 利用”のための提言をまとめる。これらの提案は、ISS 利用の産業利用が停滞する我が国の産業界への目標を提示することでもある。

具体的な実施内容は以下のとおりである。

- ①有人探査に向けた ISS 利用の文献調査
- ②ISS 利用成果発表会合での情報収集
- ③有人探査に向けた ISS 活用事例の整理
- ④今後の我が国の有人探査 ISS 利用に向けた提言

## 2. 調査研究の実施内容及び方法

### ①NASA における有人探査に向けた ISS 利用の文献調査

以下のウェブサイトや NASA 等発行の報告書／文献を用いて、有人探査に向けた ISS 利用の実験テーマについて幅広い観点から情報収集する。

- ・ NASA 有人宇宙研究ウェブサイト (<http://www.nasa.gov/hrp>)
- ・ 各種 NASA 発行報告書
  - Integrated Research Plan
  - Human Research Program (HRP) Science Management Plan
  - HRP Program Plan
  - HRP Evidence Reports
  - ISS Utilization Plan
  - HRP Response to Decadal Survey
  - HRP Annual Report、他
- ・ ESA 宇宙ステーション科学ウェブサイト ([http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Futura/Space\\_Science](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Futura/Space_Science))

### ②ISS 利用成果発表会合での情報収集

実際の最新の ISS 利用実験計画を入手するため、ISS 利用成果関連の会合に出席し、宇宙探査に向けた ISS での実験計画についての情報を収集する。実際に参加する会合としては、以下を想定する。また、これらの会合を通じて、米国等の ISS 利用の民間参入の実態や今後の運用商業化

の計画・検討状況についての情報も収集する

### ③有人探査に向けた ISS 活用事例の整理

①、②で収集した情報を基に、有人探査に向けた ISS 活用事例及び計画を抽出し、カテゴリー別に整理する（以下に想定を例示するが実際のカテゴリー分けは調査を通じて決定する）。また、それぞれの実験毎の成果もしくは期待される成果について考察し、それぞれの実験の将来の有人探査の基礎データとしての効果について分析する。また、カテゴリー毎に我が国での実施を想定して実施すべき優先度を考察する。

### ④今後の我が国の有人探査 ISS 利用に向けた提言

③で分析・考察した情報を基に、我が国が将来的に有人探査を行うことを想定し、それに向けて実施すべき ISS 実験についてとりまとめ、ISS の有人探査向け利用のための提言を行う。提言に当たっては、科学的視点からの実験計画の取りまとめに加えて、我が国産業界がもつ得意分野を考慮したうえで、産業界からの技術開発・研究の貢献可能性についても、取りまとめを行う。

### 3. 調査研究の結果

#### 3. 0 有人宇宙探査の概要

##### (1) ISECG 国際宇宙探査ロードマップ

2013年8月、ISECGの12機関（ASI（伊）、CNES（仏）、CSA（加）、DLR（独）、ESA（欧）、ISRO（印）、JAXA（日）、KARI（韓）、NASA（米）、Roscosmos（露）、SSAU（ウクライナ）、UKSA（英））が「国際宇宙探査ロードマップ」を作成、ISSに始まり、月周辺の有人探査を経て、火星に至る、「実現可能で持続可能」を目指した国際有人宇宙探査の道筋（図1）と、ミッションシナリオ（図2）を示している。



図1：ISECGが公表している国際宇宙探査ロードマップ

12の宇宙機関は、国際宇宙探査を実現するために、以下の所見を纏めている。

- ① 数十年間にわたって持続的な有人宇宙探査事業を構築するために、各宇宙機関のリーダーは、宇宙探査が国民へ明確な成果をもたらすように注力しなければならない。
- ② 各宇宙機関は、ISS、月近傍、月面、あるいは無人での国際協力ミッションが将来の国際火星ミッションのシミュレーションや準備として活用され、結果として複数のパートナーが将来の有人探査に主要技術で貢献できるようになることを期待している。
- ③ 宇宙探査の共通目標達成における宇宙飛行士の存在意義を高めるために、

有人支援サンプル・リターンや遠隔操作のような新しいミッション構想がさらに検討されるべきである。

④ 無人科学ミッションにより地球低軌道以遠の有人探査の準備に必要なデータを得ることができる。無人探査で得られた計測データが科学の進展および有人探査準備の両方に役立っていることは、科学と探査の両コミュニティによって一般的に認められている。

⑤ 各機関は、長期滞在探査ミッションにおけるクルーの健康とパフォーマンスのリスクに対し、リスク対策に必要な重量/体積リソースの削減とリスクを許容範囲にする努力を優先して、その軽減対策の国際協力を推進すべきである。

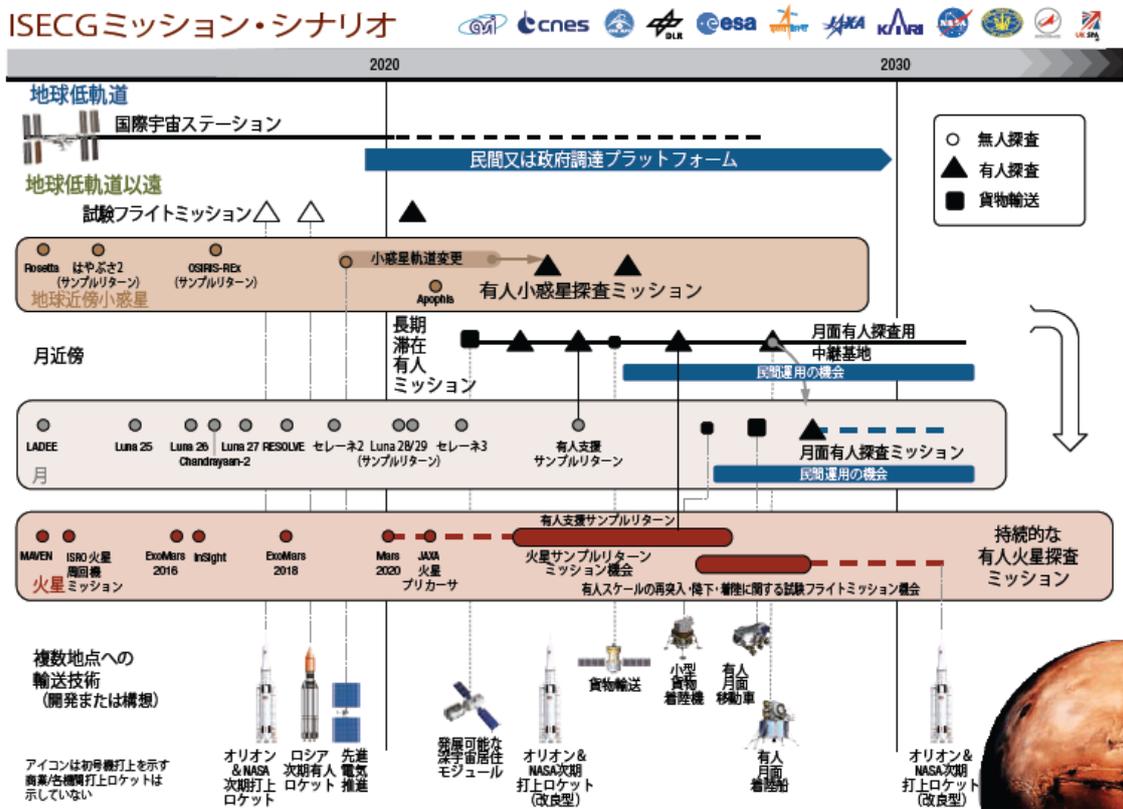


図 2 : ミッションシナリオ

## (2) 宇宙探査の各国概要

### a) 米国：NASA の“Journey to Mars” 計画

NASA は、2030 年代を目指して、以下のアプローチによる有人火星探査を計画

- ・フェーズ0 (ISS 利用)  
宇宙空間でのヒトの長期滞在に必要なデータ取得、宇宙放射線被爆対策等
- ・フェーズ1 (CISLUNAR フライトテスト：小惑星軌道変更等)  
火星探査の予備実験として小惑星探査、資源探査
- ・フェーズ2 (CISLUNAR 評価：1 年程度の有人飛行実証)  
フェーズ1 による評価
- ・フェーズ3 (月以遠の1 年程度の有人飛行)  
火星飛行の予備実験として長期有人宇宙飛行によるデータ取得
- ・フェーズ4a (ロボットによる準備ミッション)  
有人飛行前に、ロボットとの協調ミッション
- ・フェーズ4b (有人火星探査)  
2030 年代に、有人火星探査実行

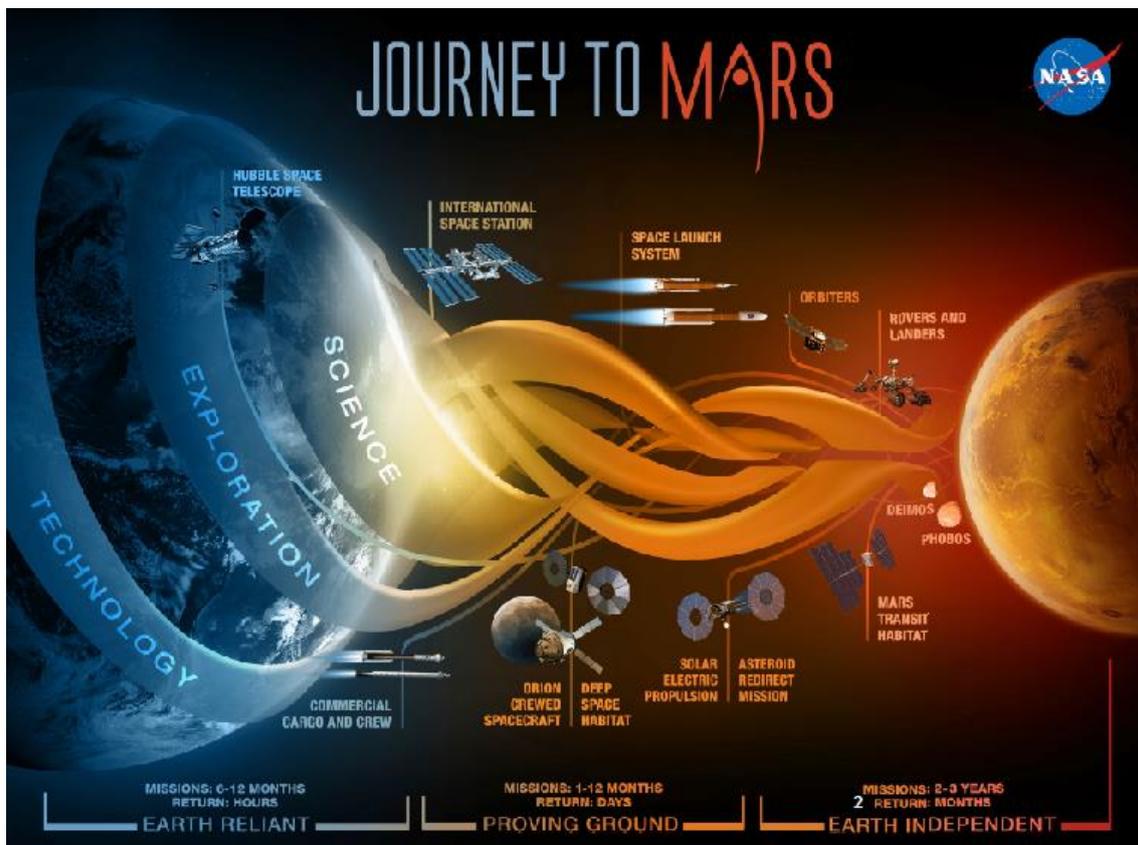


図3：NASA の“Journey to Mars”

#### b) ESA : Moon Village

ESA は、ベルナー長官自ら、国際協力による“Moon Village”構想を発表、科学、ビジネス、鉱物探査、ツーリズムも可能な意欲的な計画である。欧州はまた、有人宇宙船単独での開発という道には行かず、NASA 開発中の次世代宇宙船「オライオン」のサービス・モジュール(太陽電池やエンジンが収められた部分)の開発を担当することになった。オライオンは将来的に、月周辺にもってきた小惑星への有人飛行や、2030 年代に計画されている火星への有人飛行などに使われる予定なので、その際にオライオンに搭乗する宇宙飛行士の中に、必ず 1 人は ESA の飛行士が含まれる可能性が大きい。

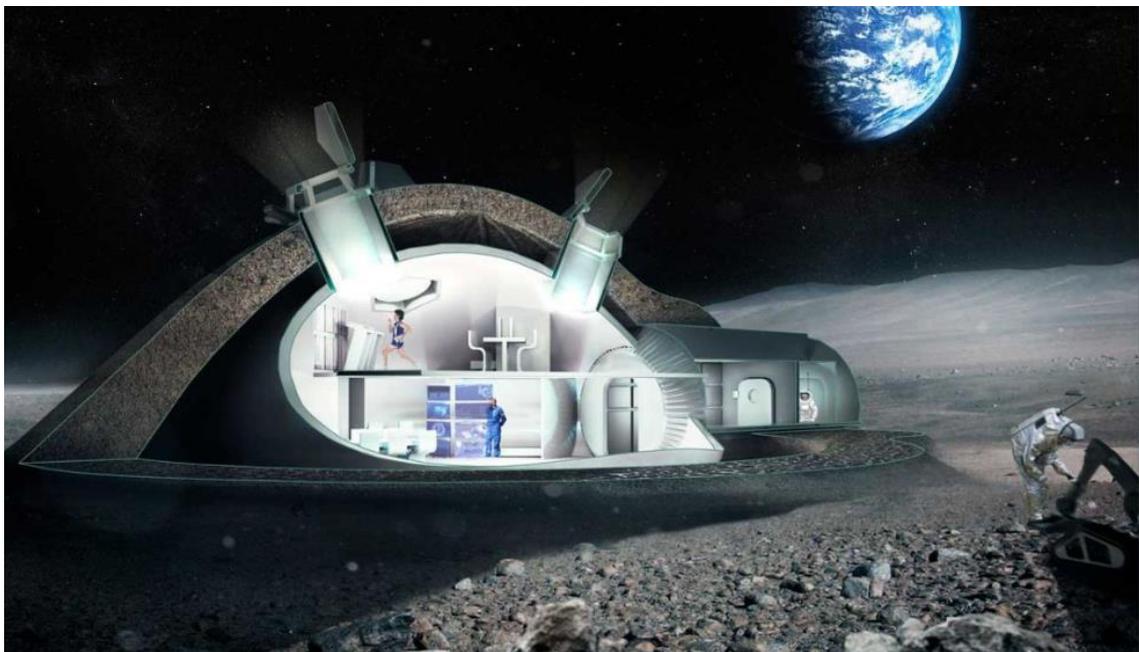


図 4 : ESA の“Moon Village”構想

#### c) 日本の探査シナリオ

平成 27 年 1 月に策定された新しい宇宙基本計画にも記載の通り、「国際有人宇宙探査については、計画が今後国際的に検討されるものであることから、他国の動向も十分に勘案の上、その方策や参加の在り方について、外交、産業基盤維持、産業競争力強化、科学技術等に与える効果と要する費用に関し、厳しい財政制約を踏まえつつ、厳格に評価を行った上で、慎重かつ総合的に検討を行う。」とし、有人の宇宙探査について実施するかどうか我が国としては決定していない。

また、JAXA では月、火星探査に必要な技術開発シナリオも併せて、検討中である。まず、ISS、JEM、HTV を活用した技術開発・技術蓄積に続き、ロボッ

ト技術を使った月探査、続いて、月周辺ミッション探査、月面ロボット・有人協調探査、月面有人探査、ロボットによる無人火星探査、ロボット・有人火星探査、有人火星探査を目指している。キーとなる技術課題は、月及び火星における燃料の生成（地球からは持ち込まない）であるとしている。

