



国際宇宙探査ロードマップは、国際宇宙探査協働グループ (ISECG) の各宇宙機関による拘束力のない成果物です。本第4版は、内容の進展と深化に伴い、定期的に更新される予定です。ISECGは、世界的に調整された探査計画に基づく協力関係に向けて、参加機関が具体的な一歩を踏み出すことができるような成果を得るために取り組んでいます。



出版サービス提供元:

National Aeronautics and Space Administration
(アメリカ合衆国) 本部
ワシントン DC 20546-0001

www.nasa.gov



本文書はオンラインで入手可能です。
<http://www.globalspaceexploration.org>

国際 宇宙探査 ロードマップ

2024年8月





ISECGとは？

国際宇宙探査協働グループ (ISECG) は、情報、目的、及び計画の共有を通じた宇宙探査の推進という共通の目的を持つ、27の宇宙機関による自主的で拘束力を持たないフォーラムです。ISECG参加機関は、合意に基づく拘束力のない成果物（ロードマップ、ホワイトペーパー、技術報告書など）を開発するために調整を行っています。

ISECG加盟機関は、参加機関間の議論を促進し、加盟機関が宇宙探査活動を効果的に計画できるようにする成果物の作成に取り組んでいます。この作業はワーキンググループを通じて実施され、ISECG参加機関の幹部グループによって指導されています。

ISECGの最も主要な成果物は国際宇宙探査ロードマップであり、これは、長期的な有人及び無人太陽系探査の統合的ビジョンを反映しています。

目次

国際宇宙探査ロードマップの新しい内容は?	2
第1章 探査する理由	4
第2章 共に探索する	8
第3章 科学が道を切り開く	14
第4章 地球低軌道	19
第5章 月面及び月周辺の探査	25
第6章 火星	42
第7章 太陽系の他の目的地	47
第8章 宇宙探査のための技術	49
第9章 共通の道をたどって	60
付録	61

国際宇宙探査ロードマップの新しい内容とは？

国際宇宙探査協働グループ (ISECG) の国際宇宙探査ロードマップ第4版は、太陽系における人類の存在の拡大に向けた国際的な支援を描いています。これは、2050年までの宇宙探査に関する共通のビジョンを明確に示す、合意に基づく拘束力のない成果物です。ISECG参加機関の優先事項に焦点を当て、地球低軌道での活動の基盤に根ざし、火星への最初の有人探査に備えて月面及び月周辺での活動を強化するものです。またこれは、太陽系の他の目的地や、無人探査活動と有人探査活動との相乗効果についても論じています。

このロードマップは、共通の探査目標と持続的な探査のための共通原則を反映しています。世界の探査プログラムは急速に進歩しており、ますます多くの国が探査ミッションを実施しています。このロードマップ版では、探査ミッションの全体的なシナリオの最新情報と、ISECG加盟機関による計画的ミッションの概要を提示しています。月は、持続的な探査活動に向けた直近の共通目標であり続けています。したがって、このロードマップは、ますます国際協力を取り入れつつあるISECG参加機関の探査計画の最新情報を反映しています。

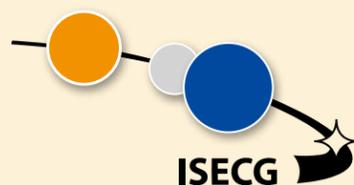
今回の国際宇宙探査ロードマップ改訂版における重要改定事項：

- ・ より多くの宇宙機関が関与するビジョン拡大。
- ・ 新興国宇宙機関による貢献と今後の宇宙探査活動への参加の重視。
- ・ 宇宙探査の利益に関する最新事例。
- ・ 民間企業の関心及び活動の継続的な成長の認識。
- ・ 国際協力を通じて可能となる科学的な知識や協力においての高度な進歩の概要。
- ・ 持続的な探査に重点を置いた、2050年までの計画期間延長。
- ・ 無人探査と有人探査との相乗効果に重点を置いた月・火星以遠の探査活動の主要事項。
- ・ 人類が長期間にわたって月で生活、探索することを可能にするを含む必須技術リストの更新。

ISECG加盟機関は、太陽系における人類及び無人機が存在を拡大するという意欲的な共通目標を実現するために、より多くの参加機関のパートナーシップ及び協力を拡大する未来を構想しています。国際宇宙探査ロードマップを支持している既存及び新興国宇宙機関の数の継続的増加は、宇宙探査に対する世界的な関心と、人類の利益のために共同で探査を行うことへの貢献を反映しています。



地球周回軌道上の国際宇宙ステーションに搭載されたカメラで、第31次長期滞在ミッションのフライトエンジニア、ドナルド・ペティが地球上空約386kmから撮影した一連の画像を合成した画像。



探査の目標と目的

1. 持続可能な方法で 人類の存在を太陽系まで拡大する

- ・ 有人宇宙飛行の継続と地球低軌道の継続的な利用を確保する
- ・ 月周辺及び月面での持続的な滞在と活動を可能にする
- ・ 火星周辺及び火星上での滞在及び活動を行う持続的な有人ミッションを可能にする

2. 宇宙における 私たちの場所を理解する

- ・ 地球-月系、太陽系、及び宇宙の起源と進化を研究する
- ・ 過去または現在の生命の形跡と地球上の生命の起源を探る
- ・ 人類の目的地候補の居住可能性を調査する

3. 一般の人々の参加促進

- ・ 批判的思考を刺激し、教育し、育成する
- ・ 宇宙探査への参加機会を創出する
- ・ 社会に利益をもたらす

4. 経済的繁栄を刺激する

- ・ 宇宙探査のための産業能力と競争力を促進する
- ・ 探査における商業市場の開発を促進する
- ・ 民間セクターとの協力を促進する

5. 国際協力を育む

- ・ 宇宙探査イニシアティブへの各国の参加を奨励し、受け入れる
- ・ 相互運用性を促進し、国際的なパートナーシップの機会を増やす

第1章 探査を行う理由

国際宇宙ステーションから見た日の出。(NASA)

宇宙探査は人類の可能性の指標です。それは、未知の世界へ冒険し、既知の境界のすぐ向こうに何があるのかを発見したいという人類の本来の欲求に応えるものです。困難にもかかわらず、探求心は多くの形で社会に利益をもたらします。宇宙飛行士の宇宙への勇敢な冒険は、普遍的なインスピレーションの源であり、現在及び将来の世代の想像力をかき立て、科学、技術、工学、芸術、数学の分野に対する熱意を生み出しています。宇宙探査は技術革新と科学的発見を推進するものとして機能し、経済成長を促進し、地球上の生活を向上させる新しい製品やサービスの開発につながります。宇宙探査は、世界規模での国際協力と外交を促進し、共通の目標の追求において国々を団結させ、相互尊重と理解を育みます。

ISECG参加機関によって策定された探査の目標と目的は、宇宙探査の利益と密接に関連しています。私たちがますます遠く、困難な目的地へと向かう中で、宇宙探査の全体的な目標は変わることなく、人類に利益をもたらすことです。これらの利益を得るためには、宇宙関係者及び広く一般に積極的に働きかけながら、宇宙に関する知識を深めることが必要です。

アラスカのアリューシャン列島付近の北太平洋上を周回する国際宇宙ステーション。(NASA)

地球低軌道から見た地球の地平線
(NASA)

宇宙探査から得られる利益

宇宙探査に投資している国々は、国内外に多くの利益をもたらしています。昨今の宇宙探査における参加機関や顧客の関心の高まりと多様化は、幅広い利害関係者が宇宙探査の利益を認識していることを表しています。ISECGの参加機関は、宇宙探査によって地球上の人々に幅広い価値をもたらす5つの利益を特定しました。

科学的利益

宇宙空間での有人・無人研究により、物理学、惑星科学、生命科学に関する新たな知識が得られます。宇宙探査を通じて、私たちは人体や我々の惑星すなわち地球についてもさらに詳しく知ることができます。



上: 宇宙で成長したインスリンの結晶 (左) と地球で成長した結晶 (右)。(NASA)
下: 海底研究室「アクエリアス水中居住環境下」のNEEMO23クルー。(NASA/K. Shreeves)

経済的な利益

宇宙探査のために開発された技術は地球上で幅広く応用され、国家経済の活性化や生活の質の向上に貢献しています。宇宙探査から派生した技術は、医療、通信、輸送、その他の産業で広く普及しています。



上: 2024年2月22日に米国企業Intuitive Machines1が月面に着陸した瞬間。(Intuitive Machines)
下: 月面ゲートウェイの居住・ロジスティクス拠点 (HALO) の建設が進行中。(Thales Alenia Space)

国際協力による利益

宇宙探査パートナーシップにより、より大規模で複雑なミッションが可能になります。パートナーシップの拡大は、人類の利益のための宇宙の平和的探査も促進します。

上: 23カ国から280名がISSを訪問。(ESA)

下: 「きぼう」から放出されたグアテマラ初の衛星Quetzal-1 CubeSat (グアテマラ・デル・バジェ大学)

インスピレーションと社会的利益

宇宙探査は、世界中の人々、特に若い世代に、科学、技術、工学、芸術、数学の能力を向上させ、人類の知識の限界を広げ、協力して大きな課題を克服することを促します。要求の厳しい探査ミッションのために生み出された知識と能力は、地球上の生活をより持続可能なものにする可能性を秘めています。



上: アルテミスに搭乗したひつじ宇宙飛行士、ひつじのショー。(ESA/Aardman)

下: ポルトガルの宇宙機関が2022年に開始したオリジナルの取り組みに触発されて開催されたルクセンブルク宇宙機関の「一日宇宙飛行士コンテスト」(Novespace/LSA)

探査エコシステムの利益

宇宙探査に投資している国々は、探査ミッションに参加する将来の機会を確保しています。既存の宇宙機関は、新興機関や企業が科学研究を行い新しい技術を開発する機会を創出し、相互に有益な成果を生み出しています。



上: EVA及び有人地表モビリティ試験チームによる共同テスト。(NASA)

下: ゲートウェイ上のロボットアーム「Canadarm3」の想像図。(CSA/NASA)

世界の宇宙機関は多くの (時には異なる) 探査目標を持っていますが、共通する動機として、宇宙における人類の活動領域の拡大、地球、月、火星、太陽系の起源と進化に関する研究推進、宇宙における我々の位置づけに対する理解などが挙げられます。

第2章

共に探査する



ISECG国際宇宙探査ロードマップ

近年、宇宙探査における国際協力は大幅に拡大しています。パートナーシップと国際協力は、特に地球から遠く離れた場所を探査するにあたって、現在と未来のミッションに不可欠です。各国が協力することで、宇宙飛行の専門知識や宇宙飛行のコストとリスクを共有し、協力ミッションを成功に導くことができます。

宇宙探査は人類の利益のために各国が協力する機会です。私たちは、宇宙の平和利用、探査に対する持続可能で責任あるアプローチ、そして太陽系とさらに太陽系の外の天体に関する知識の増大という共通の目標を掲げて、共に探査を行っています。

探査を成功させるには、科学、ロボット工学、そして有人探査の分野が一体となって進歩することが必要です。科学観測と無人探査による先行ミッションは、人類が深宇宙へ旅立ち、探査目的を達成するための準備となります。

近年、ISECGに参加している多くの機関が宇宙戦略、政策、アーキテクチャ、ロードマップを策定し、公開しています。ここで示すISECG国際宇宙探査ロードマップは、そのような計画の策定と実施に役立ちます。このロードマップは、各機関に特定の手順や活動を義務付けるものではありませんが、最終的には国際協力による宇宙探査への共通理解に繋がります。

ISECG探査原則

以下の原則の下、国際宇宙探査ロードマップが作成されています。これらは、永続的かつ持続可能で責任ある人類の宇宙探査活動の特性を表しています。探査活動は、透明性を保ち、すべての人々の伝統を尊重する方法で行われなければなりません。

経済性

利用可能な予算でより多くのことを可能にする革新的なアプローチの構築：探査プログラムの策定と実行全体を通じてコストを考慮する必要があります。アーキテクチャーは、パートナーシップの下、コストを分担し、再利用可能で信頼性の高い宇宙システムが優先されます。

探査がもたらす利益

探査の目的を達成し、公共利益を創出：持続可能な有人宇宙探査は、探査の目標と目的に一致し、一般市民やその他の利害関係者層に価値をもたらすものでなければなりません。宇宙と他の分野との相乗効果は非常に重要です。

パートナーシップ

多様なパートナーに早期かつ継続的な機会を提供：ますます複雑化する探査ミッションを可能にし、維持するには、国際協力が不可欠です。協力においては規模の大小を問わず、各パートナーの長期的な利益を考慮します。目標が同じ民間部門と協力することで、新たなアプローチが可能になり、宇宙探査をサポートするサービスの市場ができます。

機能の進化と相互運用性

標準インターフェイスによる機能の進化：既存の機能をベースに、段階的に機能を向上させます。共通のインターフェイスとモジュラー型を使用することで、新しいパートナーの参入を促し、質量を軽減し、安全性が向上します。

有人・無人パートナーシップの相乗効果

有人・無人のミッションの相乗効果を最大化：有人・無人システムの独自の補完的な機能を組み合わせることで、より広範な目標を効果的に高い費用対効果で、安全に達成できるようにします。

ロバスト性

技術的及びプログラムの課題に対する柔軟性を提供：計画及び行動には、壊滅的な事象、パートナーの優先順位の変更、利用可能な資金の変更、目標の変化など、計画外の変更や危機的状況に対処できる柔軟性が求められます。重要な機能の異なる冗長性を、現実的な範囲で早期に適用します。

責任ある探査

平和的な共同探査：探査活動は、平和的な目的のために行い、宇宙における国際的義務や原則に則った方法で実施する必要があります。これは、探査活動による宇宙環境への影響を制限し、将来の世代のために宇宙環境を保護する試みを含みます。



地上局：オーストラリアのニューサウスウェールズ州にある64メートル電波望遠鏡（写真）CSIROパークス電波望遠鏡「ムリヤン」は、NASAの深宇宙ネットワークのためにCSIROが運営するキャンベラ深宇宙通信施設の機能を補完しています。ムリヤンは、アポロ計画やインテュイティブ・マシーンス社の初の月面ミッションIM-1をはじめとする最近の無人ミッションの月面通信をサポートしてきました。（CSIRO）

これらの探査原則は、宇宙探査における協力を促進するものです。また、新興国宇宙機関がミッションに参加し、それぞれの規模と目的に基づいて独自の能力と専門知識を開発するための有意義な機会も創出しています。国際協力は地上のインフラも含みます。地上局、シミュレーション施設、訓練施設、アナログサイトの運営や、無線・光通信技術の研究開発は、ISECG加盟機関の参加、パートナーシップ、商業化に適した分野です。

新興国宇宙機関

ISECGは、新興国宇宙機関と既存の宇宙機関の間の協力関係を構築する場としても役立っています。かつて新興国宇宙機関は、大規模な探査ミッションを実施するにあたって大きな障壁に直面していました。従来の探査アプローチで、複雑な技術や能力への大規模な投資を必要としました。しかし、最近では宇宙探査は劇的に変化しており、有意義な探査に参加するために必要な資源の規模も大幅に減少しています。ISECGのようなグループに参加することで、新興機関は自らの探査目標をサポートするパートナーシップを構築できるようになります。

宇宙探査の価値は、成功したミッションの結果だけでなく、その過程で得られる教訓にもあります。

Australian Space Agency (オーストラリア) と Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (オーストラリア)

オーストラリアは、その地理的位置、広大な陸地等を活用し、60年以上にわたって有人・無人宇宙探査ミッションに深宇宙通信を提供してきました。オーストラリアの自然環境には、月面や火星の表面に類似する多様な環境が存在しています。ピルバラ地域のストロマトライトは微生物によって形成された層状の堆積物で、地球上の生命の最も古い痕跡の代表的な例であり、火星における生命の痕跡を研究する科学者によって、調査されています。オーストラリアは、鉱山サイトにおける遠隔操作及び自律操作の分野で世界をリードする能力があり、その技術を資源のその場利用 (ISRU) のために利用する機会を提供しています。Australian Space Agency (ASA、オーストラリア) の月から火星への取り組みの先駆的プログラムでは、オーストラリアが設計・製造した月面探査車ルーバー (Roover) が National Aeronautics and Space Administration (NASA、米国) の将来のミッションで打ち上げられる予定です。



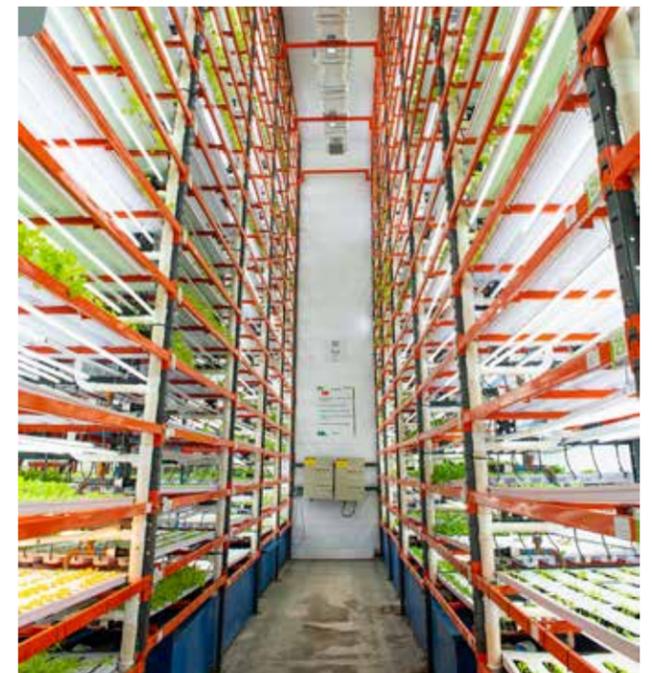
CSIROの資源のその場利用施設には、月面の物理的特性の一部をシミュレートして、ローバーや関連機器などのアセットの現実的な試験と評価を行う月面テストベッドがあります。（CSIRO）