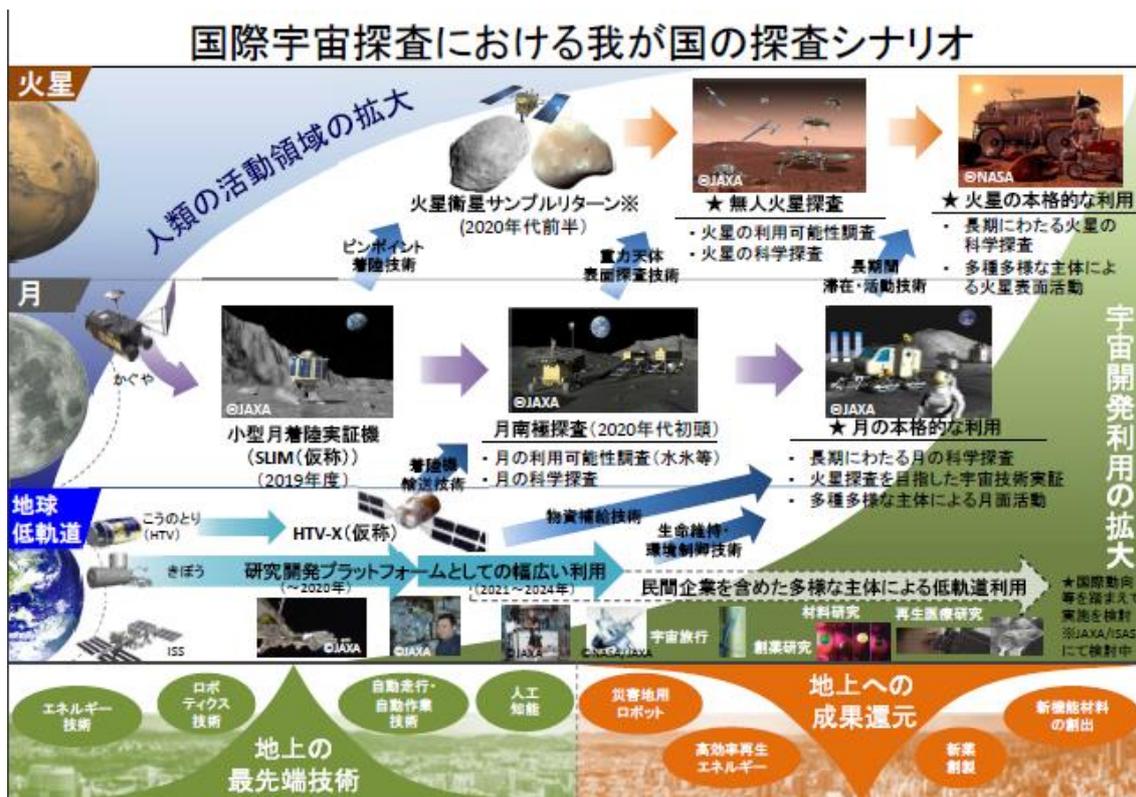


図5：日本の宇宙探査シナリオ

### 『宇宙探査イノベーションハブ』立上げ

「科学技術イノベーション総合戦略 2014」～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～(平成 26 年 6 月 24 日 閣議決定)という国の方針が示されている。この中で、公的研究機関の「強み」や地域の特性を生かして、イノベーションハブの形成に取り組むことが求められている。これを受け、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)でも、様々な異分野の人材・知識を集めた組織を構築し、これまでになかった新しい体制や取組で JAXA 全体に研究の展開や定着を目指すため、平成 27 年 4 月 1 日に、「宇宙探査イノベーションハブ」が新しく設置され、これまで宇宙事業に参入していなかった企業との間で宇宙探査に必要な技術開発を展開中である。



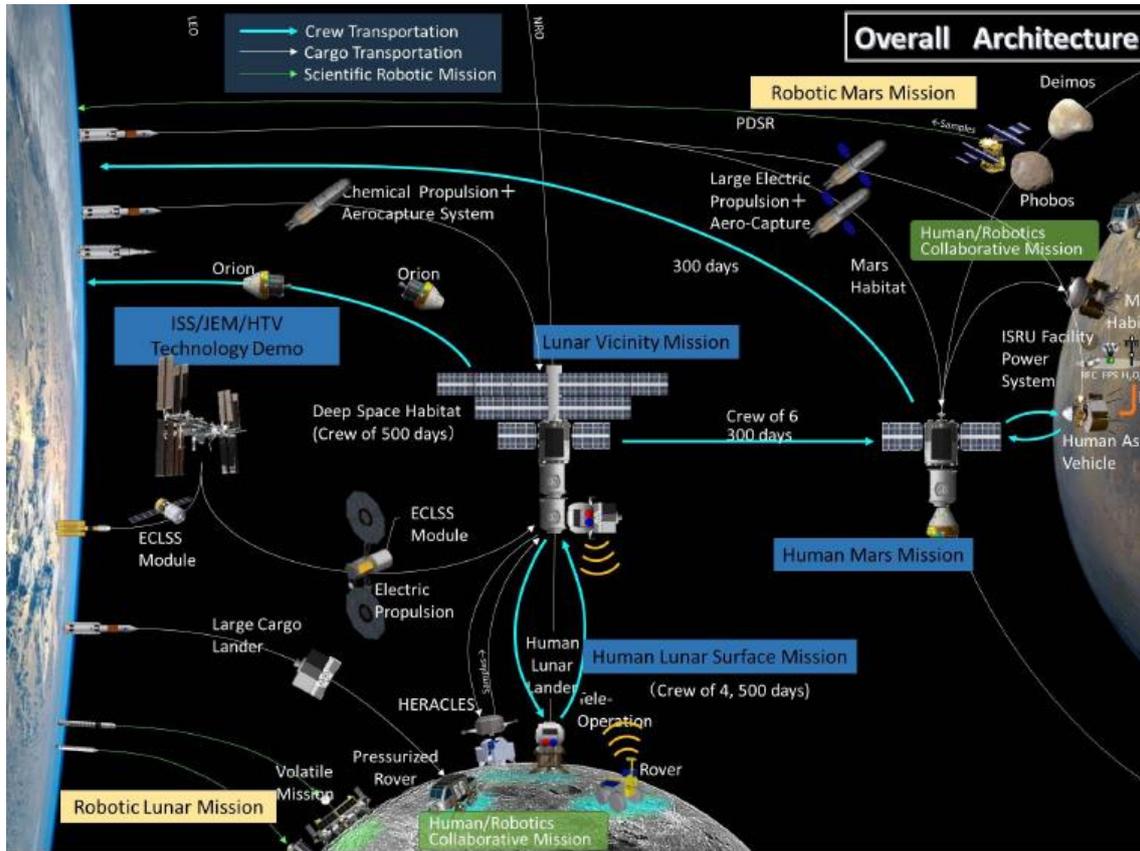


図6：JAXAによる月・火星探査に必要な技術開発シナリオ

d) ロシア

ロシアとして、有人宇宙探査計画は公表されていないが、ソユーズに代わる「フィディラーティヤ」と言う有人宇宙船開発を有し、2021年に無人試験飛行、2023年に有人飛行とする計画を公表しているが、フィディラーティヤを打ち上げるアンガラーA5Vロケットはまだ存在しないという問題を抱えている。



図7：フィディラーティヤ

ロシアは、月探査に関するロボット探査計画（図8）を公表している。1970年代のルナ探査機をベースとした構想である。

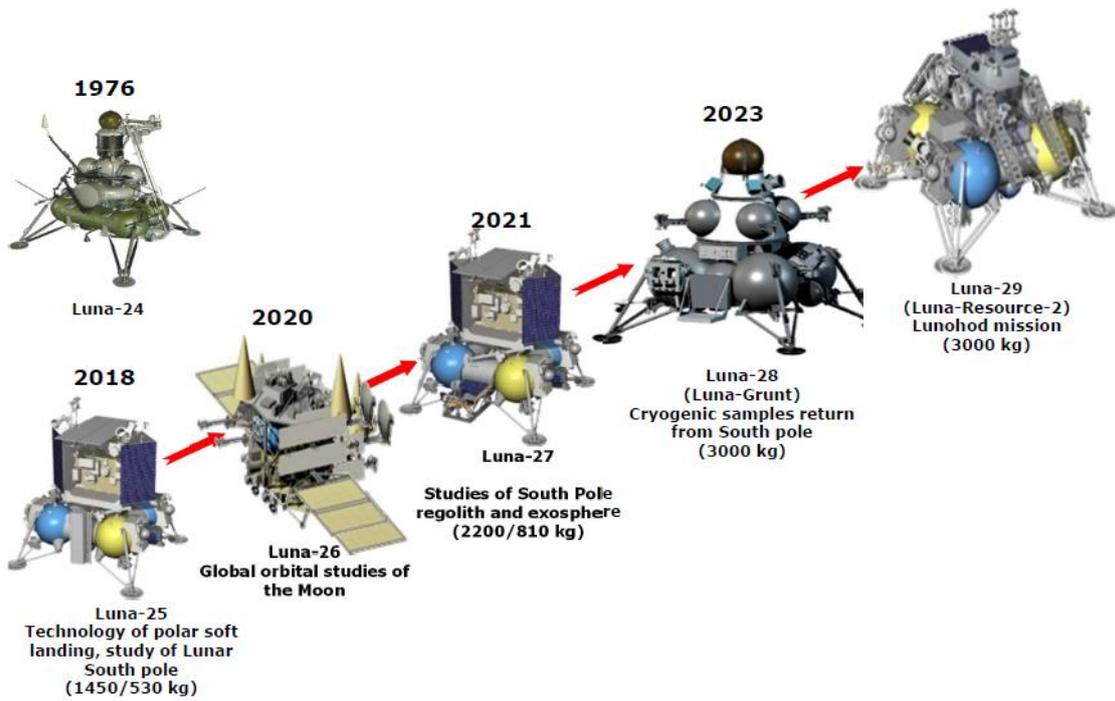


図 8 : ロシアの無人月探査機構想

更に、火星探査についての構想（図 9）も公表している。

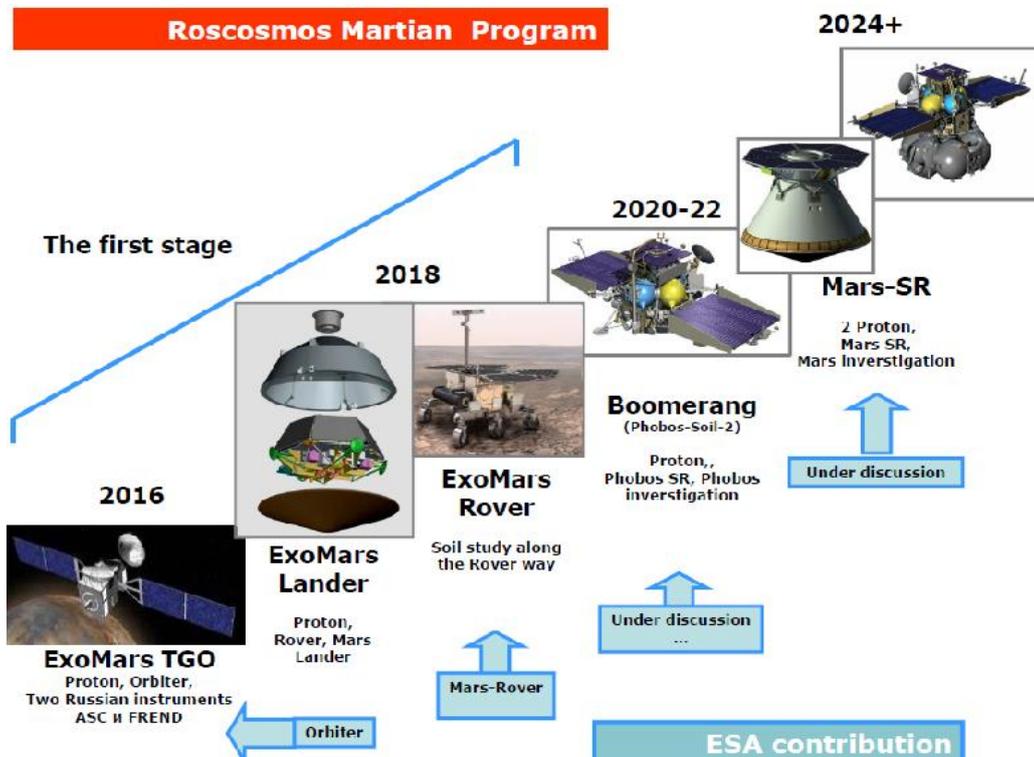


図 9 : ロシアの無人火星探査構想

ロシアの月探査、火星探査の目的は以下を想定している。

<月探査の目的>

- ・極域の探査
- ・水の探査
- ・月内部構造探査
- ・外気圏探査
- ・サンプル・リターン

<火星探査の目的>

- ・水及びメタンの探査
- ・生命の探査
- ・内部構造探査
- ・火星大気圏探査
- ・火星表面探査
- ・サンプル・リターン

#### e) 中国

中国無人月探査については、「周回」、「着陸」、「帰還」の3段階で進めており、嫦娥1号(2007年)、嫦娥2号(2010年)で周回探査、嫦娥3号が2013年12月に月面着陸成功、2014年に嫦娥5号の試験機(月往復技術試験(着陸無))を打上げ予定、2017年には「嫦娥5号」による月のサンプル採取・回収ミッションが計画されている。

また、2016年9月、宇宙ステーションの試験機「天宮二号」の打ち上げに成功、1か月後の10月には、2人の宇宙飛行士を乗せた有人宇宙船「神舟十一号」の打ち上げにも成功。2日後に神舟十一号は天宮二号にドッキングし、2人の宇宙飛行士は天宮二号の中に入り、約1か月間の宇宙滞在を経験後、地球に帰還した。

#### f) インド

将来の有人ミッションとして、2~3名の宇宙飛行士が搭乗する宇宙往還機を検討中。クルーモジュールや環境制御・生命維持システム(ECLSS)、緊急脱出システム等の有人技術を研究している。

### 3. 1 有人探査に向けた ISS 利用の文献調査

#### (1) NASA における有人宇宙研究

NASA の有人研究プログラム (HRP: Human Research Program) の目的は、人間の宇宙旅行を安全、確実に実施するための最良な方法、技術を開発するために行っている。HRP を担当する科学者や技術者は、例えば、食欲をそそる食べ物と放射線と月面ダストによってもたらされる環境のリスクを管理するための最適な栄養を提供する課題等についての予測、評価、および宇宙空間で発生するヒトへの問題を解決するため等幅広い研究・技術開発を行っている。また、宇宙飛行士の緊急時のデータ収集、課題解決能力の向上、健康維持の方法等も研究課題である。

有人研究には、有人宇宙飛行に必要な多くの側面が含まれている。

- ・環境要因
- ・運動生理学
- ・居住性
- ・ヒューマン・ファクター
- ・医療能力
- ・生理
- ・心理および行動面での健全性
- ・宇宙放射線

NASA の有人宇宙研究は、以下の六つの要素で構成されている。

- ・国際宇宙ステーションの宇宙医学研究プロジェクト
- ・宇宙放射線
- ・ヒトの健康対策
- ・探査医療機能
- ・行動様式
- ・ヒューマン・ファクターと居住性

#### (2) 有人飛行に伴う重大なリスク

有人宇宙飛行には様々な問題が伴う。例えば、宇宙船内という閉鎖空間、ガンのリスクが増大する宇宙放射線被爆、フリーズドライ食品の多い食料、筋肉・骨量減少、文化の異なる少人数（現状の ISS では、6 人）での生活。今後、有人火星探査が計画されているが、通常の ISS での 6 ヶ月滞在と、火星までの往復約 2、3 年の宇宙滞在はヒトへのリスクは同じではない。このリスクは、五つに分類できる。

- ・重力環境
- ・隔離
- ・閉鎖環境
- ・宇宙放射線
- ・遠隔（地球から遠く離れる）

ロシアではこれまで、ミール宇宙ステーション時代にポリャコフ宇宙飛行士が、1回の宇宙飛行連続記録400日以上の経験を有しているが、米国では



数名の宇宙飛行士によるISSでの約6ヶ月滞在が最長である。そこで、NASAはロシアと協力して、2015年から2016年にかけて、米露宇宙飛行士を約1年間、長期滞在させる実験を行った。NASAはケリー宇宙飛行士で、双子の兄弟ともにNASA宇宙飛行士である。この1年間の滞在経験は、今後の火星探査約3年のステッピングストーンである。

#### ①重力環境

有人火星飛行を行う場合、三つの重力環境を経験することになる。まずは、火星までの飛行中は無重力、火星上では地球の1/3の重力、地球に帰還すると1Gとなる。無重力環境では、大幅な骨密度減少が発生することが知られている。地上では50から60歳の男女で1年間に1~1.5%の骨密度減少が一般的であるが、宇宙では1ヶ月で1%減少する。地球への帰還後もリハビリ



が必要で放置すると骨粗しょう症となるリスクがある。これらを防ぐために、ISSでは、ビスフォスネート錠剤を服用すると共に、体への重力負荷を貸すための様々な機材が準備され、毎日約2時間の運動が課せられている。ISSに整備されているこれらの機材は以下のとおりである。

- ①トレッドミル (TVIS)
- ②エルゴメータ (CEVIS)
- ③改良型抵抗運動器具 (ARED)
- ④ミニチュア運動器具「MED-2 (Miniature Exercise Device)」

### ①トレッドミル (TVIS)

体をゴムバンドで床に押し付けた状態でランニングする機材。



### ②エルゴメータ (CEVIS)

車輪のない自転車のようなもので、ペダルをこぐ負荷を調節することにより運動量を調節することができる。



ロシア製



NASA 製

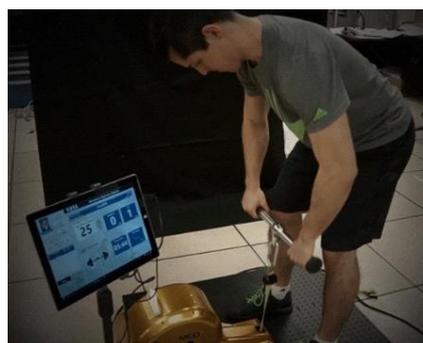
### ③改良型抵抗運動器具 (ARED)

ARED「エイレッド」は、ベンチプレス、スクワット、腹筋、重量挙げなど29種類のエクササイズに使える。AREDは、ゴムバネに替えて、真空シリンダを使用しているため、従来器具と比較すると4倍の負荷をかける事ができるようになった。AREDは、「トランクウィリティー」(ノード3) 内に設置されていて、ARED使用時は頭上にキューポラの窓が見えるため、地球を見ることもできます。



ISSの宇宙飛行士たちのために、NASAはコンパクトながらさまざまな運動が可能な器具を新たに④「MED-2 (Miniature Exercise Device)」を開発した。

本体は小さくて軽量。必要なスペースは畳半畳程度とごくわずかで、スクワットから腕回りまで、1つの器具で体中のトレーニングが可能とのこと。



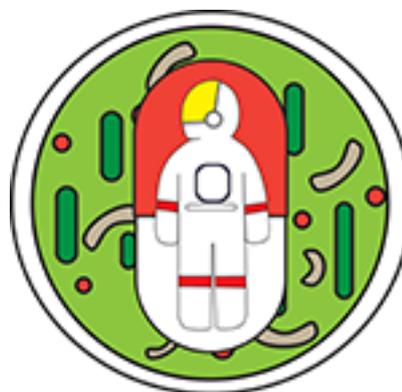
## ②隔離

長期間狭い空間に閉じ込められた人は、例え十分訓練された人でも行動に異常が起こることは避けられない。ISS滞在クルーは原則6ヶ月間滞在に堪えられるよう訓練されるが、火星飛行は往復3年程度必要で、これに堪えられるように訓練することは想像以上に大変である。SpaceXイーロン・マスク氏はIAC2016で彼の有人火星構想を発表したが、物理的に物を火星まで運ぶことしか考えていないように思える。人はその時々々の気分、相互の人間関係等で不安な状況に直面する。更に医学的に重要な課題として、睡眠問題がある。人は体内に24時間の体内時計をそれぞれ持っていて、光等の外的要因からこれを補正して、1日を過ごしているが、長期間の火星有人飛行では体内時計が正しく機能しないことは十分予測される。生鮮食料品不足、栄養欠乏等は生理的異変を引き起こし、宇宙飛行士の判断能力をも狂わせる結果となる。



## ③閉鎖環境

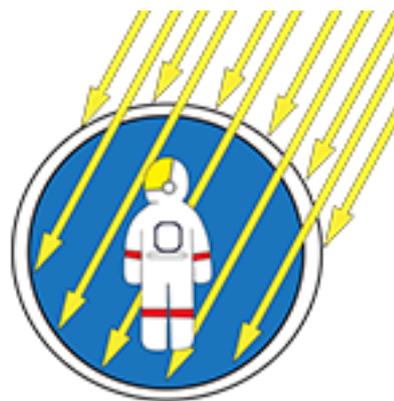
宇宙船内の生態系は、日々の宇宙飛行士の生活の中で、重要な役割を持っている。微生物は宇宙でその性格が変化する。普通に体内に生息する微生物は宇宙空間のような狭い場所では、ヒトから人へ更に容易に移動する。それはアレルギーや他の疾病等に耐性に対する免疫系の異常をもたらすことを意味する。宇宙船の設計はこの点も十分に考慮する必要がある。その為に、NASAは宇宙船内



のエアコンディションに最新の注意を払っている。ホルムアルデヒド、アンモニア、一酸化炭素には特に注意が必要である。また、血液、唾液、尿の検査は免疫系異常をチェックするために非常に重要な技術である。更に、LED 光は自然な地球の光を再現できる有効な技術である。

#### ④宇宙放射線

火星への有人飛行で最も危険な要因が宇宙放射線である。ISS では、宇宙飛行士は地上の我々よりも 10 倍の宇宙放射線に被曝している。地球は磁力線や大気により宇宙放射線が防御されているが、火星への飛行はこれら自然の防御システムがないので、問題は深刻である。宇宙放射線被曝は細胞のガン化だけでなく、悪寒、嘔吐、食欲不振、疲労等様々な症状を引き起こす。白内障や循環器系疾患の危険性もある。宇宙船内で摂取する食料や医薬品は当然宇宙船被曝するので、これらが安全であることも要求される。従って、火星飛行宇宙船、火星の住居は、これらの宇宙放射線から人体を十分保護できる能力を持つこと必須である。宇宙放射線対策は、現在、ISS は勿論、地上研究においても最重要課題として様々な研究者が取り組んでいる。



#### ⑤遠隔（地球から遠く離れる）

地球から火星までは約 2.25 億キロ、地球から月までは 380 万キロである。火星との通信には片道で 20 分、単純な往復で 40 分かかる。ということは、地球と火星との間で何かを確認するためには 40 分以上必要なので、火星では様々なことは自ら判断できるように訓練しなければ、生命が脅かされることになる。



NASA は、これらのリスクのすべてに対応するために、リスクの最小化または人体への悪影響を回避しようとして研究している。ISS での 1 年間の長期滞在実験の結果は、更に長時間のミッション成功のための足がかりとなる。火星への旅に人間を送ることは、私たちが知っている重力世界に無事の帰宅を確認するために未知数を征服していることを意味する。

以上の課題を認識し、NASA は、有人研究（HRP : Human Research Program）

として、以下の研究を行っている。

- ・ **健全な行動とパフォーマンス (BHP : Behavioral Health and Performance)**

BHP は、行動の健全性や精神状態のリスクを軽減するための研究である。チーム内の不適切な協力や意思疎通不足から起こるパフォーマンスの低下と、睡眠不足や業務の過負荷に起因する事故の低減対策である。

- ・ **探査に必要な医療能力 (Exploration Medical Capability)**

探査に参加する宇宙飛行士がメディカルドクターであるとは限らないので、長期の飛行に際して、それぞれの飛行士に医療の能力訓練を施す必要がある。

- ・ **ヒトの健康対策 (Human Health Countermeasures)**

飛行中の宇宙飛行士がけがや病気になった場合の処置方法を飛行前に訓練によって基礎知識として訓練する必要がある。

- ・ **ISS における医学プロジェクト (International Space Station Medical Projects)**

それぞれの宇宙飛行士が飛行前、飛行中、飛行後のそれぞれのフェーズで健康を維持しているか、微小重力環境が宇宙飛行士にどのような影響を与えているか、飛行後のリハビリ方法等を具体化するために、心電図、血圧等の生体モニター、血液検査、排出物（糞、尿）検査等、皮膚電気反射（呼吸等の基本的生体情報と精神発汗と動揺の関連性）様々な医療データを基礎データとして取得する。

- ・ **スペースヒューマンファクターと居住性 (Space Human Factors and Habitability)**

細かい運動能力に対する長期間の微小重力環境の影響 (Fine Motor Skills/Fine Motor Control)、ISS の居住性評価 (Habitability)、長期間の宇宙飛行が訓練の記憶力に及ぼす影響 (Training Retention)等に関する研究

- ・ **宇宙放射線 (Space Radiation)**

地上で日常生活を送る私たちの被ばく線量は、1年間で約2.4 ミリシーベルトと言われている。一方、ISS 滞在中の宇宙飛行士の被ばく線量は、1日当たり0.5~1 ミリシーベルトになり、軌道上の1日当たりの放射線量は、地上での数か月~半年分に相当することになる。宇宙放射線の人体への影響は、一定レベル以上の被ばく量で目の水晶体に混濁等の臨床症状が生じる影響と発がん等の被ばく量が増えるにつれて生じる影響とがある。このため被ばく量を一定レベ

ル以下にすれば、これらの影響が発生しないか、発生する確率を抑えることができる。JAXA では宇宙放射線被ばく管理を実施し、被ばく量を一定レベル以下に管理し宇宙飛行士に健康障害が発生しないようにするために以下のようなアプローチをとっている。

- (1) ISS 内の放射線環境の変動をリアルタイムに把握し、ミッション中の被ばく線量を可能な限り低く抑えること
- (2) 宇宙飛行士が実際に被ばくした線量を把握し、生涯の被ばく線量を制限値以下に抑えること

JAXAは、船内の放射線環境を測定するAreaPADLESと、宇宙飛行士の被曝線量計測を行うCrewPADLESを使っている。

### 【JEM船内定点放射線環境計測実験 (Area PADLES)】次世代の宇宙船の遮蔽設計や材料選定など、放射線防護技術にも貢献

AreaPADLES はきぼう船内の放射線を計測する受動式線量計で、計17 個をソユーズ宇宙船を使って約6 ヶ月毎に交換して、地上で各滞在期間中の積算線量を管理するために継続的な計測を行っており、宇宙実験テーマ提案者や有償実験利用者等へ実験計画立案に必要な「きぼう」船内の宇宙放射線環境情報を提供している。



図10 Area PADLESと配置位置

### 【宇宙飛行士の個人被ばく線量計測 (Crew PADLES)】宇宙放射線の被ばく線量の把握とリスク評価手法を確立

軌道上滞在中の正確な被ばく線量の把握とリスク評価手法を確立し、2009 年から全JAXA 宇宙飛行士用線量計として、ISS 長期滞在クルーの飛行中の被ばく線量計測を行っている。現在は、実験から医学運用に移行して実施中。



図11 Crew PADLES

### リアルタイム線量当量計測技術の確立 (PS-TEPC)

将来の深宇宙への有人探査を考えると、線量測定計測器のサイズや重量や測定精度に対する制限が厳しくなるため、コンパクトな線量計が求められる。このため、宇宙機船内用の高精度かつコンパクトで、リアルタイム計測ができる線量計としてPS-TEPC(Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber)を高エネルギー加速器研究機構と共同で開発した。これをISS上に搭載し、動作の実証試験を行っている。本装置はきぼう船内に設置して計測を行うと共に、同時期に取得した受動式のPADLES線量計および、NASAのリアルタイム方式のTEPCのデータとの比較を行って測定結果の検証を行う予定である。



図12 PS-TEC の設置場所 (JEM)

### 「きぼう」船外の宇宙放射線環境モニタリング (Free-Space PADLES)

本実験では、きぼうエアロックからFree-Space PADLES 線量計を船外に出し、きぼうロボットアームの先端に把持させた状態で線量計測を行うものである。遮蔽の厚さを8種類変えた与圧耐圧ケースを用いて、きぼう船内では取得不可能な(きぼう船壁よりも薄い)遮蔽厚に対する線量減衰データを取得する。同時に計測するきぼう船内の線量との比較により、船壁による遮蔽効果も併せて評価する。これらのデータは、宇宙放射線の遮蔽材料の評価・新材料の創出に活用する予定である。

Free-Space PADLESは、SpX-6で打上げ、超小型衛星放出のタイミングで船外に出した状態で約1ヶ月計測する予定である。その後、地上に回収して被ばく線量を解析する。

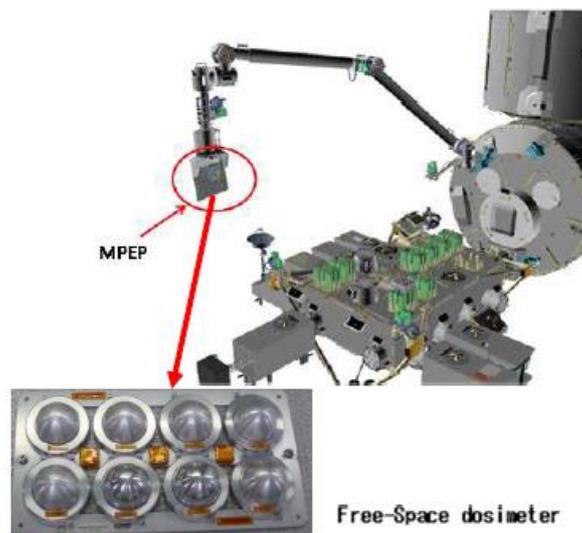


図13 Free-Space PADRES

### (3) 有人飛行に伴う重大なリスク分布

有人探査ミッションリファレンスに対するヒトの健康リスク分布												
ヒトに対するリスク	ミッションリスク(軌道上運用中)						ポストミッションリスク(長期的健康)					
	地球低軌道	地球低軌道	深宇宙探査出発	月面探査・居住	深宇宙探査・居住	探査	地球低軌道	地球低軌道	深宇宙探査出発	月面探査・居住	深宇宙探査・居住	探査
	6ヶ月	12ヶ月	30日	1年	1年	8年	6ヶ月	12ヶ月	30日	1年	1年	3年
視覚障害	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	RM	RM
腎結石	A	A	A	A	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM
不適切な食事と栄養	A	A	A	A	A	TBD	A	A	A	A	A	RM
宇宙放射線被曝	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	RM	RM	RM
薬剤長期保管	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	RM
急性及び慢性二酸化炭素中毒	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	A	A
飛行中疾病	A	A	A	RM	RM	RM	A	A	A	RM	RM	RM
認知および行動条件	A	RM	A	RM	RM	RM	A	A	A	A	A	RM
骨折	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	A
人間工学設計	A	A	A	RM	RM	RM	A	A	A	A	A	A
チームの性能低下	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	A	A
心管理	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	A	A
筋肉量減少と筋力低下	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	RM
有酸素容量低下	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	RM
感覚の変化	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	A	RM
過負荷による怪我	A	A	RM	RM	RM	RM	A	A	RM	RM	RM	RM
睡眠不足	A	A	A	A	RM	RM	A	A	A	A	RM	RM
免疫応答	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	RM
宇宙塵被曝	N/A	N/A	TBD	A	TBD	TBD	N/A	N/A	TBD	A	TBD	TBD
微生物に影響	A	A	A	A	A	RM	A	A	A	A	A	RM
EVAによる怪我	A	A	A	RM	A	RM	A	A	A	RM	A	RM
減圧による疾病	A	A	RM	A	A	RM	A	A	A	RM	A	RM
毒物	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
低酸素症	RM	RM	A	RM	RM	RM	A	A	A	A	A	A
宇宙適応中の痛み	A	A	A	A	A	A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
尿結石	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
宇宙飛行に伴う難聴	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
起立不耐症	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
日光曝露による傷害	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
電気ショック	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

A: Accepted 現状の対策で受入可能  
 RM: Require Mitigation 軽減化対策が必要  
 TBD: 今後検討

Green 低リスク      Yellow 中程度のリスク      Red 高リスク

出典: NASA Advisory Council on 31 March 2016

図 14 有人探査ミッションリファレンスに対するヒトの健康リスク分布

視覚障害頭蓋内圧力 (VIIP) 症候群は現在、NASA のナンバーワンの有人宇宙飛行のリスクである。微小重力曝露に関連する症候群は、視力 (遠視シフト、暗点)、眼の構造の変化 (視神経乳頭浮腫、脈絡膜ひだ、綿状白斑、地球平坦化、および膨張した視神経鞘) の変化に現れる。いくつかの場合において、上昇した脳脊髄液圧が上昇し頭蓋内圧 (ICP) を反映飛行後スクリプトが実証されている。眼がこの症候群の主な影響を受けた末端器官であると思われるが、眼は、血管系に頭流体シフトおよび中枢神経系の効



図 15 眼圧測定する様子

果に関連すると考えられている影響を与える。

これは2013年から開始された新しい実験で、現在、この眼の問題がホットな研究テーマとなっており解明が急がれている。微小重力環境では頭蓋内の圧力(体液シフト)により視野がぼける、眼圧の上昇、網膜の膨張などの問題がクルーの間から報告されている。超音波検査、眼底検査、眼圧測定、血圧測定、映像による確認などを行って、まずはデータを集めて何がこの問題を引き起こしているかを解明していき、帰還後の回復に役立てるようにしていく。



図 16 眼球を超音波測定する星出宇宙飛行士

**【参考】ISSに滞在する宇宙飛行士が報告している視覚の問題**

ISSミッションクルーの約20%で眼の焦点の調整がうまくいかない症状 VIIP(visual impairment and intracranial pressure syndrome)が報告されており、2011年ごろから話題に出るようになりました。これは無重量環境で生じる流体シフト(心臓に近い頭への血流が増加する)により、頭蓋内の圧力が増加する影響で引き起こされる機能障害とされています。

眼圧をトノメトリーを使って定期的に測定し、超音波装置による眼のスキャンも行われています。今回の1年間の宇宙滞在ミッションでもこの問題を調査します。今回は初めて、ロシアの下半身陰圧負荷装置を軌道上で使って流体シフトを打消し、視覚に変化が出るかを確認します。