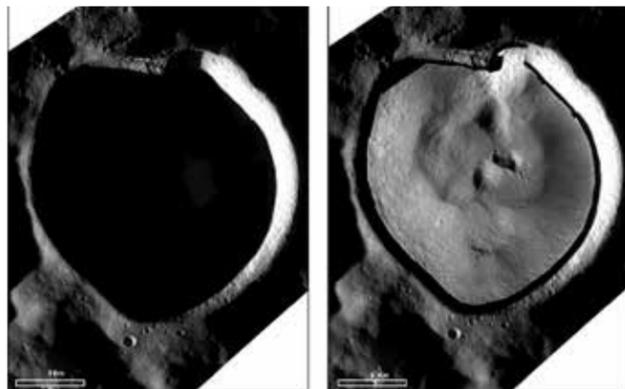
オーストラリア・ピルバラにおけるストロマトライト。（ASA）

Brazilian Space Agency (ブラジル)

宇宙農業は、人類の宇宙探査に対してブラジルが大きく貢献する機会です。Brazilian Space Agency (AEB、ブラジル) と Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa、ブラジル) は、高放射線、低重力、土壌の欠如といった複雑な課題の解決策を模索し、宇宙に適応できる食料生産システムを開発するために、ブラジル宇宙農業研究ネットワークを設立しました。研究者たちは、宇宙の過酷な環境への適応性と宇宙飛行士の栄養需要を満たす能力を基準に、サツマイモとヒヨコ豆という2種に重点を置いたパイロットシステムを開発することとしました。この研究ネットワークでは、宇宙農業の開発が地球上の農業における革新を促し、経済成長につながることを期待されています。



ブラジルの垂直農法。（EMBRAPA / Lilian Alves）



月の北極近くにある永久影の地域Hermite-Aを示すLunar Terrain Imager (LUTI)の単独画像(左)と、LUTI及びShadowCamによる同時観測画像(右)。KPLIOは、Korea Aerospace Research Institute(韓国)とアリゾナ州立大学によってそれぞれ開発されたLUTIとShadowCamを搭載しています。(KASA, NASA)

Korea AeroSpace Administration (韓国)

韓国は2022年にKorea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLIO)を月軌道に投入しました。次いで、Korea AeroSpace Administration (KASA、韓国)は、2032年に月面に着陸することを目標に、無人月面着陸船の開発を開始する予定です。また、同庁は2035年に火星周回機を、2045年に火星着陸機を打ち上げる計画です。

Mexican Space Agency (メキシコ)

Mexican Space Agency (AEM、メキシコ)のColmenaプロジェクトは、2023年から2030年までの3回の月探査ミッションで構成されており、月面及び小惑星の探査と採掘のために、マイクロロボット群を開発することを目的としています。このプロジェクトは、メキシコ国立自治大学のLaboratory of Space Instrumentation (LINX)によって開発及び管理されています。これらのミッションの最初のものであるColmena1号は、2024年1月8日にNASAの商業月面輸送サービス (CLPS) プロバイダーの着陸船に搭載されて打ち上げられました。技術的な問題により着陸はできなかったものの、Colmena1号は深宇宙での技術的目標を75パーセントまで検証することができました。収集された情報はColmena2号の開発を可能に利用されて、このColmena2号は2027年後半または2028年初頭に打ち上げ予定です。



Colmena-1の組立、統合及びテスト段階終了時のLINX施設でのColmenaチーム。(LINX-ICN-UNAM)



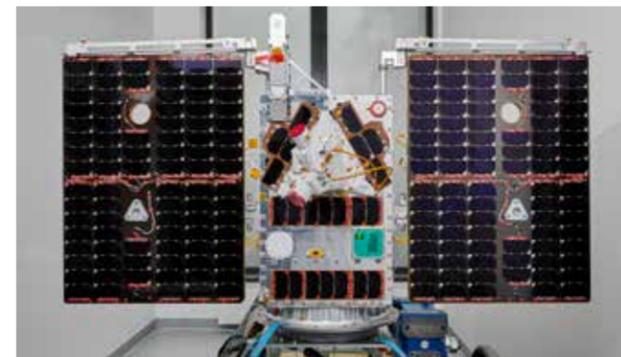
パーシビアランス・ローバーに組み込まれた金色のRimfaxe電子機器ユニット。(NASA)

Norwegian Space Agency (ノルウェー)

ノルウェーの探査活動は、この10年で大きく成長しました。2021年、NASAのパーシビアランス・ローバーに搭載された地中探査用Rimfaxレーダーが、火星で初めて運用されたノルウェー製計測器となりました。Analysing Interferometer for Ambient Air (ANITA)は、技術実証装置から国際宇宙ステーション (ISS) の空気質をモニタリングするための正式なツールにアップグレードされ、ゲートウェイでの運用が検討されています。ノルウェーの研究者らは、深宇宙での持続的な滞在に備えて、微小重力下での食糧生産を研究しています。ノルウェーは、地質学的類似環境での宇宙飛行士フィールドトレーニングを実施し、模擬サンプル材料のキューレーションや分析のための施設を運営しています。European Space Agency (ESA、欧州)は、宇宙飛行士の訓練にノルウェーの仮想現実ツールを使用しています。

Polish Space Agency (ポーランド)

2024年はポーランドの宇宙史にとって歴史的な年でした。2024年7月、サブオービタルロケットILR-33 AMBER2Kがポーランド初の宇宙飛行を果たしました。これは、酸化剤として98パーセントの過酸化水素を使用した世界初のロケットでもあります。2024年8月16日、ポーランド最大かつ最先端の衛星「EagleEye」が地球低軌道 (LEO) への打ち上げに成功しました。EagleEyeは、ポーランドの産業界と学術界の協力によって開発されました。ポーランドの初の月面ミッションに関する作業は2022年に開始され、Polish Space Agency (POLSA、ポーランド)は、2030年までに打ち上げが実現する可能性があると見積もっています。



ポーランドのEagleEye観測衛星。(Creotech Instruments)

Portuguese Space Agency (ポルトガル)

ポルトガルは2018年に国の宇宙戦略を発表して以来、特に宇宙医学や模擬環境関連の分野で科学的・産業的な関心が高まっています。Portuguese Space Agency (PSA、ポルトガル)は、国内の潜在的な模擬環境と施設をリストアップしており、特に、世界中の既存の施設 (セルバジェンス諸島やカペリニョス火山など) を補完する機能を提供する場所に関心を示しています。ポルトガルには、研究インフラである高エンタルピー研究用欧州衝撃波管 (ESTHER) もあります。地上レベルで大気圏突入プラズマを再現し、将来の惑星探査ミッションを支援することを主なミッションとしています。



高エンタルピー研究用欧州衝撃波管。(Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear)

ISECGは、新興宇宙機関に探査プログラムに関する独自の知見を提供するとともに、協調的に参加する機会も提供しています。各国は、社会経済的発展のために宇宙を活用しており、それによって、高度なスキルを持つ労働力の育成や国際的なパートナーシップの強化を図っています。新興宇宙機関の増加と探査原則の強固な基盤により、ISECG加盟機関は今後も共に成長を続け、探査を進めていきます。



ツールを使用してOSIRIS-REx科学キャニスターの底から小惑星粒子を収集する宇宙物質処理班。(NASA)

探査活動の理由： 包括的な科学的テーマ

宇宙探査により、物理科学や生命科学に関する重要な調査が可能になります。これらの調査は、以下に示す主要な科学的課題に取り組むものです。科学的調査は探査を可能にする鍵でもあります。新しい目的地に到達するために必要な新素材や新技術とは何でしょうか？私たちはどのような現地資源を特定し、持続可能な方法で活用できるでしょうか？今後のミッションや調査のために、重要な知見やデータをどのように活

用できるでしょうか？そしておそらく最も重要なのは、こうした冒険が、地球に戻った私たちの種としての幸福の向上にどのように役立つかということです。結局のところ、地球近くの惑星について学ぶことで、私たち自身の故郷についてより多くを学ぶことができます。他の惑星を探査することで、私たちは地球の過去、現在、未来も探査しているのです。