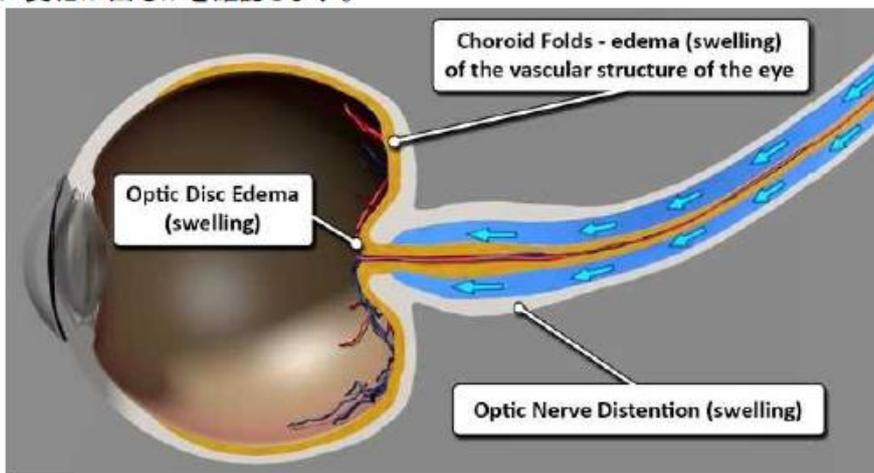


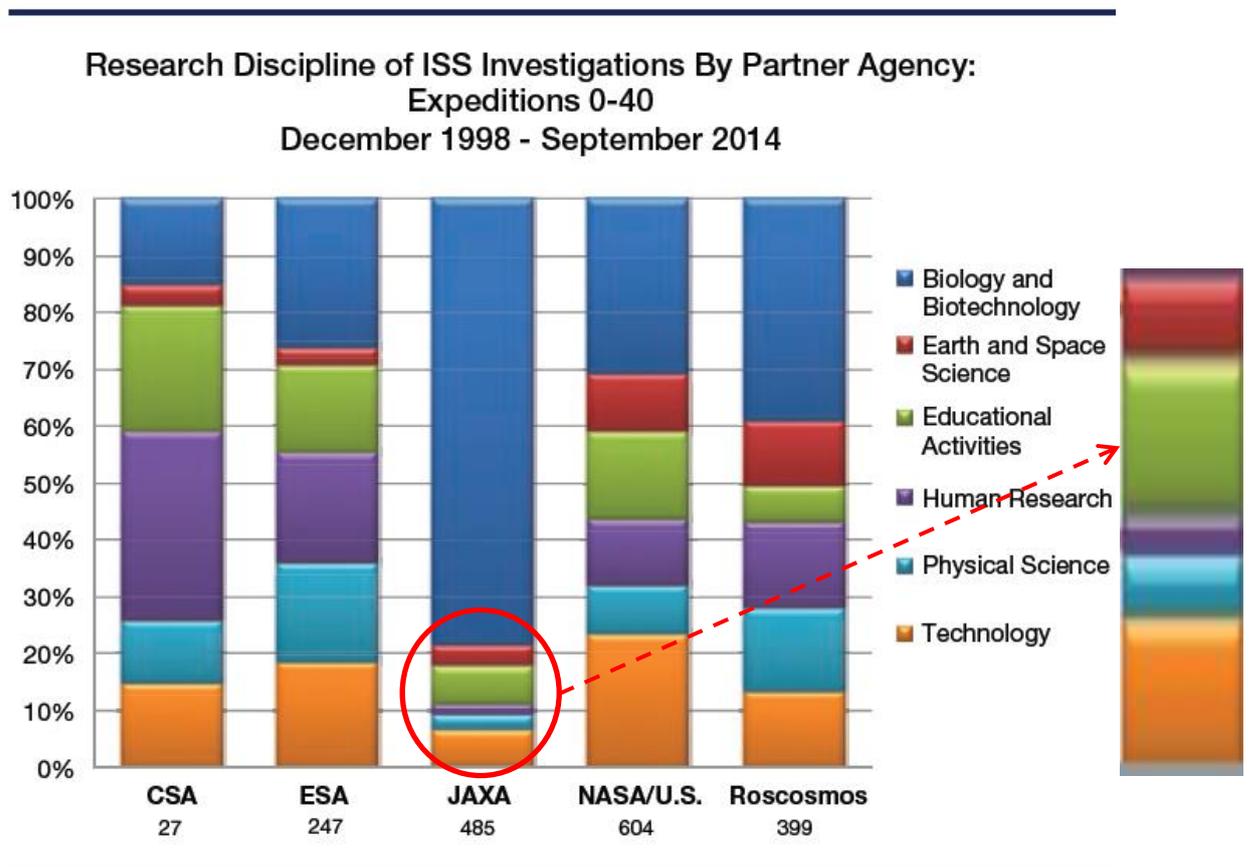
図 4.1.2-5 Vision Changes in Space (2014年2月 NASAの動画より)  
Swelling(腫れ)、edema(浮腫)、distention(膨張)、Choroid fold(脈絡膜のしわ)

宇宙飛行士の視覚の問題 (腫れ、浮腫、膨張、脈絡膜のしわ)

(4) NASA、ESA、CSA、JAXA が実施している宇宙探査のための基礎的データとなる宇宙実験内容

ISS 計画に参加している5極（米、欧、加、日、露）が、1998年のISS組立て開始から2014年9月までに実施した宇宙実験の分野ごとのテーマ数比較を下図に示す。なお、JAXAの宇宙実験の中でバイオテクノロジーが突出しているのはタンパク質結晶化実験のテーマ数（約380）によるものである。（その他の分野の実験テーマ割合は、他の宇宙機関のそれとほぼ同程度である。）

図 17 ISS における宇宙機関毎の実験分野比較

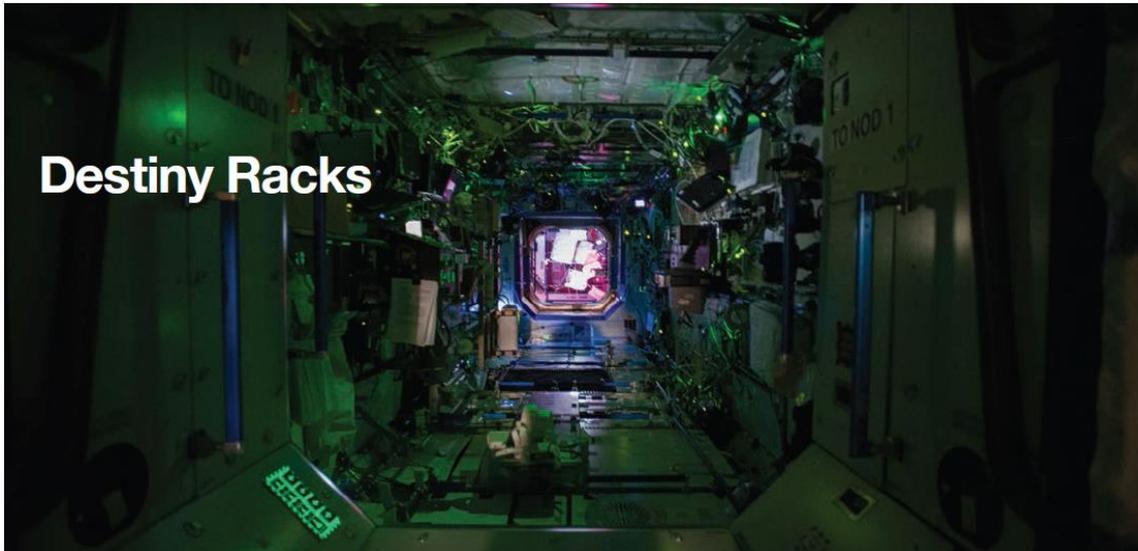


1) ISS 内の宇宙実験用装置

ISS に自国の宇宙実験棟を所有するのは、米国、欧州、日本、ロシアである。ロシアは単独の運用を行っているため詳細は定かでない。

米国はデスティニー (US Lab)、欧州はコロンバス、日本は「きぼう」のそれぞれの実験モジュールを有し、様々な実験装置が整備されている。

①米国実験棟 (デスティニー : US Lab)



EXPRESS Rack 1



*Sub-rack-sized experiments with standard utilities such as power, data, cooling, and*

EXPRESS Rack 2



EXPRESS Rack 6



EXPRESS Rack 7



Combustion Integrated Rack (CIR)



*ed experiments with utilities such as power, data, and gases.*

生命系、バイオテクノロジー、物理系実験装置

燃焼実験装置

Fluids Integrated Rack (FIR)



流体実験装置

*microgravity experiments.*

Materials Science Research Rack-1 (MSRR-1)



材料実験装置

Microgravity Science Glovebox (MSG)



生命系実験装置

*small glovebox sized experiments.*

Window Observational Research Facility (WORF)



外部観測窓

Minus Eighty-Degree Laboratory Freezer for ISS (MELFI-3)



冷凍・冷蔵庫

②ESA 実験棟 (コロンバス)



**EXPRESS  
Rack 3**



生命系実験装置

**Multipurpose Small  
Payload Rack 1  
(MSPR-1)**



多目的実験装置

**Muscle Atrophy  
Research and Exercise  
System (MARES)**



宇宙医学装置

**Human Research  
Facility  
(HRF-1)**



有人研究装置 1

**Human Research  
Facility  
(HRF-2)**



有人研究装置 2

**Biological Experiment  
Laboratory  
(BioLab)**



生物系実験装置

**European  
Drawer Rack  
(EDR)**



小型実験装置

**European Physiology  
Module  
(EPM)**



生理学実験装置

**Fluid Science  
Laboratory  
(FSL)**



流体実験装置

**KOBAIRO**



材料実験装置

③日本の実験棟（きぼう：KIBO）



**Minus Eighty-Degree Laboratory Freezer for ISS (MELFI-1)**



冷凍・冷蔵庫

**Minus Eighty-Degree Laboratory Freezer for ISS (MELFI-2)**



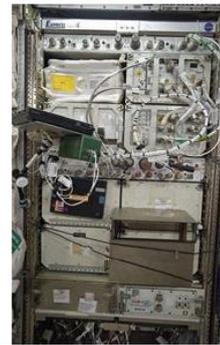
冷凍・冷蔵庫

**Multipurpose Small Payload Rack 1 (MSPR-1)**



小型実験装置

**EXPRESS Rack 4**



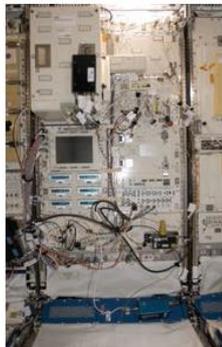
小型実験装置

**EXPRESS Rack 5**



小型実験装置

**Ryutai Experiment Rack**



流体実験装置

**Saibo Experiment Rack**



細胞培養装置

**KOBAIRO**



温度勾配炉

*supplies resources to them.*

## 2) ISS で NASA、ESA、CSA、JAXA が実施している宇宙探査のための基礎的データとなる宇宙実験テーマとその概要

### ①Repository実験(NASA Biological Specimen Repository)

この実験は、飛行前、飛行中、帰還後の生医学標本（血液、尿など）を採取しておき、将来の研究に備えてNASAが長期間保存しておくものである。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/981.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/981.html)

### ②Ocular Health実験 (Prospective Observational Study of Ocular Health in ISS Crews)

これは2013年から開始された新しい実験で、現在、この眼の問題がホットな研究テーマとなっており解明が急がれている。微小重力環境では頭蓋内の圧力(体液シフト)により視野がぼける、眼圧の上昇、網膜の膨張などの問題がクルーの間から報告されていて、超音波検査、眼底検査、眼圧測定、血圧測定、映像による確認などを行って、まずはデータを集めて何がこの問題を引き起こしているかを解明していき、帰還後の回復に役立てるようにしている。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/204.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/204.html)

### ③Manual Control実験(Assessment of Operator Proficiency Following Long-Duration Space Flight)

シャトル帰還時の経験から微小重力環境に曝されていたクルーは操縦能力が低下することが確認されていて、この実験は飛行前後に実施するもので、軌道上での実験は行なわない。6自由度のモーションベースマシンを使って、飛行前後にローバーの操縦やT-38での着陸シミュレーションなどを行うことで、感覚運動障害の影響を調べるものである。データ取得は飛行前後で計7回実施され、将来の有人惑星探査におけるクルーの操作技量維持等の対処策への応用が研究の成果として期待されている。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/850.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/850.html)

### ④Functional Task Test実験(Physiological Factors Contributing to Postflight Changes in Functional Performance)

宇宙飛行を行うと心臓血管系、感覚運動系などの生理系に変化が生じるが、このような状態だと惑星に着陸した直後に行う重要な作業に影響を及ぼすことが考えられる。このため、打上げ前と帰還後に試験を行って、体にどのような影響が生じるのかを調べる(軌道上では実験しない)。試験項目には、はしご上り、ハッチを開ける操作、飛び降りる動作、手動操作や工具の使用、座席からの脱

出、障害物の回避、繊細な作業の試験など、身体機能や運動能力の確認が行われる。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/126.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/126.html)

#### ⑤Sprint実験 (Integrated Resistance and Aerobic Training Study)

ISS滞在クルーの長期滞在中に、筋力や骨量の喪失と、心臓血管系機能の低下をできるだけ減らすために、負荷の高い運動をあまり時間をかけずに行うエクササイズ方法を評価する実験である。エクササイズプロトコルとしては、週3日AREDを使った負荷の高い抵抗運動を行うことで、骨格筋の量と機能の喪失を防ぐと共に、骨の健全性を守るというものである。これまでは、AREDを週6日間、比較的負荷の低い状態で時間をかけてエクササイズを行っている。また、心肺機能を維持するためのエアロビックエクササイズもこれまでのように毎日行うのではなく、1日おきに負荷を高めて実施することで効率を上げるというものである。これらの効果を比較するために、最大酸素摂取量の測定と、心拍数、超音波装置を使った筋量の計測を軌道上と飛行前後に地上で行う。また帰還後に筋肉の組織検査を行うなどして、従来方式のエクササイズを行ったクルーとの比較を行い、有効性を確認する実験である。

ISSでの現状のエクササイズは、長期間の宇宙飛行における喪失を防ぐには不十分であり、180日間を超えるような長期滞在を行う場合、エクササイズ時間の合計を減らすことができれば非常に効率的となる。地上でのベッドレスト実験(頭を下げた状態で寝たまま過ごすことにより、宇宙滞在時と同様な体の衰えを模擬する実験)や、軌道上でのこれまでの実験成果ではいい効果がでていようである。エクササイズは1日おき(運動をした翌日はエアロビック運動を15-30分行うのみ、また運動の負荷(軽、中、重)も日によって変えていく)となり、従来の方法と比べると、週に3時間エクササイズ時間を節約できることになる。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/Sprint.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/Sprint.html)

#### ⑥Journals 実験(Behavioral Issues Associated with isolation and Confinement: Review and Analysis of Astronaut Journals)

閉鎖環境におかれた状況で起きる行動に関する問題(ストレスや健康状態、意欲)を日誌に記録していく実験である。ここで得られた教訓を基に、機器の設計や手順書の改良などに反映している。2003年から長期間にわたって続けられている実験である。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/991.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/991.html)

### ⑦Reaction Self Test実験(Psychomotor Vigilance Self Test on the ISS)

ISS滞在中の疲労度をラップトップを使って5分間で判定していく簡単な実験である。睡眠時間の減少や残業の影響、生体リズムのずれなどの影響で疲労が出て作業効率に低下が生じていないかを調べる。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/982.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/982.html)

### ⑧Space Headaches実験

この宇宙での頭痛実験は、微小重力環境下で報告されている頭痛の原因を調べ、対策を探るためのESAが実施する研究である。どのような時に頭痛が起きたか状況を記録していく。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/181.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/181.html)

### ⑨Hapstics-1

Hapstics-1はATV-5で運ばれて2014年秋から行われているESAの実験で、宇宙から惑星や衛星へ降ろした探査ローバーなどをリモートコントロールで操縦しようとする場合に、力のフィードバックをhaptic(触覚)で感じることで操縦能力を向上できということを実証するための基礎実験である。サーボモータに接続されたジョイスティックを操作し、データの取得を行う。



図18 Hapsticsのジョイスティック

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Astronaut\\_feels\\_the\\_force](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Astronaut_feels_the_force)

### ⑩ロボノート2 (R2)

NASAとゼネラルモーターズ(GM)社が開発した人型ロボットで、宇宙でのロボットの有効性を検証するため、掃除や簡単な操作などの単純作業を行わせる実験が続けられている。2014年末には2本の脚が追加され、これから新たな検証実験が行われている。



図 19 ロボノートと追加された足

#### ⑪RRM (Robotic Refueling Mission)

RRMは地上からロボットを操作することで、軌道上で人工衛星に燃料補給するのに必要な各種技術を検証する米国の実験(地上からすべて行われるためクルーは本作業には関わらない)。「カナダアーム2」(SSRMS)で「デクスター」(SPDM)を把持し、SPDMの腕でRRM用に開発された4種類のツールを把持して様々な作業を行えるようにしている。HTV4とATV-5に搭載して運んだ第2期実験用の新たな装置を2015年4月にきぼうのエアロックから船外に持ち出し、その後第2期実験が行われた。



図20 RRM実験の様子

#### ⑫CIR (Combustion Integrated Rack)

NASAが管理する大型冷蔵庫ほどの大きさのある大型の燃焼実験装置で、燃焼現象や火災の消火に関する基礎的な実験を行っている。最近、シグナス宇宙補給機の帰還便を利用した燃焼実験も実施された。

⑬**微小重力実験用グローブボックス MSG(Microgravity Science Glove Box)**

有害なガスや生物試料等が外部に漏れることが無いようにISSの与圧空間内よりも常に低い気圧を維持し、清浄度の高い空気を循環できる隔離・密閉された作業空間を有したグローブボックスであり、この中に様々な装置を設置することで燃焼実験や流体実験など、通常の空間で行うにはリスクを有する実験を行うことができる。最近では3Dプリンターの実証試験もこの中で行われた。



図 21 マイクログラビティグローブボックス (MSG)

⑭**ロシアの植物栽培実験装置Lada**

ロシアは米露が共同開発したこの装置を使って、これまでに水菜、えんどう豆、大根、小麦、ミニトマトなどの栽培実験を行っている。この装置の原型はミール時代から使われており、何度も改良されながら植物栽培実験が続けられている。



図 22 Lada で栽培した水菜

#### ⑮無重力ストレスの化学的シグナルへの変換機構の解明 (Cell Mechanosensing)

地上研究において骨格筋細胞には機械的ストレスのセンサー（受容器）が存在することが強く示唆されてきましたが、細胞自身がどのように機械的ストレス（重力）を感知し、それを細胞の応答（成長・増殖・分化）に結びつけるかは長年不明であった。本研究は、無重力環境で培養した骨格筋細胞を用い、細胞の機械的（重力）ストレスの感知機構を明らかにすることにより、無重力環境における筋萎縮のメカニズムを解明するものである。

筋肉細胞などが重力を感じるメカニズムを明らかにする一方で、筋萎縮への対策も確認する。2010年に実施したJAXAのMyo Lab（タンパク質ユビキチンリガーゼCblを介した筋萎縮の新規メカニズム）実験の結果、筋萎縮に効果があるとわかった薬剤を用い、骨格筋細胞に与えて、宇宙での筋細胞への効果を確かめる。細胞に発現している遺伝子を比べるために、遺伝子を保存する薬剤を用いた上で冷凍して回収する。本実験はシリーズの3回目で、スペースX社のドラゴン補給船運用7号機で運ばれた。

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/cellmechanosensing/>

#### ⑯ISS搭載凍結胚から発生したマウスを用いた宇宙放射線の生物影響研究

##### (Embryo Rad)

凍結した受精卵を用いて宇宙放射線の影響を調べる実験である。凍結していても宇宙放射線の影響を受けることは、2009年にきぼうで行われた実験（Rad GeneとLOH実験）で確認されている。実験はサンプルを打上げ、その後冷凍冷蔵庫内で冷凍保管し、適宜サンプルを回収する。地上に帰還した凍結受精卵は、仮親に移植後、発生させて宇宙放射線被ばくの影響を解析する。生物には放射線等でDNAにできた傷を修復する仕組みが備わっているが、放射線感受性の高いマウスやDNA修復欠損マウスの受精卵を発生させた宇宙マウスでは、地上マウスに比べて個体発生率の低下、寿命短縮、発がん率の増加及び宇宙放射線特有の遺伝子変異などが観察される可能性がある。本研究により得られる長期宇宙滞在による宇宙放射線の哺乳動物への影響に関する知見を活用し、将来の有人宇宙探査における放射線防護のための基礎データを提供し、リスク評価や防護基準の策定に貢献する。

#### ⑰ほ乳類の繁殖における宇宙環境の影響 (Space Pup)

##### 遺伝子資源の宇宙での保存の可能性に挑戦

本実験の目的は、ほ乳類の初期発生における微小重力環境の影響を調べることであり、宇宙で初期発生が進むかどうかを検証するための宇宙実験を行う。フリーズドライ状態で保存した精子から産仔（子ども）を得る技術を用い、宇

宙放射線の精子への影響を3回に分けて地上に回収して調査します。地上へ回収した精子は、顕微授精（顕微鏡下で精子を卵子内へ注入すること）を行う。そして宇宙保存精子による受精率、放射線の影響、DNA 損傷（修復）率、初期発生の正常性、および最も重要な産仔の出産率を調べる。本研究は良質な肉や毛を持つ家畜の繁殖や、生殖細胞の保存にも応用できる。

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/spacepup/>

#### ⑱ 万能細胞（ES細胞）を用いた宇宙環境が生殖細胞に及ぼす影響の研究（Stem Cells）

ES細胞を用いて、宇宙環境における放射線の影響が哺乳類動物細胞に与える影響を詳細に調べる実験である。

本実験では放射線の影響を、マウスのES細胞を用いて調べる。長期（最長3年程度）の宇宙放射線の影響、特に子孫にかかわる生殖細胞への影響を評価する。このような長期の宇宙実験を実施できるのは、ISSのみである。宇宙実験の結果をもとに医療機器などによる放射線のリスク評価に利用できるだけでなく、地球環境における有害な化学物質の影響評価ができれば、食品添加物など発がん性や有害性のリスクを予測できると期待される。この研究は、将来の有人月探査や火星探査、さらに移住など長期的な有人宇宙滞在や活動における安全性と防御対策に貢献できる。

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/stemcells/>

#### ⑲ 宇宙居住の安全・安心を保証する「きぼう」船内における微生物モニタリング（Microbe-IV）

ISS内の微生物を継続的にモニタリングし、その動態を明らかにすることは、「きぼう」船内の微生物学的な環境管理に必須であり、ライフサポートにかかせない重要な研究である。本研究で確立される簡便・高精度な微生物サンプリング法は、宇宙などの閉鎖環境下のみならず、地上の医薬品製造や食品製造等、幅広い分野における衛生微生物学的な安心・安全の実現への寄与も期待される。この実験で開発されたサンプリングシートを使用した微生物採取法は簡便で精度が高く、その精度の良さから日本の薬事法にサンプリング供試体の例として記載されており、今後国際的な評価を得ることが期待されている。

#### ⑳ 植物細胞の重力受容装置の形成分化とその分子機構の研究（Plant Gravity Sensing）

Plant Gravity Sensingは、シロイヌナズナを生育させて行う実験で、第1回実験は2014年10月に行われた。本研究では、植物が重力を感じて応答する（重力

受容)、その具体的な分子機構に迫る。この実験では、植物が重力を感じると細胞内のカルシウム濃度が上昇することを利用して、カルシウムイオン濃度が上昇すると細胞が光るように遺伝子工学的に操作した植物を使って実験を行う。重力のない宇宙で育った植物が、重力センサーを作ることができるかは分かっていないため、宇宙で種から植物を育てて、細胞培養装置(CBEF)に備えられている遠心回転装置で植物に重力を作用させて応答を調べる。植物が光れば、植物は重力の向きや大きさの情報を知らなくても、重力感知する仕組みを作る能力を備えていることがわかる。もし重力をかけても光らなければ、植物が重力感知できる細胞を作るには、重力の向きや大きさの情報が必要であることが確認できる。



図23 シロイズナズナの生育実験

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/plantgravitysensing/index.html>

## (21)宇宙環境における線虫の老化研究 (Space Aging)

JAXAと健康長寿医療センター研究所のチームは、これまでにモデル生物である線虫を用いた宇宙実験、International C. elegans Space Experiment 1: ICE-First2004に参加し、ISSに滞在した線虫で不活性になった7つの遺伝子を見出し、これら遺伝子を働かなくさせた線虫の寿命が通常の線虫より長くなることが世界に先駆けて示された。本実験はこれまでの研究を発展させた実験で、2004年の実験では、老化すると増えてくるマーカーを見て間接的に老化速度を推測したが、今回の宇宙実験では実際に線虫の寿命を計測する。線虫の寿命は線虫の動きで、老化の速度を分析する。若い線虫はよく動き、老化とともに動きがゆっくりになっていくことが分かっている。そして寿命が終わるまで宇宙で飼育する。線虫は通常は生まれてから3週間ほどで死んでしまうが、卵を産まなくした状態で培養すると、地上では寿命が約50日になります。2004年の宇宙実験で、宇宙に行くと寿命が延び



図24 線虫

ると予想される結果が得られたので、宇宙では期間を1.4倍にして70日程度観察する予定にしている。この実験は、spaceXでサンプルを打上げ、70日間、細胞培養装置(CBEF)でサンプルを培養する。

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/spaceaging/>

## (22) 前庭-血圧反射系の可塑性とその対策 (V-C Reflex)

宇宙飛行士の搭乗前後の前庭血圧調整力を調べ、帰還直後の起立時のふらつきや転倒の仕組みを解明。高齢者の健康維持にも貢献。

宇宙から帰還した直後の飛行士は、耳の奥にある前庭の血圧調整力が低下するために、起立時に転倒やふらつきの症状がみられるという仮説を証明するために、飛行士の打上げ前、帰還直後、2週間後、2ヶ月後の前庭血圧調整力を計測します（前庭系を外から電気刺激する方法—Galvanic Vestibular Stimulation (GVS) で前庭-血圧反射をブロックする効果を調べる）（軌道上での実験ではなく、地上での医学データの計測のみである）。これにより、宇宙滞在が前庭に与える影響と、回復の経過を調べ、対策を検討する。これらの研究は、

地上の高齢者にも共通の症状であるため、高齢者の健康維持にも役立つと期待される。

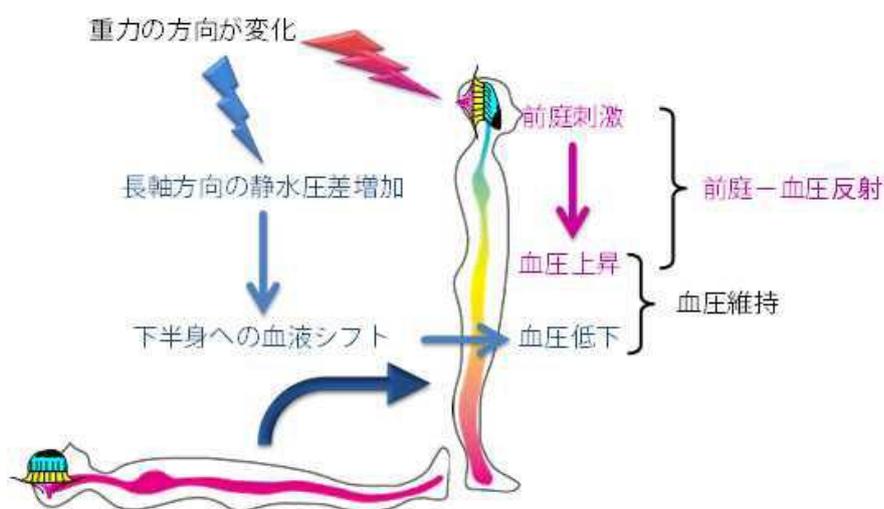


図25ヒトが起立する時の血圧調節に重要な役割を果たしている前庭-血圧反射

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/lifeintao2009/v-c\\_reflex/](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/lifeintao2009/v-c_reflex/)

## (23) 無重力での視力変化等に影響する頭蓋内圧の簡便な評価法の確立

### (Intracranial Pressure & Visual Impairment)

数年前より、宇宙飛行士の健康管理上の課題として、失明のリスクも伴う「視神経乳頭浮腫」が注目されています。宇宙飛行に伴い体液が上半身へシフトし、頭蓋骨内部の圧力が高まることに起因していると考えられる。

頭蓋内圧は、脳や腰に針を刺して脳脊髄液圧を測定する手法が一般的ですが、

リスクがあるため宇宙医学研究に使えない。本研究では近年開発・確立された非侵襲的頭蓋内圧推定法（解析法）を応用する。飛行前後で頭蓋内圧値の推定を行ない、頭蓋内圧の変化や長期宇宙滞在中の視機能の変化などの関連性を確認する。軌道上ではクルー顔の正面及び側面をUSBカメラで撮影し、地上の研究者が、顔面浮腫状態の視診、視機能異常の有無の確認を行う。

#### **(24) 長期宇宙滞在飛行士の姿勢制御における帰還後再適応過程の解明 (Synergy)**

宇宙飛行士が帰還直後に歩行が困難となる原因は、長期宇宙滞在に適応した①下肢拮抗筋の拮抗状態の不均一性、ならびに②前庭系・小脳での体性感覚調節の地上への再適応の不完全性であるとの仮説に基づき、長期宇宙滞在した宇宙飛行士の飛行前後での重心の地上への適応過程を観察することにより、この仮説を検証する。この研究を基に、軌道上滞在中の筋萎縮予防に対する運動処方並びに新たなトレーニング法、帰還後の効果的なリハビリテーション法に貢献できるデータの取得を目指す。

#### **(25) 国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価 (Myco)**

宇宙船内の微生物は機器や生活用品、クルー自身に付着し持ち込まれ、結果として船内の多くの場所が必然的に微生物の温床となる。

本研究では宇宙飛行士がISS滞在中に呼吸によって体内に取り込む、あるいは環境中の空気に暴露されることで皮膚に付着する微生物(特に真菌)叢の変化を評価する。皮膚ではサンプリングシートを使用し、粘膜では綿棒を使ってスワブ採取を行い、これらを冷凍保存して地上へ回収する。

※菌叢(きんそう)：ある空間に存在する菌(細菌・真菌)の種類、量、割合、分布など、菌全体の構成。

#### **(26) 長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究 (Biological Rhythms 48hrs)**

初期のBiological Rhythms実験では、飛行前・中・後に24時間心電図記録を行い、心電図R-R間隔の変動データの周波数解析による心臓自律神経活動や生体リズム等について評価した。その結果、フライト前から生体リズムが変調しており、フライト3ヶ月頃の方が心臓自律神経活動リズムの24時間への同調性が良好な状態になることなどが明らかとなった。一方、24時間を超えた周期の生体リズムの例もあったことから、より正確に生体リズムの変動を調査するために、心電図の記録時間を48時間に延長して飛行前・中・後の心臓自律神経活動の評価を行う。自律神経活動は睡眠・覚醒リズムの影響を受けることから、ホルタ

一心電計の装着2日前より装着終了時まで、腕時計型の加速度計（アクチウォッチ）を装着し、手首の活動量記録による睡眠・覚醒の評価を行う。これらを基に、心臓自律神経活動と睡眠覚醒の関係について総合評価を行う。

### (27) マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価 (Mouse Epigenetics)

軌道上でマウスを長期飼育し、宇宙環境における各臓器の遺伝子発現変化および生殖細胞に対する影響を網羅的に評価する研究で、マウスは生きたまま回収する。日本が、「きぼう」で哺乳類の実験を行うのは今回が初めて、小動物飼育装置 (Mouse Habitat Unit : MHU) は、「こうのとり」5号機 (HTV5) にて2015年に「きぼう」に運ばれ、油井宇宙飛行士によって装置としての機能検証が実施した。今回は、小動物 (マウス) をこのMHUの飼育ゲージに1匹ずつ入れて、個別に長期間 (約40日程度)、飼育・観察した。飼育ケージに装備したビデオカメラにより地上でライブ観察ができる他、遠心機付き生物実験装置に飼育ケージを設置して、微小重力と人工重力の環境を同時に軌道上で作出し、比較飼育・観察できる。NASAもマウスの飼育をISSで行っているが、人工重力を与えられるのは日本だけ、また個飼いができるのも日本の装置の特徴です。今回の実験では、宇宙で飼育した12匹のマウス全数が無事地球に帰還した。これは欧米が実施したマウス実験では実現できず、今回が初めての快挙であった。

[http://fanfun.jaxa.jp/c/media/file/media\\_jaxas\\_jaxas061.pdf](http://fanfun.jaxa.jp/c/media/file/media_jaxas_jaxas061.pdf)

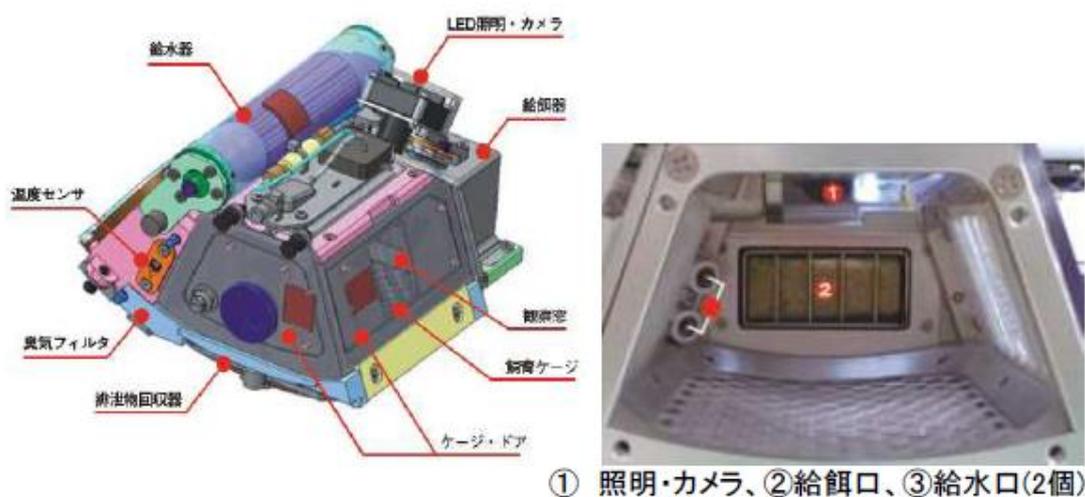


図26 JAXAの小動物飼育装置

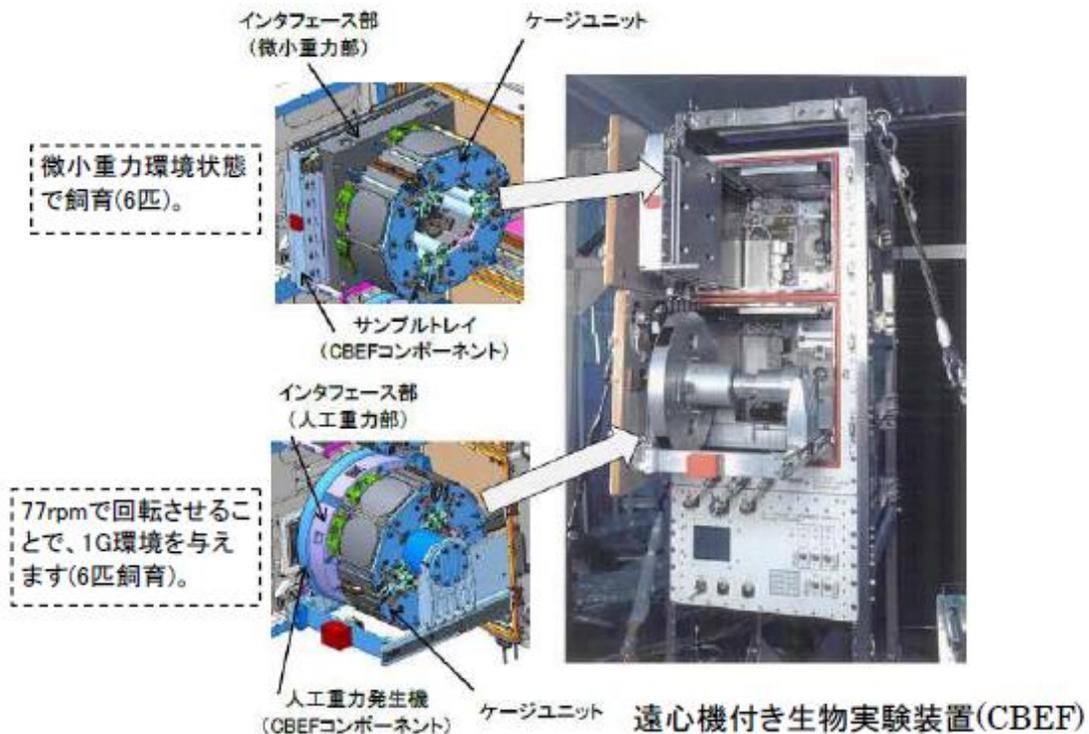


図 27 小動物飼育装置を設置（無重力区画及び1G区画）の様子

## (28)宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および姿勢制御機構の解析 (Auxin Transport)

本実験は、STS-95での植物宇宙実験ならびに地上における擬似微小重力実験の結果から得られた仮説、「植物の重力応答反応および姿勢制御には、重力によって制御される植物ホルモン動態、特にオーキシン極性移動とそれを司る遺伝子の発現制御が重要である」を分子レベルの解析を中心として検証するものであり、エンドウやトウモロコシの芽生えを対象とし、植物の重力屈性や、重力に対する姿勢制御機構について解析する。