国際宇宙探査ロードマップは、いくつかの重要な科学分野を調査するという広い意味で合意に基づいています。



宇宙の起源調査

宇宙の起源を理解し、生命の出現につながった基本的なプロセスを調査します。



科学のためのテクノロジーの活用

新しい環境や極限環境で科学的調査を実施するための技術の適用可能性を探り、宇宙の技術の地上への応用を探ります。



地球外生命探査

地球外生命の痕跡を探り、太陽系における現在または過去の生命の可能性を探ります。



資源の発見と活用

地球外資源の探査と宇宙ミッションでの利用の実現可能性を評価し、有人及び無人による長期にわたる探査のための科学活動に重点を置きます。



惑星科学

惑星の地質学と科学現象を探求し、地球と太陽系全体の地質、大気、化学プロセスについて理解を深めます。



生物学及び生命科学

宇宙環境が人類、植物、動物に及ぼす影響を研究します。



地球中心の環境科学

地球が直面する科学的な疑問に取り組む、環境、気候、自然災害、及びその傾向に焦点を当て、私たちの母なる惑星に関するより良い意思決定に役立てます。

第3章

科学が道を切り開く

宇宙探査は新たな領域を開き、私たちが誰であるか、どこから来たのか、そしてどこへ向かっているのかについて理解を深めてきました。惑星の起源や形成過程の調査から、生命の痕跡の研究に至るまで、私たちを取り巻く根本的な謎を解き明かし続けています。

科学と探査は切り離せないほど密接に結びついています。人類は地球を超えて冒険を続ける中で、新たな知識を蓄積し、いくつかの基本的な疑問に答えるとともに、さらに多くの疑問を抱えてきました。最新の科学機器は前例のない量のデータを生み出し、宇宙飛行と探査ミッションの増加により、惑星科学、宇宙論、生命の起源に関する疑問に答えるための新しい科学研究を行う機会がかつてないほど増えています。

この関係は相互的です。すなわち、探査によって科学的な疑問に取り組むことができ、科学的成果によってさらに意欲的な探査が可能になります。

例えば、月に存在する資源の特性を明らかにすることは、地球、月、太陽系の歴史を理解する一助となるとともに、ISRU(資源のその場利用)を通じて月で燃料を製造したり、生命を維持したりする可能性を開くことにも繋がります。宇宙探査機や無人機に対する宇宙の塵やプラズマの相互作用の影響を研究することは、宇宙や太陽の現象に対する理解を深めることに繋がります。宇宙ミッションは、有人、無人に関係なく、特定のパラメータ内で理論を検証する機会をもたらす、新たな探究の道に繋がります。

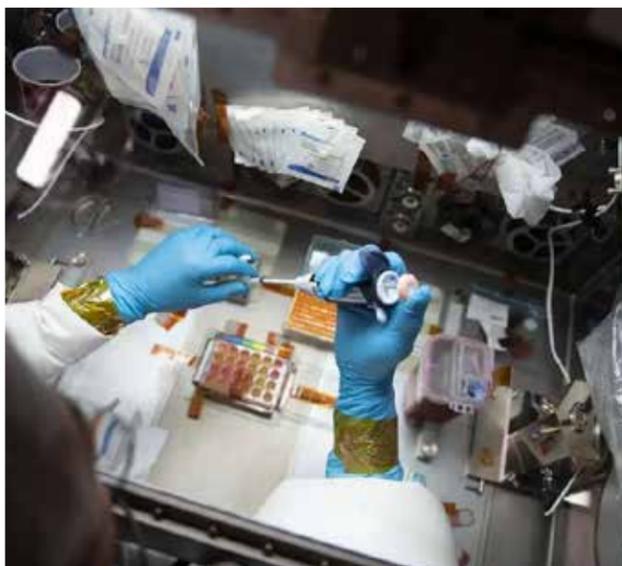
誰が探査するのか：科学における有人探査の価値

有人宇宙探査は、無人ミッションと連携して、宇宙での科学的知識の向上に加え、地球上での科学的知識の進展にも重要な役割を果たしています。有人探査と無人探査の相乗的な協力は、私たちの太陽系及びそれを超える領域の理解に向けた新たな道を切り開きます。有人探査は世界中の人々にインスピレーションを与えるものでもあります。宇宙での人類の冒険は、地球上での偉大な成果につながります。

有人及び無人探査：補完的なアプローチ

地球低軌道 (LEO) 以遠の科学的調査は、歴史的に、無人探査の領域でした。それは長期にわたる大規模な観測が低リスクで可能だからです。無人ミッションは特定のタスクの実行に優れていますが、有人探査はそれと比較できない利点をもたらします。宇宙飛行士は、地形に適応する機動性や柔軟性、器用さを備え、地質学や科学調査のための特定のサンプルの収集・分析など、より幅広いミッション活動を実現します。宇宙飛行士は、ドリルなどのさまざまな工具を操作でき、ミッション計画に対応して高い柔軟性を発揮します。

無人探査機は、人間が到達できない領域にも赴くことができ、リモート操作及び宇宙飛行士と連携して動作し、人工知能によって強化されています。無人探査機は、計画されている有人ミッションの前段階としての役割も果たし、対象場所を特定し、揮発性物質やその他の資源を調査し、宇宙飛行士が使用する機器や貨物を事前に配置します。無人ミッションは、月や火星以遠の太陽系の探査を引き続き牽引し、私たちの科学的視野を広げ続けるでしょう。将来のミッションでは、人間と無人探査機の独自の能力を組み合わせ、宇宙飛行士の時間を最大限に活用し、科学的能力と質を高め、船外活動 (EVA) のリスクを軽減する予定です。



ISSでCelestial Immunity studyを実施するNASAの宇宙飛行士Mark Vande Hei。この調査は、既存及び新たなヒト疾患を予防及び治療するための新しいワクチンや薬剤に関する知見をもたらす可能性があります。(NASA)



ESAのRosalind Franklin rover (概念図)。このローバーは、火星の表面を横断し、地表から最大2m下まで掘削して、絶滅した生命と現存する生命の痕跡を探します。(ESA/ATG MediaLab)

どのように探査するのか：責任ある探査、惑星保護、科学的整合性

人類がグローバルな探査活動に乗り出す中で、責任ある宇宙探査の必要性はかつてないほど明確化しています。経済的な安定性と費用対効果は、責任と冗長性を兼ね備えた持続的な宇宙探査の不可欠な側面ですが、惑星保護の概念、すなわち太陽系の天体を地球物質による汚染から保護し、地球外由来による地球の汚染を防ぐ必要性も不可欠です。

協働的科学ミッション：国際協力と知識共有

協働科学ミッションは、国際的な取り組みにおける冗長性を促進します。国際的な専門知識と能力を活用することにより、責任ある探査は資源の最適な利用を可能にします。国際的な協働イニシアチブは、先進的な科学目標に対処するための知識の共有を促進します。



火星で無人航空機を操縦する宇宙飛行士 (概念図)。(NASA)

ヒューマンアシストロボットは、惑星表面を探索し、極限な環境でデータを収集するために開発されています。(CSIRO)





2010年にスペースシャトルミッション (STS-130) から見た国際宇宙ステーション。(NASA)

国際協力による宇宙探査の機会

科学の進歩には国際的な協力の取り組みが不可欠です。宇宙機関間の戦略的調整により、多様な考え方、革新的なコンセプト、そして技術の進歩をもたらします。国際的なフォーラムや二国間・多国間協定により、科学的目標の優先順位を追求するための協力と調整の基盤を築くことができます。月面経済の成長と商業探査サービスが利用できるようになれば、これまで過小評価された分野や宇宙機関を含む科学コミュニティに、月やその他の惑星への信頼性が高く、手頃な輸送手段がもたらされるでしょう。有人及び無人の探査活動の相乗効果により、どちらか一方が単独で行うよりも科学的知識をさらに、より速く推進することができます。

以下の研究及び技術分野は、特に協力に適しています：

- » 惑星地球物理ネットワーク
- » 月面天文観測所
- » 現地調査及び分析
- » 揮発性物質の探査及びマッピング
- » データ転送インフラ

オープンサイエンスとデータ共有方針、目的の幅広い伝達、国際的な調整は、科学的分析から技術的専門知識、科学的イニシアチブを達成するためのハードウェアの提供に至るまでの共同活動を特定する際の鍵となります。



アルテミス1ミッションで、月を通過するオリオン宇宙船。(NASA)

好奇心と探査

科学は宇宙探査の重要な原動力であり、世界的な協力と知識の共有の機会をもたらします。無人・有人のミッションを実施することで、私たちは最も深い科学的疑問に対する答えを発見するだけでなく、地球上の生活を向上させ、より意欲的な探査を可能にする技術を開発しています。科学は宇宙探査の取組の基盤と動機の両方の役割を持ちます。探査インフラは、科学的観測に基づいて設計を決定するだけでなく、科学的な疑問は探査の根拠、すなわち、なぜ探査するのか、何をしたいのか、どこで探査する必要があるのかを明らかにします。科学と宇宙探査は、相互に発展していくものです。探査計画と技術開発のあらゆる段階で科学と統合することにより、最終的に将来の探査事業に情報を提供し、有人及び無人探査に伴うリスクを軽減し、私たちを取り巻く宇宙の発見を促進することになります。