## (29)宇宙環境における健康管理に向けた免疫・腸内環境の統合評価 (Multi-Omics)

宇宙飛行士とマウスの糞便等を用いて腸内細菌叢や腸内代謝系といった腸内環境の変化を解析し、宇宙環境による免疫障害への影響を評価する実験であり、免疫障害の評価指標の同定とメカニズムの解明を目的とする。

宇宙飛行士からは唾液と便を、マウスからは糞と血液等を採取し、口腔・腸内環境における細菌の分布・機能、分泌される代謝物の解析を行う。またフラクトオリゴ糖の効果も評価する。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/J2PWF6sWYdi>

### (30) 簡易曝露実験装置 (ExHAM) を用いたミッション

「きぼう」日本実験棟では、簡易曝露実験装置 (ExHAM) 「エクスハム」を利用する事により、宇宙の曝露環境を利用する実験サンプルを「きぼう」船外に取り付けることが可能。このために開発された簡易曝露実験装置 (ExHAM) は、上面にロボットアーム (子アーム) 用のツールフィクスチャ (把持部) を、下面に「きぼう」船外のハンドレール (手すり) への取付け部を備えた直方体の機構で、上面に7 個、側面に13 個の実験サンプルを搭載する。宇宙空間への曝露期間は、半年、1 年、2 年など設定した後、地上への回収が可能。

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/exham/>



図28 ExHAM 本体(左)とExHAM の設置場所(JAXA)

ExHAMの1 基目は、ATV-5 で軌道の上に運ばれ、サンプルを取り付けた後、2015 年5月26 日に船外へ設置され、2016 年6 月には、1 年間の長期曝露を終えたサンプルが「きぼう」船内に収納され、地上への回収準備を開始するとともに、新たなサンプルに入れ替えての実験が始まっている。

(サンプルは当初、Orb-3 で打上げられましたが、アンタレスロケットの打上げ失敗により失われたため、SpX-6 で以下の試料が運ばれました。)

- 有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集 (たんぽぽ)
- 宇宙応用を目指した先端材料宇宙環境曝露実験 (CNT)
- 炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究 (QCC)
- 超低高度衛星技術試験機 (SLATS) 搭載材料劣化モニタ2 (MDM2)
- PEEK 及びPPFA 材料の宇宙環境曝露試験 (PEEK)
- ターゲットマーカ代替品の宇宙実証 (ArrayMark)

CNT, QCC, PEEK の実験意義については以下を参照下さい。

2 基目のExHAMは「こうのとり」5号機で運ばれ、以下の実験サンプルが取り付けられて、2015年11月11日に船外に設置された。

- 次世代ソーラーセイルに向けた高機能薄膜デバイスの宇宙環境影響評価 (SolarSail)
- 軽量かつ高精度な反射鏡の宇宙環境影響評価 (CFRP Mirror)
- 有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集 (たんぽぽ)
- 宇宙応用を目指した先端材料宇宙環境曝露実験 (CNT)
- PEEK 及び PFA 材料の宇宙環境曝露試験 (PEEK) —

**【参考】** 船外で行われている「たんぽぽ」実験

「たんぽぽ」実験は、宇宙空間の塵を捕まえて、含まれる有機物を分析するのは知っていましたが、地球から宇宙へ飛び出して行く塵に含まれる微生物を捕らえるというアイデアである。

[https://twitter.com/Astro\\_Kimiya/status/578739829757779968](https://twitter.com/Astro_Kimiya/status/578739829757779968)

「たんぽぽ計画」では、地球微生物が地球低軌道に到達する可能性と、生命の原材料である有機物が生命誕生前の地球へ宇宙塵によってもたらされた可能性を調べるために、宇宙塵の捕集実験と、地球微生物や有機物の曝露実験を行います。エアロゲルが搭載された捕集装置は、約1年間宇宙に曝露され、ドラゴン補給船によって地上に回収される。その後、新しいエアロゲルに交換し、これが3回繰り返される。「たんぽぽ計画」には、東京薬科大学、JAXAや千葉大学をはじめ、日本全国26の大学や研究機関の研究者が参加している。

<http://www.chiba-u.ac.jp/general/publicity/press/pdf/2015/20150413.pdf>

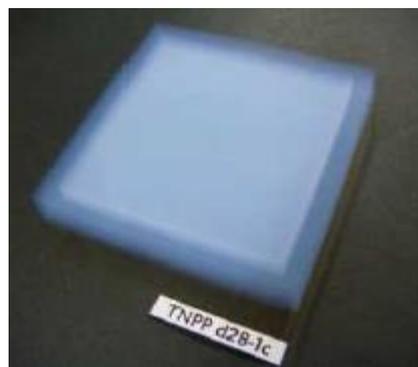


図29 千葉大学が開発した「たんぽぽ計画」用の低密度エアロゲル

### (31)Fluid Shifts (体液シフト) 実験

これはNASAだけでなく、ロシアとも協力して研究しているテーマで、大西宇宙飛行士が担当する宇宙実験の中でもかなり大掛かり、かつ費やす時間も長い実験である。そうして得られた知見を、今後の長期滞在だけではなく将来のISSより先を目指す宇宙探査に生かしていこうという狙いである。無重力状態によって私たちの体内の液体（血液など）が身体の上半身へ移動（シフト）することによる様々な症状・影響を、色々な側面から調べようというものです。

その色々な側面の1つ、脳圧（頭蓋内圧）の測定には、ヘッドセット型の装置を使用します。耳に差し込んだイヤフォンから耳に圧力が加えられ、それによって鼓膜がどう動くかを測定します。鼓膜の内外の圧力が等しい時に鼓膜はどちらにも偏らずに平らになるので、その時のイヤフォンにかかっている圧力から、鼓膜内の圧力、ひいては脳圧がわかるというもの。その他、MRI検査や血圧測定など様々なデータの取得が行われます。軌道上でも下半身陰圧負荷装置を使って下半身へ血流を戻した状態で超音波検査を行うなども行う。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/X4dw8wbMZkr>

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/2MJBfBBQAoD>

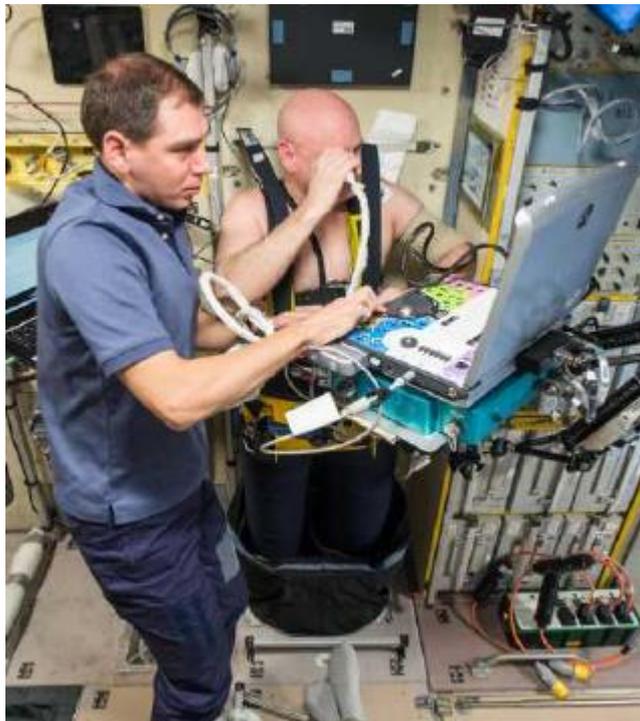


図 30 下半身陰圧負荷装置を装着した状態で眼球の超音波検査を行う様子

(32)ESAの宇宙医学実験「Airway Monitoring (エアウェイ・モニタリング)」  
<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/XvKUPsAFCmF>

宇宙医学実験のAirway Monitoring (エアウェイ・モニタリング) という実験はかなり大掛かりな実験。一酸化窒素(NO)という気体は、肺が炎症を起こしている時に多く発生するという特徴があるので、ホコリや塵が無重力で漂っている宇宙空間では、肺がそれらによって炎症を起こしていないかなどを調べる指標として使える可能性がある。この実験では、呼気に含まれるNOの量と、血液に溶け込むNOの量を、通常の気圧下やそれより低い気圧下で測定することにより、それらの外的要因がNOの量にどのような影響を及ぼすかを調べ、将来の宇宙ミッションで気道の健康状態を知る為に役立てようというわけである。この実験が大掛かりなのは、通常より低い気圧下での測定をするために、エアロックを実際に減圧して実験を行うからで、機器のセットアップや減圧、NO測定などでほぼ1日がかかりになる実験である。



図31 Airway Monitoring実験のデータ取得を行う大西宇宙飛行士(訓練の様子)

(33)ESAの「Straight Ahead」実験

Straight Aheadというのは日本語に訳すと「真っすぐ」という意味なのですが、その実験名が示す通り、この実験は人間の空間内における水平・垂直方向を認識する能力について調べる研究である。

データ取りでは、写真のような前後左右に傾けることが出来る椅子に座って、色々な状況で自分が「水平・垂直だと思ふ方向」に視線を動かしたり、指でその方向を示したりしていく。色々な状況というのは、視覚と重力が両方使える

状況や、目隠しをして重力だけを頼りにする状況などである。それに加えて、身体を傾けられるので、例えば目隠しをして身体を傾けられると、結構これが難しい。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/NUyhFEr668D>



図33 Straight Ahead実験のデータ取得を行う大西宇宙飛行士

#### (34)NASA の Fine Motor Skills (ファインモータースキルズ) 実験

長期滞在中に人間の手先の器用さ・精密な操作性がどのように変化するかを調べる実験。それを知ることにより、これからのISS計画だけでなく、将来の宇宙探査計画において、タスクをより確実に実施できるような手順の作成、プランニングに生かそうというものである。ミッションを成功に導くには、まずそれを実行する人間の宇宙空間における特性の変化を理解しておくことが大切、というわけ。実験にはタブレット端末にインストールされた専用アプリを使用する。手先の器用さ、正確さ、敏捷性などが要求される何種類かのタスクを画面上でこなしていき、自分の指先で行うパターンと、ペンを使用して行うパターンの2つがある。例えば、画面に描かれた円や四角形を、なるべく正確に、かつ

迅速になぞっていくタスクや、円形に配置された無数のボックスを一定のパターンに従って順番にタッチしていくタスクなどがある。これを地上でデータ取得した結果と軌道上での結果とを比較する。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/gDNvMFitEAs>

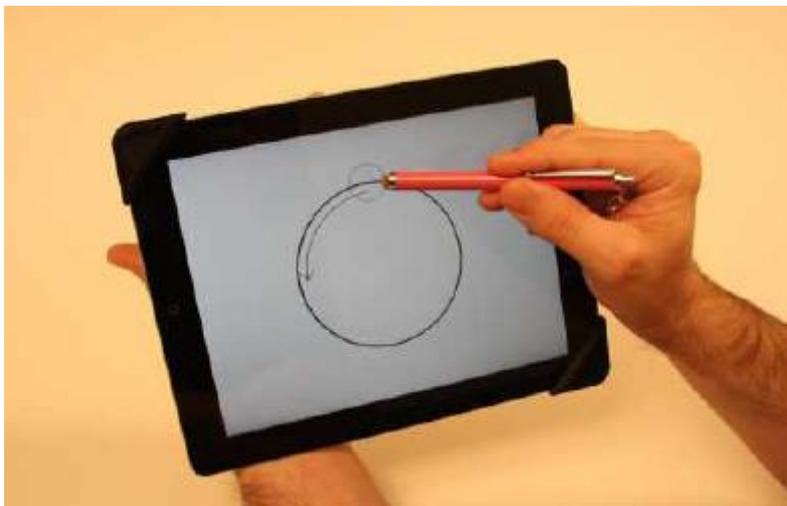


図34 Fine Motor Skills実験のタスクのひとつ 「円をなぞる」 (NASA)

### (35)ESA の Circadian Rhythms (サーケイディアン・リズム) 実験

人間の「体内時計」というものが、宇宙空間でどのような影響を受けるかを調べる研究。ISSは90分で地球を1周するスピードで回っていますので、地上の昼と夜が90分に1回訪れる。この地上と異なる日照周期が、宇宙飛行士の体内時計の調整に影響を及ぼすのではないか、という仮説の元に始まった研究である。地上での基礎データ取得では、額と胸に取り付けたセンサーで体温をモニターし、腕に巻いた記憶装置に常時記録する。また、腕には睡眠や起床、日照の有無などを感知する時計型の装置を巻いて、これらのデータも記録される。この状態で36時間データ取得が行われた。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/2KgJQvMgWew>

・NASAのCircadian Rhythms実験解説ページ

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/892.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/892.html)

### (36)ESAのMuscle Biopsy (筋肉生検) 実験

飛行前と後でそれぞれ足の筋肉のサンプルを採取して比較するという実験である。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/LDFiMm4oT9B>

### (37)カナダ宇宙庁 (CSA) のVascular Echo (ヴァスキュラー・エコー) 実験

この実験では、具体的には血液の流れが作り出す音をドップラー測定器で拾い、音の周波数の変化から、血流がどのように変化するか把握する。

このVascular Echoの前にCSAが実施した別の実験で、宇宙飛行士が宇宙に滞在する間、動脈が硬化することがわかっている。地上で普通に生活していると、年齢をかさねるに従って同じ現象が起きるが、約6か月の宇宙滞在では、なんと地上の約30歳分 (!) に相当するスピードで進行する。このように無重力での生活が、人間の心肺機能、血液系に及ぼす影響について調べるのがこの実験の目的である。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/NbsuVtRfhog>

### (38)NASAの宇宙医学系実験Cardio Ox

長期滞在中、もしくは後の宇宙飛行士の生体指標とアテローム性動脈硬化の間の因果関係を調べる研究。長期滞在が心臓血管に与えるリスクに関する研究ということ。

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/K9SvS7yqGSa>

<https://plus.google.com/101922061219949719231/posts/MdH5Rbss2fp>



図35 Cardio Ox実験の超音波検査を行う若田宇宙飛行士(NASA)