第4章

地球低軌道

地球低軌道 (LEO) は、我々から最も近いフロンティアであり、長年探査の入口としての役割を果たしてきました。ここには宇宙ステーションとそのクルー、宇宙望遠鏡、商業、通信、科学用途に無数に使用される何千もの衛星が配置されています。人類が地球低軌道に継続的に存在することで最先端の科学が可能になり、月、火星、さらにその先の探査へと向かう足がかりとなります。

国際宇宙ステーションと地球低軌道の進化

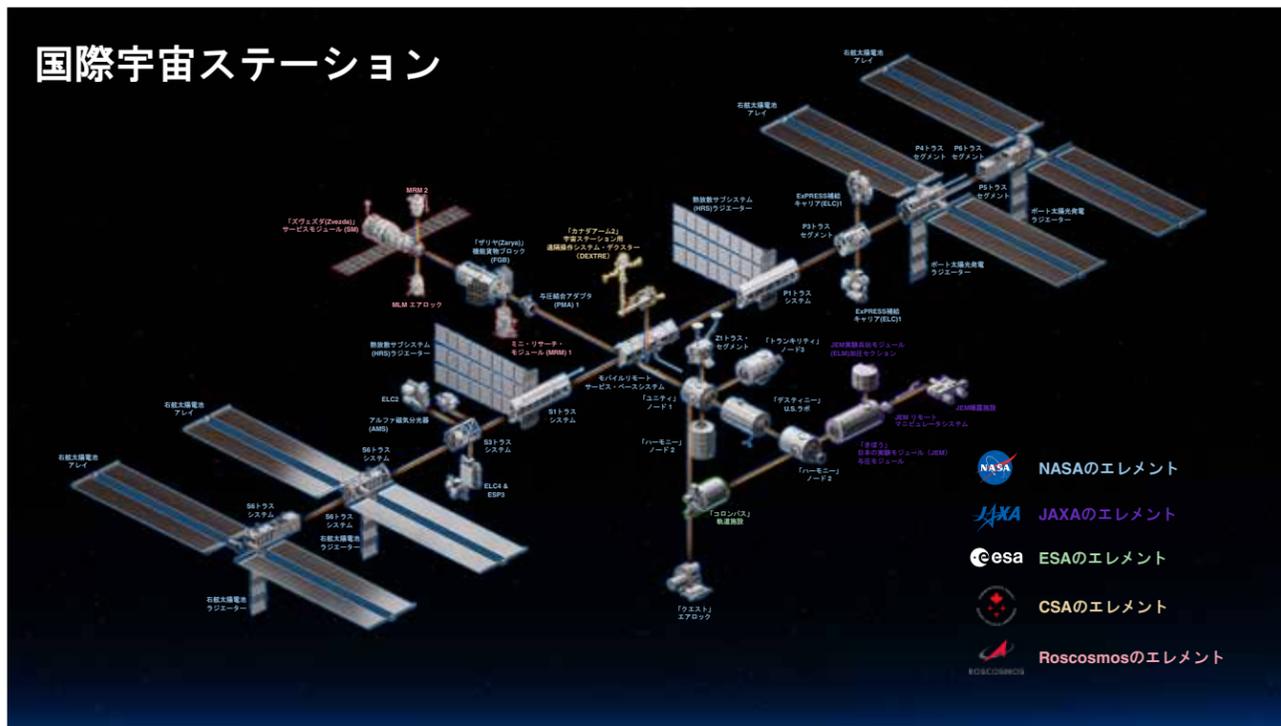
1998年に国際宇宙ステーション (ISS) の最初のモジュールが打ち上げられ、LEOにおける協力の時代が始まりました。ISSは、15か国によるパートナーシップからなり、国際協力が最も著しい例の1つです。ISS計画は、23か国から280名を受け入れ、数多くの技術的発見と進展を支援してきました。ISSの成功は、協力的で協調的な宇宙ステーションに対する国際的な取組の結果です。

これまでに、生物学及び生命工学、地球及び宇宙科学、ヒトを対象とした研究、物理科学、材料科学・技術の分野にわたり、100か国以上が3,000件を超える実験をISSで実施してきました。実験室としてのISSは、長期間の微小重力環境、宇宙への曝露、そして上空からの地球の眺めというユニークな条件を提供しています。

それには、米国のデスティニーモジュール (2001年)、ESAのコロンバスモジュール (2008年)、日本の実験モジュール「きぼう」 (2008年)、ロシアのナウカモジュール (2021年) の4つの専用科学モジュールと、外部科学施設があります。



NASAの宇宙飛行士Jessica Meirは、コロンバス実験モジュールにある国際宇宙ステーション野菜植物施設内で栽培されたミズナ (カラシナ) の葉を刈り取り、収穫しています。(NASA)



天宮宇宙ステーション。(CMSA)



中国の軌道上活動

重点研究分野とそれらの応用例は次のとおりです。

- 
基礎科学
 分子生物学、材料科学、プラズマ物理学、燃焼、流体挙動
- 
植物の成長
 微小重力における食用作物、宇宙環境への種子の曝露
- 
天体物理学
 宇宙線、暗黒物質、反物質
- 
創薬
 疾患、標的治療、組織チップの研究
- 
地球観測
 機構関連データの収集、災害時リアルタイム対応
- 
製造
 人工網膜、光ファイバー、3Dプリント
- 
ヒトの健康
 気道モニタリング、免疫機能、筋肉及び骨量の減少、眼変性症、心理状態、軽量かつコンパクトな診断技術
- 
バイオプリンティング
 テンプレート不要の3Dプリントによる組織及び器官
- 
ロボット工学
 ロボットアーム、共同作業ロボット

China Manned Space Agency (中華人民共和国) の宇宙ステーションプロジェクトは、2011年に天宮1号宇宙実験室で始まり、その後、2016年9月に天宮2号宇宙実験室へと続き、いずれも、その後、大気圏再突入しました。

2021年及び2022年には、より大規模な天宮ステーションの3つのモジュールが打ち上げられました。天和は2021年4月に、問天は2022年7月に、夢天は2022年10月に打ち上げられました。

新しい宇宙ステーションへの最初の有人ミッションは2021年6月に開始し、中国の宇宙飛行士 (taikonaut) は天和で90日間を過ごしました。CMSAは、今後15年間、宇宙飛行士3名が宇宙ステーションに6か月間継続的に滞在し、中国及び国際パートナーによるさまざまな実験を実施することを見込んでいます。

宇宙ステーションの主な研究及び応用分野として以下が挙げられます。宇宙医学、宇宙生命科学及び生命工学、微小重力流体物理学、宇宙物質科学、微小重力基礎物理学、宇宙天文学及び天体物理学、宇宙環境及び宇宙物理学、航空宇宙用材料、宇宙地球科学及び

応用、宇宙情報技術、新航空宇宙技術、新宇宙応用研究。

中国は天宮を3つのモジュールから6つのモジュールに発展させ、追加のモジュールを収容するために6つのドッキングポートを設置する計画です。天宮ステーションでの国際協力は、他国の宇宙船が訪問する際のモジュール単位での協力、宇宙飛行士の共同飛行、そして宇宙科学や宇宙応用研究における協力を含みます。2023年8月時点で、天宮は60回以上の実験を実施しています。2019年、国際連合宇宙部 (UNOOSA) はCMSAと協力し、宇宙ステーション内で実験を実施しました。その際に、23の研究機関と17か国からの実験が実施されました。

インドの軌道上活動

Indian Space Research Organisation (ISRO、インド) のGaganyaanプログラムは、宇宙飛行士3名を3日間のミッションのために軌道に打ち上げ、その後インド洋に着水させることを目指しています。ISROは2023年10月に、宇宙船のサブシステム、クルー脱出システム、カプセル回収のテストに成功しました。2024年2月、インドは初の宇宙飛行士候補者4名を選出したことを発表しました。ISROはまた、2035年までに将来のミッションのための重要な基盤となるBharatiya Antarikshaステーションの設立に向けて取り組んでいます。



ISROの試験ロケットの打ち上げ(左)とクルーモジュールの回収(右)。(ISRO)



地球低軌道での商業化活動

歴史的に、LEO(低軌道)宇宙探査、試験、及び能力実証は、主に政府の支援によって実現されてきました。しかし、近年、政府との契約機会を契機とし、民間セクターのLEO活動に関する能力は増大しています。政府は依然として宇宙探査活動への主要な投資者ですが、ISECG加盟機関の多くは民間企業の能力を活用し、LEOにおける有人宇宙飛行、科学、及び探査活動を支援しています。

民間企業がLEOでの活動を拡大できるようにすることで、コスト削減、強固な国家宇宙経済の構築、宇宙機関によるLEO外への探査活動のシフト、さらには技術的な発見と進展の支援が可能になります。ISECG加盟機関は、こうしたパートナーシップが各国の経済だけでなく、より広範な国際宇宙探査にも利益をもたらすことを認識し、これを支持しています。例えば、民間企業は引き続き宇宙飛行士をISSに送り込み、科学的活動や啓発活動を含むミッションを実施しています。

ISSで実施された調査や得られた運用経験は、企業に次第に移転され、打ち上げコストの削減と相まって宇宙経済の成長を促進しています。ISSには30を超える商業実験、プラットフォーム、施設、または機器(Bartolomeo、国際商用実験キューブ、Bioreactor Express Service、Astrobeeなど)が設置されており、LEOにおける将来の商業研究や製造への道が開かれています。

ISSは、発電、空気と水のリサイクル、二酸化炭素の除去、通信、ロボット工学など、長期探査を可能にする技術の開発と実証を行うプラットフォームとして機能しており、多くの場合、これらの技術は地球上での商業用途にも応用されています。例えば、ISSにあるESAのマイナス80°C実験室用冷凍庫をベースにした技術は現在、液化天然ガスタンカーでの蒸発を削減するために使用されており、温室効果ガスの排出を削減しています。Dextre robotic armやRobonautなど、ISSでのロボット作業は、地球の工場で一般的に使用されている応用型把持技術やウェアラブルロボットグローブの開発につながっています。



ISSにドッキングするAxiom Mission 1 (Ax-1)のSpaceX社のDragon Freedom宇宙船。Ax-1は完全に商業的なミッションで宇宙飛行士4名をISSに運びました。(NASA)



NASAエイムズ研究センターの模擬ISS環境でAstrobeeロボットプラットフォームに取り付けられたCSIROのmulti-resolution scanning payload。(CSIRO)

ますます多くの企業がISS上で商業化プラットフォームやサービスを提供し、多様な利害関係者に機会を創出しています。これらの企業は、微小重力環境へのアクセスを可能にし、観測機器の統合、展開、運用（地球観測、ロボット工学、材料科学、天体物理学への応用）などのサービスを提供し、民間企業がより簡単に、宇宙にアクセスしやすくコスト効率を高めています。

ISSで商業的に運営される施設は、主に次の2つのカテゴリに分類されます。

衛星の放出：

ISSは衛星の放出において重要なプラットフォームとして機能しています。何百ものキューブサットがステーションから放出され、その多くは小規模な新興宇宙機関に宇宙へのアクセスをもたらしました。民間プロバイダーの台頭により、コストが削減され、衛星の打上げと軌道投入のプロセスが容易になりました。

科学実験と技術実証のためのプラットフォーム：

商業パートナーは、ISS独自の与圧及び曝露インフラを活用して、軌道上で作業を実施しています。ISSのインフラは、電力、データ管理、通信、及び観測機器の制御を可能にします。



日本実験棟「きぼう」小型衛星放出機構から放出された原田精機株式会社が開発したHSKSAT。(JAXA)

いくつかの民間企業は、LEOにおける完全な商業宇宙ステーションの新たな概念の研究にも取り組み、宇宙機関との協力も行っています。LEOは、民間企業に微小重力の特別な条件を活用する有益な機会を提供しています。宇宙への輸送コストの削減、打上げ頻度の増加、将来の低軌道商業プラットフォームでの最新の軌道インフラへのアクセスにより、LEO経済の重要な革新と成長が促進されるでしょう。宇宙分野に新規参入した商業的「ニュースペース」企業の能力は、各国の宇宙機関、特に小規模な新興宇宙機関が宇宙探査に参加するための選択肢をさらに増やすこととなります。



月。(NASA)

第5章

月面及び月周回探査

2018年版国際宇宙探査ロードマップの発表とLEOの宇宙飛行計画の拡大以降、多くの宇宙機関から再び月は注目を集めています。月は、最先端の科学を実施し、長期持続可能な探査と将来の火星への有人ミッションの能力を開発及び実証する機会をもたらしています。持続可能な月面探査には資源のその場利用(ISRU)、成熟した通信及びナビゲーションシステム、短距離及び長距離の月面輸送システム、信頼性の高い居住システム、電力発電、月塵軽減技術といった新たな能力が必要です。

これらの能力は、新しい商業貨物輸送サービスと組み合わせることで、各国が宇宙探査の目標を達成する上で役立ちます。また、科学界や学術界に、月面やその周辺の多くの興味深い場所へのより頻繁かつ多様な、低コストのアクセスをもたらします。月面探査はイノベーションと経済成長を促進し、健康や医療、公共安全、消費財、産業生産性、輸送など、地上の日常生活のあらゆる側面に影響を与える技術の進歩を牽引します。

月面探査運用コンセプト

更新版の国際宇宙探査ロードマップでは、ISECGの最新の月面探査シナリオを紹介しています。月面探査シナリオでは、個々のミッションに着目するのではなく、ますます高性能化する月面輸送システム、表面横断システム、及び支援インフラの段階的な開発を構想しています。これは協力的な科学研究と有人探査活動を可能にし、月の南極地域での持続的な滞在に繋がるものです。これらの取り組みでは、着陸するダウンマス(軌道から地球へ運ばれる貨物)を重視し、最終的にはミッションごとにクルー4名をサポートし、月の南極地域から始まって最終的には他の場所に拡大し、科学的な成果と探査距離を増大する移動システムを構築します。

これらの探査計画は、科学技術の実証を目的とする無人ミッション、それに続く有人探査及び複雑かつ高性能なロボットシステムという、確立された宇宙飛行の慣行を踏襲しています。これらの人間とロボットの協力関係から得られる教訓は、将来の火星探査やその先を目指すミッションの計画にも役立ちます。本章では、月面探査シナリオを提示し、それを実現するためにISECG参加機関が計画している無人・有人ミッションについて説明します。このシナリオは12のISECG月探査目標を反映しています。

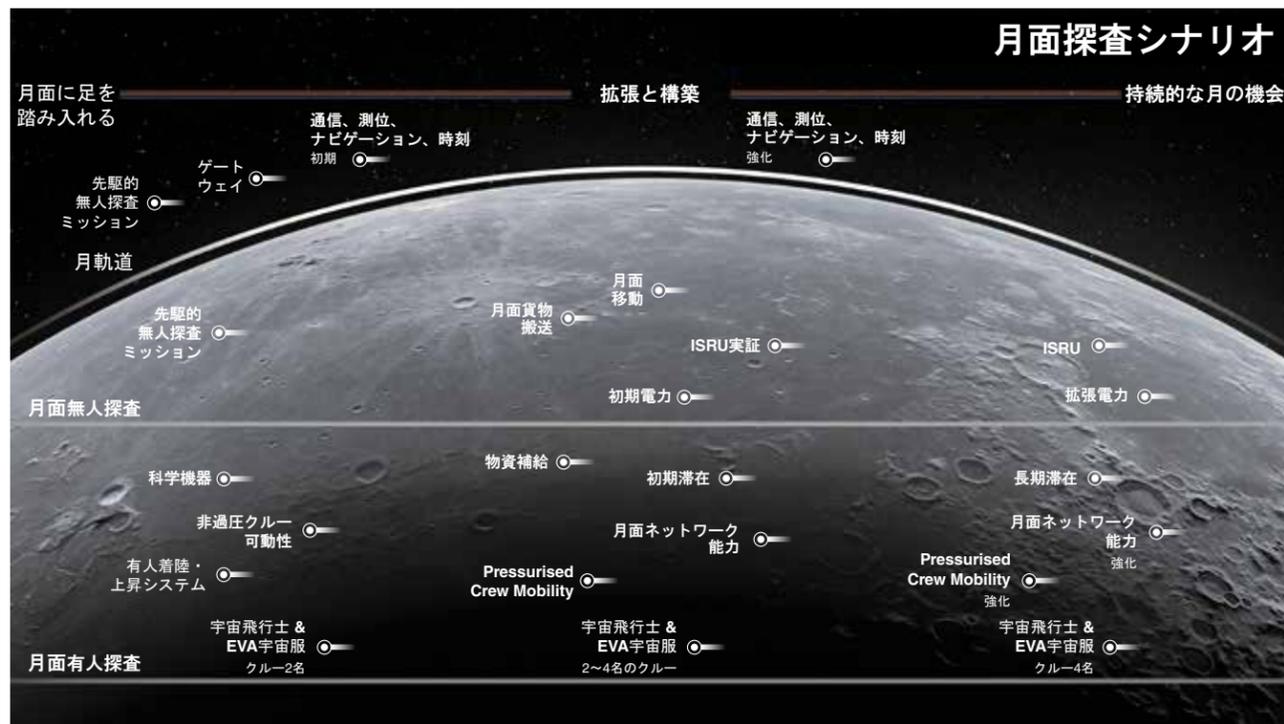
月面探査シナリオの目的



目的	ISECG ゴール	パフォーマンス 測定目標
有人離着陸能力の実証、月面への定期的なアクセスを確立する		5年間に最低3回、4名のクルーミッションのペースを確立する
月面での大規模な月面要素及び物資補給のためのさまざまな物資輸送能力を実証する		>大規模月面要素の場合は9t以上 >物資補給の場合は1t以上
月面における宇宙船外活動（EVA）能力を実証する		現場での粉塵管理/軽減、科学サンプリング/キュレーション技術など、最小限のメンテナンスで再利用可能な船外活動（EVA）システム
月面における人間の長距離移動能力を実証する		10,000km（累積）
月面における人間の長期滞在能力及び運用手順の信頼性を実証する		500日（累積）
火星表面ミッションの検証に必要な期間、月面で生活し働くクルーの健康及びパフォーマンスの持続可能性を実証する		月面滞在日数が30～60日で、微小重力期間が長く、ミッション期間ごとに10人程の被験者がいるミッション： 月面滞在前の微小重力期間が約90日の調査ミッション 月面滞在前の微小重力期間が約180日のリスク低減ミッション 火星表面滞在前の微小重力期間が360日、火星表面滞在後の微小重力期間が270日の 火星検証ミッション