### (39)ESAの ENERGY (エネルギー) 医学実験

この実験は、私たち宇宙飛行士の体のエネルギー代謝が、地上と宇宙とでどのように変化するかを調べ、将来の宇宙ミッションでより効率的なエネルギー補

給、宇宙食の選定を実現し、宇宙飛行士の健康維持、引いてはミッションの成功に繋げようというもの。

私たちが1日に消費するエネルギーは、以下の3つに分けられる。

- (1) 安静時の新陳代謝により消費されるエネルギー
- (2) 運動により消費されるエネルギー
- (3) 食事の消化・吸収のために消費されるエネルギー

この実験の大きな目的の1つが、これらのエネルギー量が地上と宇宙での長期滞在時でどのように変化するかを定量的に比較すること。

意外と、10日間アームバンドを装着しっぱなしというのが、小さなストレスになる。10日間の食事記録を作成して、今回の基礎データ取得も終わり。



図36 Energy実験で呼吸で取り込まれる酸素量、排出される二酸化炭素量を測定する星出宇宙飛行士

#### (40) Ocular Health実験 (Prospective Observational Study of Ocular Health in ISS Crews)

これは2013年から開始された新しい実験で、現在、この眼の問題がホットな研究テーマとなっており解明が急がれている。微小重力環境では体液シフトの影響で頭蓋内の圧力が上昇する影響により、視野がぼける、眼圧の上昇、網膜の膨張などの問題がクルーの間から報告されている。超音波検査、眼底検査、眼圧測定、血圧測定、映像による確認などを行って、まずはデータを集めて何がこの問題を引き起こしているかを解明していき、帰還後の回復に役立てるよう

にしていく。

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/204.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/204.html)

### 3. 2 有人探査に向けたISS活用事例の整理

ISSで実際に実施されている研究のうち、今後の有人宇宙探査に向けて重要な情報をもたらす研究テーマを以下のカテゴリに分類した。

#### (1) 医学・生理学

- ①Repository実験(NASA Biological Specimen Repository)
- ②Ocular Health実験 (Prospective Observational Study of Ocular Health in ISS Crews)
- ⑧Space Headaches実験
- ⑨Hapstics-1
- ⑬微小重力実験用グローブボックス MSG(Microgravity Science Glove Box)
- ⑰宇宙居住の安全・安心を保证する「きぼう」船内における微生物モニタリング (Microbe-IV)
- ⑳植物細胞の重力受容装置の形成分化とその分子機構の研究 (Plant Gravity Sensing)
- (21)宇宙環境における線虫の老化研究 (Space Aging)
- (22)前庭-血圧反射系の可塑性とその対策 (V-C Reflex)
- (25)国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価(Myco)
- (26)長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究(Biological Rhythms 48hrs)
- (27)マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価 (Mouse Epigenetics)
- (28)宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および姿勢制御機構の解析 (Auxin Transport)
- (29)宇宙環境における健康管理に向けた免疫・腸内環境の統合評価 (Multi-Omics)
- (31)Fluid Shifts (体液シフト) 実験
- (32)ESAの宇宙医学実験「Airway Monitoring (エアウェイ・モニタリング)」
- (33)ESAの「Straight Ahead」実験
- (35)ESAのCircadian Rhythms (サーケイディアン・リズム) 実験
- (36)ESAのMuscle Biopsy (筋肉生検) 実験
- (38)NASAの宇宙医学系実験Cardio Ox
- (40)Ocular Health実験 (Prospective Observational Study of Ocular Health

in ISS Crews)

(2) 宇宙放射線被爆による人体への影響

JEM船内定点放射線環境計測実験 (Area PADLES)

宇宙飛行士の個人被ばく線量計測 (Crew PADLES)

リアルタイム線量当量計測技術の確立 (PS-TEPC)

「きぼう」船外の宇宙放射線環境モニタリング (Free-Space PADLES)

⑩ISS搭載凍結胚から発生したマウスを用いた宇宙放射線の生物影響研究  
(Embryo Rad)

⑪ほ乳類の繁殖における宇宙環境の影響 (Space Pup)

遺伝子資源の宇宙での保存の可能性に挑戦

(3) 微小重力が人体に与える影響

③Manual Control実験 (Assessment of Operator Proficiency Following  
Long-Duration Space Flight)

④Functional Task Test実験 (Physiological Factors Contributing to  
Postflight Changes in Functional Performance)

⑤Sprint実験 (Integrated Resistance and Aerobic Training Study)

⑥Journals 実験 (Behavioral Issues Associated with isolation and  
Confinement: Review and Analysis of Astronaut Journals)

⑦Reaction Self Test実験 (Psychomotor Vigilance Self Test on the ISS)

⑮無重力ストレスの化学的シグナルへの変換機構の解明 (Cell Mechanosensing)

(23) 無重力での視力変化等に影響する頭蓋内圧の簡便な評価法の確立

(Intracranial Pressure & Visual Impairment)

(24) 長期宇宙滞在飛行士の姿勢制御における帰還後再適応過程の解明

(Synergy)

(34) NASAのFine Motor Skills (ファインモータースキルズ) 実験

(37) カナダ宇宙庁 (CSA) のVascular Echo (ヴァスキュラー・エコー) 実験

(39) ESAの ENERGY (エナジー) 医学実験

(4) 宇宙での食料

⑭ロシアの植物栽培実験装置Lada

(5) 技術開発

⑩ロボノート2 (R2)

⑪RRM (Robotic Refueling Mission)

⑫CIR (Combustion Integrated Rack)

(30)簡易曝露実験装置 (ExHAM) を用いたミッション

(6) 各機関別の研究分野一覧

下図は、ISSで実施されている全ての分野の各機関別分類である。有人探査に必要な研究分野としては、①Human Research (医学・生理学等)、②生物学・バイオテクノロジー、③技術開発であることをみると、JAXAは技術開発の分野で他機関と比較して取組が弱いと言える。

### ISSで実施されている各種実験と実施機関 (NASA, ESA, CSA, JAXA)

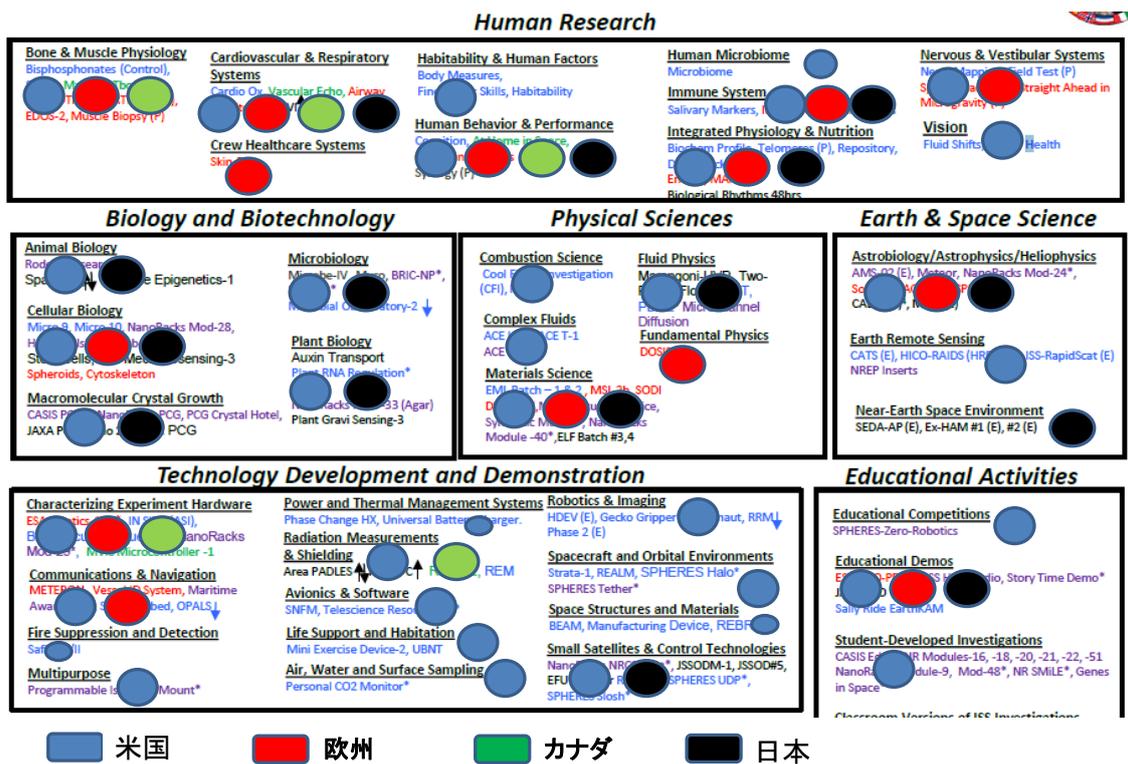


図 37 各機関別の研究分野一覧

これを詳細に見ると、ヒトを対象とした有人研究（医学・生理学）の中でも、取組が十分でない分野もあり、今後の日本人宇宙飛行士選抜・要請・健康維持・長期宇宙滞在に必要な更なる知見獲得の観点から、可能な限り広範囲の研究者育成と研究実施が必要である。

各国の分野別研究課題				
	米国	欧州	カナダ	日本
<b>有人研究</b>				
骨・筋生理学	○	○		
心循環・呼吸器系	○	○	○	○
クルー健康管理		○		
ヒューマンファクター・居住系	○			
行動・パフォーマンス	○	○	○	○
免疫系	○	○		○
生理学と栄養	○	○		○
神経と前庭システム	○	○		
視覚	○			
<b>生物学とバイオテクノロジー</b>				
動物の生物学	○			○
細胞生物学	○	○		○
高分子結晶成長(タンパク質)	○			○
微生物学	○			○
植物生物学	○			○
<b>物理科学</b>	○	○		○
<b>地球科学・宇宙科学</b>	○	○		○
<b>技術開発</b>	○	○	○	○
<b>宇宙教育</b>	○	○		○

図 38 各国の分野別研究課題

### 3.3 ISS商業利用

米国は近年、低高度軌道（LEO）への打上・利用サービスは基本的に民間によるサービスの購入や移管方策を採っている。輸送系では、SpaceX社、Orbital ATKが代表される企業である。

一方、ISS利用についても、2011年、NASAは国の研究機関（NASA、NHI等）による実験を除き、民間、大学等向けサービスを非営利団体であるCASIS（Center for the Advancement of Science in Space）に、軌道上のリソース利用権を1/2程度渡すと共に、地上での予備実験研究費、軌道上サービス、機関後のデータ解析支援等を移管した。（<http://www.iss-casis.org/Home.aspx>）

移管に伴い、NASAから運用資金として、毎年20～30億円程度支給されている。

CASISは、宇宙実験のために必要な科学的・技術的サービスを提供する“サービス・プロバイダ”31社を選定して、ディレクトリーを公表している。

（2016年版）



図 39 CASIS サービス・プロバイダー・ディレクトリー

CASIS 発行（2016 年版）に登録されているサービス・プロバイダ

	The Aerospace Corporation.....	6
 	Airbus DS Space Systems, Inc. ....	7
	Astrotech Space Operations, LLC.....	8
	Bionetics Corporation.....	9
	Bioserve Space Technologies.....	10
	The Boeing Company.....	11
 	CSS-Dynamac.....	12
	FedEx® Space Solutions.....	13
	Hnu Photonics, LLC.....	14
 	Jacobs XPrSS.....	15
 	JAMSS America, Inc.....	16
	MDA Corporation.....	17
	MEI Technologies.....	18
	Micro Aerospace Solutions.....	19
 	NanoRacks, LLC.....	20
	Oceanering Space Solutions.....	21
	Orbitec.....	22
	Raven Aerospace Technology, Inc.....	23
 	Space Systems Research Corporation.....	24
 	Space Tango, Inc. ....	25
	Space Technology and Advanced Research Systems, Inc. ....	26
 	Tec-Masters, Inc. ....	27
 	Techshot.....	28
 	Teledyne Brown Engineering.....	29
	Thales Alenia Space.....	30
	ThinkSpace.....	31
	UAB.....	32
	UTC Aerospace.....	33
	Vencore.....	34
 	Wyle Science, Technology and Engineering Group.....	36
 	ZIN Technologies.....	38

 物理系	 生命系	 技術開発	 リモートセンシング
---	---	--	---

図 40 CASIS サービス・プロバイダ一覧 (31 社)



## The Aerospace Corporation



The Aerospace Corporation, a world leader in the application of space technology, provides advanced scientific engineering services for space and related high-technology systems.

**Advanced Technology. Objective Analysis. Innovative Solutions**—As an independent, nonprofit corporation operating federally funded research and development center, The Aerospace Corporation performs objective technical analyses and assessments for a variety of government, civil, and commercial customers. With five decades of experience and a staff widely recognized for its technical knowledge and capabilities, The Aerospace Corporation provides leadership and support in all fields and disciplines of research, design, development, acquisition, operations, and program management.

**Assuring Mission Success**—Aerospace supports its customers in a broad range of space-related technology disciplines, providing value-added knowledge and insight to state-of-the-art space systems, application, and related technology areas.



### PRINCIPAL AREAS OF SCIENTIFIC & ENGINEERING EXPERTISE:

- ▶ Space Science Experiments
- ▶ Satellite design and orbital systems
- ▶ Guidance and control
- ▶ Structural design and modeling
- ▶ Sensors and imaging
- ▶ Computer and network architectures
- ▶ Software development and validation
- ▶ Satellite control and ground systems
- ▶ Telecommunications
- ▶ Astrodynamics
- ▶ Advanced materials
- ▶ Propulsion
- ▶ Microelectronics
- ▶ Signal processing
- ▶ Computer security

### RESEARCH, ENGINEERING & TECHNICAL SUPPORT SERVICES:

- ▶ Mission planning
- ▶ Operations concepts
- ▶ Acquisition and program management
- ▶ Prototype development
- ▶ Reliability analysis
- ▶ Systems engineering
- ▶ Test and evaluation
- ▶ Independent readiness reviews
- ▶ Risk analysis and lifecycle cost modeling
- ▶ Laboratory evaluation
- ▶ Nondestructive testing
- ▶ Launch and on-orbit failure analysis and anomaly resolution



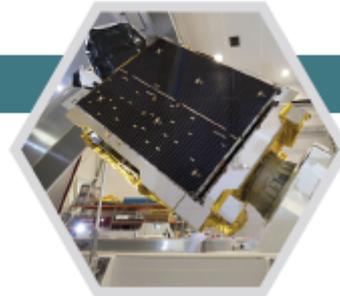
#### CONTACT INFORMATION:

Kristine Ferrone  
Program Development  
kristine.ferrone@aero.org  
571.359.7226

[www.aerospace.org](http://www.aerospace.org)



## Airbus DS Space Systems, Inc.



### PRIMARY SERVICES:

- ▶ External Platform Program (in cooperation with NanoRacks)
- ▶ Physical and Life science hardware and services
- ▶ Hardware design, manufacture and certification
- ▶ Hardware analytical and physical integration
- ▶ Full lifecycle software development, integration and testing
- ▶ Program management
- ▶ Export Compliance
- ▶ Mission control flight support
- ▶ Hands-on crew training

### ISS-CERTIFIED HARDWARE:

Airbus was the prime contractor for the development of several major payload facilities used onboard the International Space Station. The following is a partial list of ISS-certified, Airbus built, hardware available for use.

- ▶ Microgravity Science glove box (MSG)
- ▶ Minus Eighty Degree Freezer (MELFI)
- ▶ Material Science Lab (MSL)
- ▶ European Modular Cultivation System (EMCS)
- ▶ bIOLab
- ▶ Protein Crystallization Diagnostic Facility (PCDF)
- ▶ Rodent Life Support System

For a complete list of hardware please visit the Airbus DS Space Systems website at: [www.AirbusDSHouston.com](http://www.AirbusDSHouston.com)

### GROUND AND/OR FLIGHT-BASED RESEARCH SUPPORT SERVICES:

- ▶ Hardware verification and certification
- ▶ Ground and Flight Safety Reviews and Data packages
- ▶ Certificate of Flight Readiness (CoFR)
- ▶ Interface Control Documents (ICD's)
- ▶ Bench reviews
- ▶ Crew training
- ▶ ISS simulator operations
- ▶ Ground and Test procedure development
- ▶ Photo documentation and cataloguing
- ▶ Late access and early retrieval of flight hardware and samples
- ▶ Real time, pre and post flight data analysis
- ▶ Export Compliance (License, TAA, etc.)
- ▶ Controlled storage

### CONTACT INFORMATION:

Airbus DS Space Systems, Inc.  
555 Forge River Road, Suite 115  
Webster, TX 77598

Kris Kuehnel  
Director, Business Operations  
[KKuehnel@AirbusDSHouston.com](mailto:KKuehnel@AirbusDSHouston.com)  
832.224.4512

[www.AirbusDSHouston.com](http://www.AirbusDSHouston.com)

#### 4 今後の我が国の有人探査のための ISS 利用に向けた提言

##### (1) 研究課題の具体的な実施方策について

JAXA は、「きぼう」利用の 4 本柱として

- ・タンパク質の構造に基づく薬剤設計支援（新薬設計支援プラットフォーム）
  - ・加齢研究による健康長寿社会形成への貢献（加齢研究支援プラットフォーム）
  - ・超小型衛星放出能力の強化（超小型衛星放出プラットフォーム 9）
  - ・船外ポートを利用した戦略的利用推進（船外ポート利用プラットフォーム）
- を定めて、利用推進を図っている。

一方で、今後想定される有人宇宙探査の中で最も重要かつ緊急な課題である「超長期有人宇宙滞在技術や探査技術の獲得」はその他の研究領域としているが、上記の 4 本柱も含めて、「いつまでに」、「何を」、「どのようにして」の方策が示されていない。

##### (2) これまでの成果の幅広い報告

同時に、「きぼう」で得られた成果について、分野別に個別に専門家向けの報告会は散見されるが、有人研究に留まらず、その他の分野も含めて一般国民向けの成果報告が纏まった形でこれまで殆ど実施されていないのは残念で、このままでは国民の理解は益々遠ざかる。

##### (3) ISEF 2 に向けて

また、MEXT は 2017 年末～2018 年初頭に予定される「ISEF 2」に向けて、具体的な調査に着手している。その中で

- ・国際宇宙探査により得られる価値
- ・国際宇宙探査に際しての課題
- ・国際宇宙探査に対する期待

を改めて、精査するとしているが、

今後の有人・無人の宇宙探査には ISS/JEM 計画以上に莫大な国家予算が必要となることを想定すると、更に以下の検討が必要と考えられる。

##### a) 持続的な有人・無人宇宙探査に必要な国際的な協力

国際宇宙探査は息の長いプロジェクトとして継続性が必要である。我が国では、ISS 計画への参画を通じた多くの有人探査に必要な技術を獲得してきたが、まだまだ新たに技術開発すべき課題が多くある。一方で、「はやぶさ」、「はやぶさ 2」で得られた無人宇宙探査技術は世界をリードしてきた。更に、「イノベーションハブ」プログラムでは、今まで宇宙開発に参入してこなかった企業の参加を宇宙

探査分野への参入を促す活動も進めている。これらの技術的背景の下、有人・無人宇宙探査に必要な国際協力を我が国がリードしながら国際協力できる方法等について知見を集約する必要がある。

b) 国際宇宙探査を進めるに当たって日本としてのアジア貢献（例えば、人材育成）

ISS 計画は、アジアで唯一の日本は参加国として多くの有人技術を獲得してきましたが、ISS 利用面では必ずしも日本がアジア諸国に対して貢献できているとは言いがたく、2024 年までの ISS 運用延長に米国と合意するに当たり、「日米オープン・プラットフォーム・パートナーシップ・プログラム (JP-US OP3)」の枠組みで「ISS 資源を活用したアジア太平洋地域の宇宙途上国との協力の増進」のための活動が期待される。従って、今後の国際宇宙探査プログラムに日本が参加するにあたっては、当初からアジア貢献、例えば国際宇宙探査に参加できる技術者等を育成するための人材育成について知見を集約することが必要である。

c) 国民の理解増進に資するためのアウトリーチ活動

国際宇宙探査計画に日本が参加するためには、ISS 計画で投入された予算以上の規模が必然となることを想定すると、国民的理解を得ることが必須と考える。国民的理解・増進を得るために必要な活動として何をなすべきか等について、欧米等の取組を参考として意見集約することが必要である。

◎国際協力を我が国がリードするうえの方策検討

◎アジア諸国の望むべき人材育成と国際宇宙探査

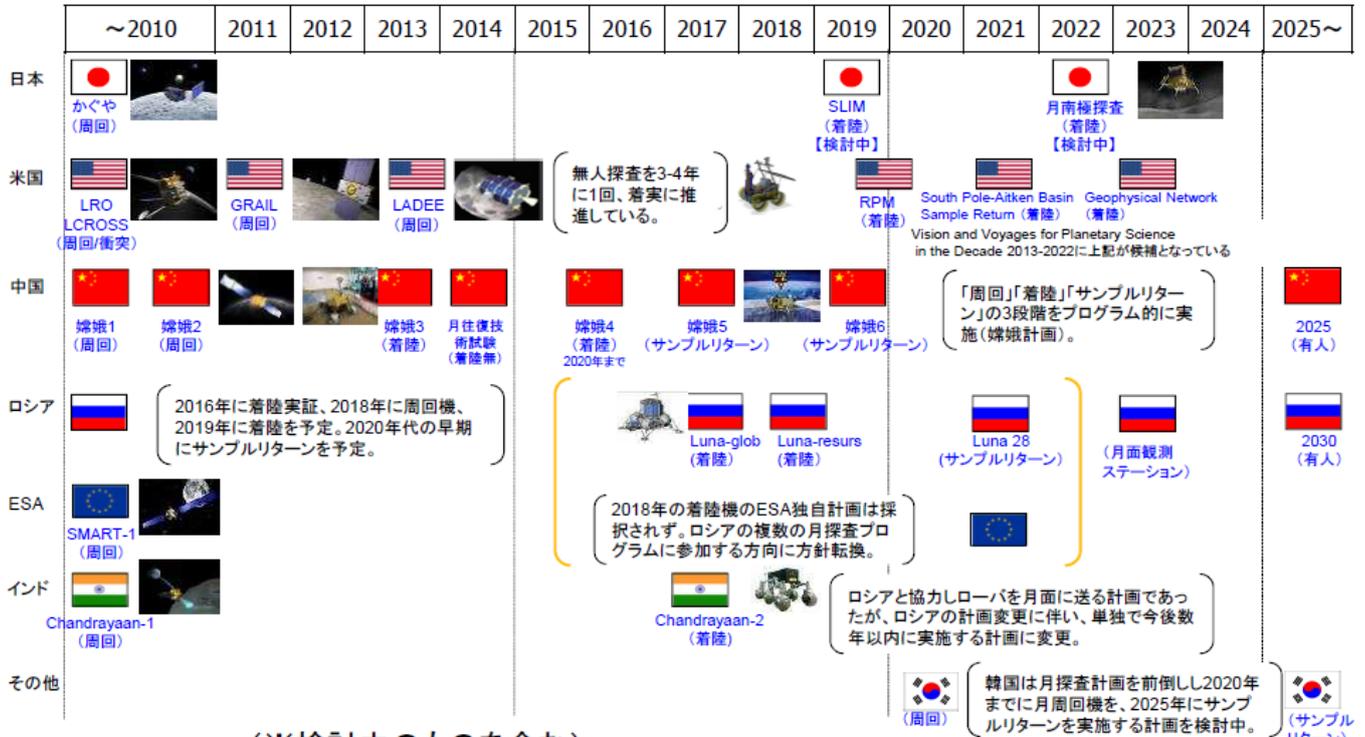
◎国民的理解を売る上でのアウトリーチ活動について他国での現状や他のインフラ（例えば国際天文、原子力など）を参考とする。

最後に、今後の火星への有人探査に日本人宇宙飛行士が将来参加することを想定すると、現在実施している、宇宙飛行士の健康維持・回復に関する研究と併せて、「日本人宇宙飛行士の長期宇宙滞在に伴う対策」は基本的には我が国が自ら対応することを前提に、ヒトに係る今後の研究は幅広い分野での研究を持続的に進めるために、JAXA が外部の大学等との連携により、人材育成を含めて研究体制を構築し、研究を推進すべきと考える。

以上

(参考1)

月探査の各国動向



(※検討中のものを含む)

火星・小惑星探査の各国動向

探査対象	~2010	2011~	2015~	2020~
火星	Phoenix (着陸) MRO (周回) ME (周回)	MSL (ローバ)	InSight (着陸) MAVEN (周回) Mangalyaan (周回) ExoMars2016 (周回) ExoMars2018 (ローバ)	Mars2020 (ローバ) 火星衛星 サンプルリターン 【検討中】 Mars Orbiter (周回) 米・欧が主導。平均3年の一機程度。
小惑星	はやぶさ (小惑星・サンプルリターン) Dawn (小惑星・周回) Rosetta (彗星・着陸)	はやぶさ2 (小惑星・サンプルリターン)	OSIRIS-REx (小惑星・サンプルリターン)	ARM (小惑星・捕獲/有人サンプルリターン) ※無人ミッションは2020頃 有人ミッションは2020年代半ば予定 日本が世界をリード。

(参考2)

<Moon 2020-2030 国際シンポジウム 出席報告>

会議名：International Symposium on Moon 2020-2030

開催期間：2015年12月14日(月)～16(水)

主催・開催場所：ESA 欧州宇宙技術研究センター (ESTEC)

●会議開催目的

科学的興味と人類活動領域の拡大という動機の中で、人間とロボットの協調のもとに行う宇宙探査の新しい時代を迎え、宇宙に関わる産学官を後押ししその連携を深めることを、このシンポジウムは、試みる。

●参加者

参加は20数カ国に及び、また、NASA, ESA, JAXA, IKI という主立った各国の宇宙機関から参加。

講演数は60以上

参加者数は、毎日200人近く。マネジメント関連、科学者、エンジニア(研究者、メーカ)、学校教師。非常に盛況であった。

●主催者の意図と参加者からの反応

主催者は、

1) CIS-Lunar station (EML2 または、月安定軌道) に ISS 的なモジュールを持って行く(放射線からの保護対策としては巨大な水のタンク)

2) CIS-Lunar station から、月の極や裏側の探査をロボット遠隔操作で行う。

3) 月探査の最大重要課題を揮発性元素(水)探査と位置づける。

採掘した水は将来の火星探査にと使う。

上記内容を含むシナリオを事前に用意し、その上で、それに賛同するような発表をピックアップ、参加者に「agree」を取り付け、シナリオの実行に弾みをつけることを目指していたようである。

連日、上記シナリオに沿ったまとめをしようとしていた。しかしながら、

1) 水が極にあるとはまだはっきりしていない、月探査で極の水資源を強調しすぎるのは、過大な期待をもたせるのでよくないとの指摘があった(たとえば、ロシアの、Igor Mitrofanov 教授/LRO 搭載中性子分光計 PI ら)。

また、アポロデータによれば、赤道域でも水素は 1g/CC あり、従って、極以外も重要な水素資源探査場所である（米国 Everett K. Gibson 博士）。さらに、米国 Clive Neal 博士は、月の Resource は、水が最も重要なものの一つだが、水だけでない、ともコメント。

- 2) 裏の探査を強調しすぎるのはおかしい。科学コミュニティは、表にも多くの探査地点を提案している。（米国の Clive Neal 博士のまとめでは、科学的興味に関して表などの探査地点も提案。また、米国の James Head 博士は、オリエンターレ盆地の探査を提案。など）。Igor Mitrofanov 博士は、ライナーガンマのような磁気異常を第一優先として提案。また、地下空洞、コンプトンベルコビッチ（裏の Th 異常）、極を含む高緯度の H が多そうな地域を探査地点として提唱。
- 3) CIS-Lunar station が必須と言うことはおかしい。放射線被曝を考えると、そこにステーション建設は難しい。（春山他）米国の E.K. Gibson 博士は、明確に CIS Lunar station 不要を唱えた。

#### ●日本（JAXA 佐藤直樹氏）の主張

JAXA の国際宇宙探査推進チームの佐藤直樹氏は、政府機関関係者による今後の探査についての議論のパネラーとして登場し、以下のコメントを行った。

- 1 日本は、政府案として、SLIM(2019) の次に、2020 年代初頭に極探査
- 2 チームは、資源としての水を探査の重要課題と位置づけている
- 3 月-CIS Lunar 探査の中で キーテクノロジーを日本は担当したい
- 4 極探査の次は、裏側からのサンプルリターンで考えている（検討中）

#### ●アメリカ NASA 構想

アメリカ NASA の発表では、

- 1 EML2 構想は、トーンダウンしていることが明らかだったように思える。NASA 関係者の発表にどこも、EML2 経由での月探査は、出てくることはなかった。
- 2 極の水資源探査を強調。南極か北極かという議論において、北極を主張。なお、NASA 代表パネリストが、「資源については、日本が大変興味を持っている」とのコメント。極探査について、日本の興味が主動機になっているかのようなコメント。

アメリカのスライドには、どれにも、RP (Resource Prospector : 極探査) に日本のパートナーシップは入れられず。一方、JAXA 宇宙研の橋本（樹明）氏の講演資料には、政府の資料としてアメリカとの共同探査が明言される。

●今回参加しての所感

水探査, CIS-Lunar station 建設, を軸とする構想は, ESA, NASA, IKI, JAXA でそれぞれ多少の思惑の違いもありつつも, 各機関の担当者間で, 内々に合意をみつつあるようであった. そして, 今回の会議は, その方向性の確認と周知, そして今後の各機関内での公の合意形成へと向かう方向であったようである.

しかし, 月の極の水の存在の確認, CIS-Lunar station 建設場所の放射線対応が, 十分な解決をみていないと言う感がする. 参加していた科学研究者の多くも, そうした意見を述べている. それに対して, 各機関の担当者は, 「水については, 存在量・存在場所にまだ不確実性がある, だから調査をする」とし, また, 「CIS-Lunar station は, 短期滞在ということで, 放射線問題を避ける」としている.

大量には有りそうに無い, とコンセンサスができつつある月の水について, 「水がどれだけあるかを調査する「放射線が対策するのが大変だから, 短期滞在となるステーションを, わざわざ CIS-Lunar に置く」という構想は, あまりにコストパフォーマンスが悪く, その先に火星を目指すという事だけでは, いずれの国民にも受け入れられないのでは無いかという感が強くした. シナリオをもっと検討しなければ, 宇宙機関の担当者で合意を見たとしても, 自国の中で賛意を得るのは難しいのでは無いだろうか.

むしろ, SELENE (かぐや) が, 人類史上初めて発見した縦孔下に広がる巨大な空洞は放射線被曝から守られるなど特異なところである. 科学的にも興味深い. 月火星の縦孔・地下空洞探査を, 各宇宙機関の中でその重要性を認識し, 月火星探査シナリオの中にもっと積極的に取り入れることが必要なのでは無いだろうか.

今回, 主催者側が用意していたシナリオは, 必ずしも他参加者の無条件の賛意を得ることは無かったように思える. 実際に, 会合に直接参加し, 主催者のみならず, 一般参加者の意見を公式・非公式に収集することは重要であることを改めて認識した. 以上

<参考> Cis-Lunar とは?  
地球と月の間のこと

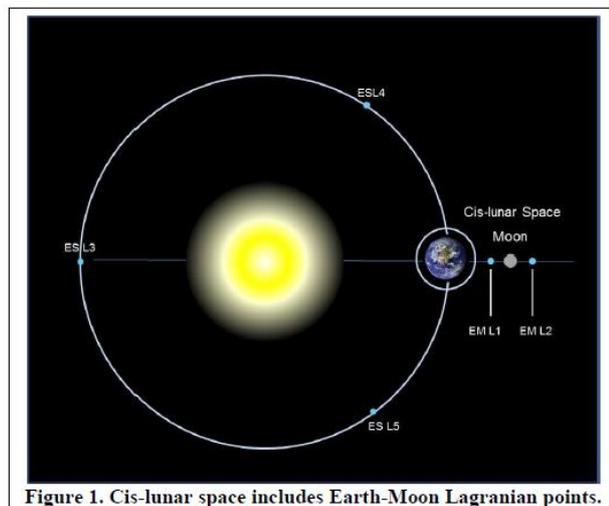


Figure 1. Cis-lunar space includes Earth-Moon Lagrangian points.

(参考3)

## 長期宇宙滞在

NASA ケリー、ロシア・コニエンコ飛行士は昨年3月28日に、ISSに到着、2016年3月2日、340日に及ぶISSでの連続長期滞在を記録した。

連続で宇宙に滞在し続けた世界記録は、1994年1月9日から1995年3月22日の437日、ロシアミール宇宙ステーション滞在したヴァレーリ・ポリャコフ宇宙飛行士が持っている。2位は379日、3位は365日で何れもロシア宇宙飛行士である。

火星への宇宙飛行は、往復で500日程度を言われている。これまでの研究では、ヒトが長期間宇宙滞在すると、視力が落ちたり、筋肉が萎縮したり、骨量が減少したりすることが分っている。ただし、これも個人差がある。このような衰えがどの程度進行するか、またそれを防ぐ方法はあるのか等について結論は出していない。

また、ケリー宇宙飛行士はマーク・ケリー氏と一卵性双生児の兄弟がおり、2人のDNAを比べることで、宇宙と地上での変化を等も調べることが出来ると期待されている。

(参考 4)

SpaceX 社イーロン・マスク CEO が火星探査計画を公表。

米国の宇宙企業スペース X のイーロン・マスク CEO は 9 月 28 日 (日本時間)、メキシコで開催中の国際宇宙会議 (IAC) の壇上で、『Making Humans a Multiplanetary Species (人類を多惑星へ播種する)』と題した講演を行い、人類を火星に移住させ、さらに他のさまざまな惑星へも赴くことを目指した壮大な構想を語った。

それを実現するためのロケットと宇宙船もまた巨大である。Interplanetary Transport System (惑星間輸送システム) と名付けられたそれは、最大直径は 17m、全長は 122m。アポロ計画で使われた人類史上最大のロケット「サターン V」よりもさらに大きい。宇宙船には 100 人も人間、それも長期間にわたって厳しい訓練を受けた宇宙飛行士ではなく、簡単な訓練を受けただけの一般人が乗る。宇宙船は地球と火星を往復して人や物資をピストン輸送する。

さらに、マスク氏の構想は火星に文明を築くということだけに留まらなかった。講演の最後には、この宇宙船が木星やその衛星のエウロパ、土星やその衛星のエンケラドゥスへ飛行する想像図を示し、太陽系のさまざまな天体へ行くことをアピールした。この巨大ロケット・宇宙船に「惑星間輸送システム」という名前が付けられた理由がそこにあった。

その一方で、実現に向けた新技術の開発を続けていることや、コスト計算、開発資金の調達方法なども明らかにし、スペース X にとっては決して夢物語ではなく、あくまで現実的な検討に基づく計画であることを強調した。