目的	ISECG ゴール	パフォーマンス 測定目標
月面とゲートウェイ間のクルー輸送及び月面活動に必要な現地資源の生産と活用能力を実証する		年間50tの推進剤を生産する
革新的な科学を遂行するために、効果的かつ国際的な有人・無人協働探査を実施する		科学的価値を判断するために必要な包括的評価
持続的な探査と継続的な人間の滞在という目標を達成するために必要な、可用性が高いインフラ（電力、通信、ナビゲーションシステムなど）を開発する		電力 :300kWの発電 通信 :月全体-地球間のデータ転送速度は1Gbps、地球-月間のデータ転送速度は100Mbps以上 ナビゲーション :月面の基準局による数mの精度 追加システム :TBD
大勢の一般市民に訴えかけることで、一般市民、特に若者に有人・無人月面探査に対する興味を持たせ、最先端技術と新しいコミュニケーション方法を最大限に活用する		国家レベルで、可能な限り、アンケート、ウェブサイトのヒット数、ソーシャルメディアへの影響などを通じて、月面探査に対する国民の肯定的な態度を測定する
経済的繁栄を促進し、商業機会を創出し、多様性による対応力を高め、新しい商業的な取り組みを実施する		年々増加している月面サービスを提供する商業パートナーや利害関係者数
月面シナリオに貢献するために、国際パートナーへの多くの協力機会を提供する		100カ国以上による月面シナリオへの参加



注記：縮尺は正確ではありません。図上の位置は着陸場所を示すものではありません。

各フェーズを通じて、参加機関はさらに多様かつ複雑な能力を構築します。このシナリオは要素依存しないため、さまざまなパートナーが能力達成に貢献できます。フェーズ1は、無人探査による先行ミッションと、有人探査の基本的要素、離着陸、物資供給の輸送、及び月面移動能力で始まります。次いで、長期滞在、電力、通信とナビゲーションの強化及びISRUを包括する機能は発展し、宇宙機関はますます意欲的かつ科学的な探査目標を追求できるようになります。フェーズ2では、広範囲的な地点を探索し、長期ミッションに最も有益な場所を特定することに重点を置きます。フェーズ3では、政府、学界、及び産業界の国際的なパートナーシップを通じて、今後数十年にわたって持続的かつ活発な月面探査の基盤を築きます。このフェーズでは、各政府は、火星探査ミッションの開発を含め、探査のフロンティア拡大に着手します。

このシナリオは、各参加機関が要素、ミッションアーキテクチャ、またはリソースを提供できる、協力的な国際的探査アプローチを表しています。国際的なパートナーシップには、異なる冗長性の利点もあり、複数の独立した要素により機能が補完されるため、単一のテクノロジーやハードウェアへの依存が軽減されます。この取り組みとリスクの共有により、次世代の月面探査は、持続的で次第に複雑化するミッションによって特徴づけられます。以下で説明する無人・有人ミッションは、持続的な月面探査に必要な能力と技術を構築します。

月面探査のための通信とナビゲーション

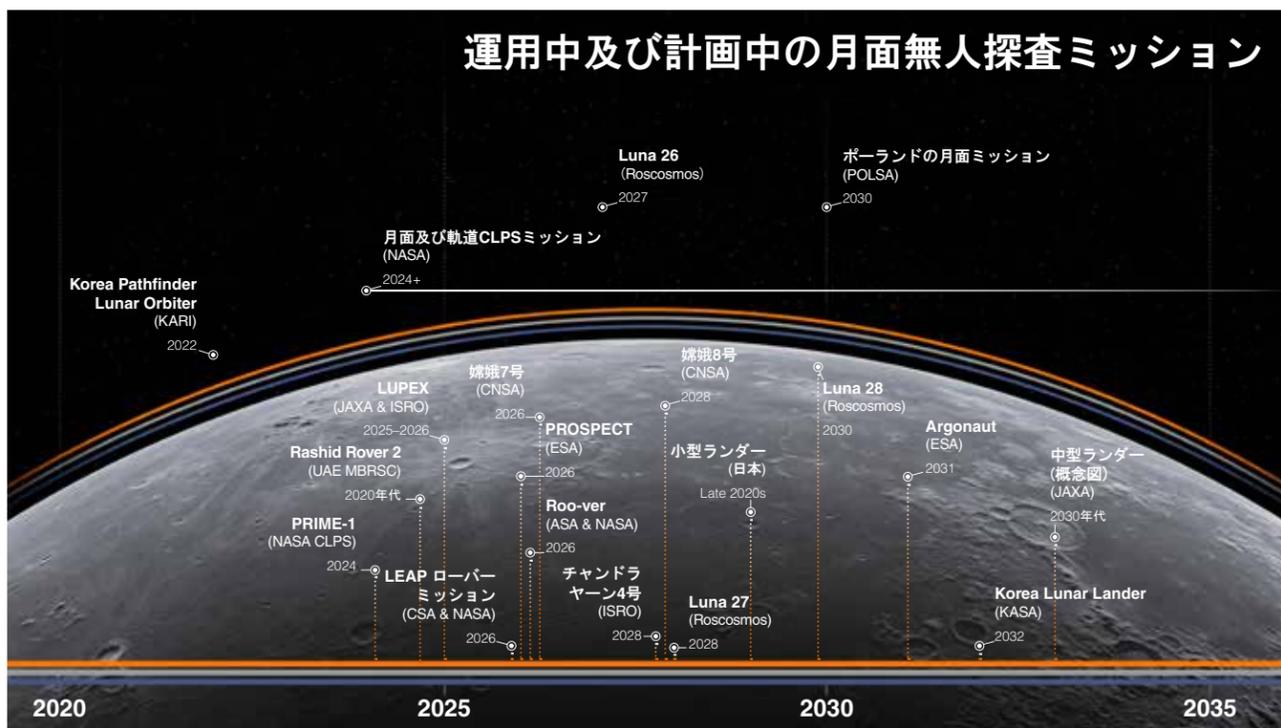
月面及び月面周辺での長期探査を成功させるには、軌道及び月面の施設に関する通信、測位、ナビゲーション、時刻情報（CPNT）技術が必要になります。このCPNTアーキテクチャは、月と地球の軌道上の宇宙船、月面のノード、地球の地上局などの要素をリンクします。

ISECG加盟機関の中には、民間企業がより大規模な国内及び国際的な探査アーキテクチャの一部としてミッション全体を実行するサービスを基本としたモデルを採用するケースが増えています。各国政府は月面のための主要な宇宙技術、プロジェクト、ミッションに引き続き投資する一方で、ISECG加盟機関は将来の宇宙飛行科学及び探査活動のために新たな政府外能力を活用し、活気ある宇宙経済を創出することを期待しています。

月面探査には、広範囲にわたる緊急時の対応計画も必要になります。ISECGの国際アーキテクチャワーキンググループは、電力または生命維持機能の喪失、船外活動中のクルーの行動不能、機械故障、機器の遠隔操作（現地操作または月面外操作）の必要性など、アーキテクチャ設計、要素機能、及びオペレーションの実施に影響を及ぼす月面での不測事態を数多く特定しました。これら考慮事項のすべてが、要素設計及びコンセプト開発時に解析されます。

月面無人探査ミッション

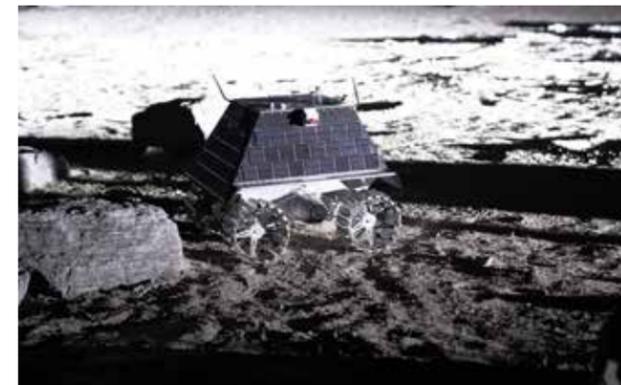
多くの無人ミッションは月極域を調査し、将来の有人ミッション計画の指針となります。これらのミッションは、さまざまな場所の氷、資源、及び地質化学の月面検証データを確立する調査から始まり、事実上の国際的な月極域探査ミッションを形成します。これらの調査に続いて、優先度の高い場所の探査と準備が行われます。これら一連のミッションは、最終的に持続的・国際的な月面活動に情報をもたらし、支援することになります。民間セクターの取り組みによって補完された各国の宇宙機関ミッションのポートフォリオの拡大は、月面への継続的な科学的関心を強調し、この世界規模の協力と、持続的な月面探査に必要な人間とロボットのパートナーシップの重要性を浮き彫りにしています。



注記: 縮尺は正確ではありません。図上の位置は着陸場所を示すものではありません。

Canadian Space Agency (カナダ)

Canadian Space Agency (CSA、カナダ) は、月面技術開発、宇宙での実証、科学ミッションを支援するために、2019年にLunar Exploration Accelerator Program (LEAP) を開始しました。初期のプログラムは、国際パートナーと連携して進められる月面ローバーのペイロードやその他の科学技術の実証を含んでいます。



CSAの模擬地形での試験中のLEAPローバーミッションプロトタイプ。(CSA)

China National Space Administration (中国)

2020年12月17日、嫦娥5号ミッションは1,731gの月のサンプルを地球に持ち帰ることに成功し、China National Space Administration (CNSA、中国) の最初の3つの月探査目標である周回、着陸、帰還が成功裏に達成されたことを示しました。The China Lunar Exploration Programは現在、フェーズ4を実施中で、嫦娥4号、嫦娥6号、嫦娥7号、嫦娥8号のミッションが行われています。嫦娥4号は、2019年1月3日に月の裏側に初めて軟着陸を達成し、玉兔2号 (Yutu-2) ローバーを展開しました。月の裏側からサンプルを採取するミッションである嫦娥6号は、2024年5月3日に打ち上げられ、2024年6月25日に地球に帰還しました。嫦娥7号は、2026年頃の打上げが予定されており、月の南極地域における水氷の調査に焦点を当てています。2028年頃に打ち上げが予定されている嫦娥8号は、南極地域の調査を継続し、将来の月面インフラ建設のための主要技術を実証する予定です。CNSAは、定期的な科学探査、技術実証、及び月資源の活用のために、2035年頃にInternational Lunar Research Station (ILRS) の基本モデルの建設を完了する計画です。



月面上の嫦娥6号着陸機と上昇機。(CNSA)

European Space Agency (欧州) Italian Space Agency (イタリア)

ESAは、最初の商業月面ペイロードサービス (CLPS) ミッションにPeregrine Ion Trap Mass Spectrometerを、CNSAの嫦娥6号にNegative Ions at the Lunar Surface (NILS)を提供しました。嫦娥6号は2024年6月に月面に着陸しました。その他の搭載機器は、月の環境や資源を調査し、技術のリスク軽減を図る予定です。2026年のNASAのCLPSミッションでは、ESA初の小規模ISRU実験である、探査、商業利用、及び輸送のための資源観測及び現地調査パッケージ (PROSPECT) が搭載され、ドリル、試料ハンドリング装置、分光計2台などが含まれます。最初の月の全球測位衛星システム (GNSS) の受信機、レーザー測距実験機、及び放射線モニターが、通信 (電波) 中継衛星Lunar Pathfinder (ESA商業パートナーシップ) に搭載されます。表層分圧計 (EMS-L) は、ISROと国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA、日本) の月極域探査ミッション (LUPEX) に搭載され、月表面外気圏を測定します。将来のCLPS月面ミッションへのESAの貢献として、相対性理論の試験を行うMoonLIGHTリトロフレクター、LandCam-Xの誘導を活用した月内部の測定、航行、制御技術、超広帯域通信及び測位実証を行います。ESAのPRODEX (科学実験開発計画) を通じて、スイスは将来のCLPSミッションにレーザーアブレーションイオン化質量分析計を配置します。ESAの月面ランダーArgonautは、2031年までに1.5tの観測機器を月面に着陸させる能力があり、通信、ナビゲーションサービス及び科学研究をサポートします。



月面ランダーArgonaut。(概念図)。(ESA)

Italian Space Agency (ASI、イタリア) のOxygen Retrieval Asset by Carbothermal-reduction in Lunar Environment (ORACLE) ペイロードは、月のレゴリスから水と酸素を抽出するISRU技術の検証を行う予定です。イタリアはESAへの貢献国として、PROSPECTパッケージやMoonlight Pointing Actuators (MPAc) のリトロフレクターなどの科学機器の開発において重要な役割を果たしています。イタリアは、ESAのLunar Meteoroid Impact Observer (LUMIO) ミッションにおいて、主導的な役割を果たしています。NASAとASIのLunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE) は、Firefly Blue Ghost Mission 1 (BGM1) に搭載され、月面に配備・運用される予定です。ASIは、月面を地球や宇宙の観測に特化した特別な場所として、また、科学機器の開発及び試験のためのユニークな環境として活用する地球・月・火星プロジェクトに積極的に参加している国家的な共同体の一員でもあります。ASIは、将来のイニシアチブの検証と実施を支援するために、月面無人ミッションの模擬実験とコントロールセンターの開発も実施しています。ASIは、月の南極域のレゴリスに含まれる氷の検出を目的とする赤外分光計MoonISを、アラブ首長国連邦の月面探査ローバー「Rashid RX3」に提供する予定です。



ASIのORACLEの開発中に、実験室の凝集器に閉じ込められた月面表土模擬物質から抽出された水氷。(ASTRAチーム - ミラノ工科大学)

Indian Space Research Organisation (インド)

Indian Space Research Organisation (ISRO、インド) は、月周回軌道への探査機の投入、月面への軟着陸及び移動を含むエンドツーエンドの月探査ミッション能力を実証することを目的に、2019年にチャンドラヤーン2号を打ち上げました。ミッションは当初、1年間の予定でした。先進的な8つの観測機器を搭載した探査機は、軌道投入に成功し、科学実験を実施しました。しかし、ミッションは、ランダー (着陸機) とローバーの軟着陸に失敗しました。チャンドラヤーン3号ミッションは2023年8月に月の南極圏の高緯度域の軟着陸に成功し、インドは月面に軟着陸した4番目の国となり、南極域に軟着陸した最初の国となりました。着陸後、ローバーは着陸地点周辺を移動し、約100mを走行しました。ランダー、ローバー、及び推進モジュールに搭載された機器が、元素構成、熱物理的特性、プラズマ環境、及び月面地震活動に関するデータを収集しました。現在、ISROはJAXAとの共同プロジェクト月極域探査機 (LUPEX) の概念検討を実施しています。チャンドラヤーン4号は、月のサンプル回収ミッションで、これも現在研究段階にあります。



チャンドラヤーン3号のランダー (着陸機) (左) とローバー (右) の展開。(ISRO)

Japan Aerospace Exploration Agency (日本)

JAXAの小型月着陸実証機 (SLIM) は、2024年1月に月面着陸に成功しました。高度約50m付近で撮影された画像データの分析により、SLIMは着陸予定地点からの着陸精度100m以内という目標をはるかに上回る10m程の精度で着陸したことが確認されました。SLIMは特定の岩石の科学的な分光観測を実施し、これにより月の起源に関する重要なデータが明らかになる可能性があります。月の水資源を調査し、月面基地を建設するために月極域が適しているかを調査するISROとの協力ミッション、月極域探査機 (LUPEX) は、2025年度から2026年度に打上げ予定です。日本では、2020年代後半の打上げを目指して技術・科学実証用の小型月着陸機が計画されており、JAXAはアルテミス計画を含む有人月面ミッションの物資補給支援を行う中型月着陸機の検討を進めています。日本の自動車業界と協力して進められている有人と圧ローバーは、無人探査や科学研究の新たな機会を切り開きます。これらの月面活動を支えるために、日本はLunaNet構想に参画し、CPNTの機能を提供することで貢献します。



月面上のSLIM。(JAXA/タカラトミー/ソニーグループ(株)/同志社大学)

Korea AeroSpace Administration (韓国)

Korea Aerospace Research Institute (韓国) は2022年8月に韓国の月探査への最初の一步となる Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLRO) 正式名称「Danuri」を打ち上げました。KPLROは月の高度約100kmの高度を周回しており、米国製のShadowCamなど一連の機器を搭載し、月極域の極地の永久影地域の高解像度画像を取得しています。KPLROの主な目的は、月探査のための重要技術の開発及び検証の実施、将来の着陸ミッションに向けた月の科学的調査及び地形図作成です。韓国天文研究院は、NASAのCLPSプログラムの一環として、月面の高エネルギー粒子を測定するLunar Surface Environment Monitor (LUSEM) を提供しました。韓国はさらに月面の科学調査を行うために、月面車放射線線量計、月面磁力計、及び月面微小構造カメラも開発しています。KASAの2回目の月面ミッションは、2032年に打上げが予定されている無人探査機による月面着陸です。このミッションは、月面での安全かつ正確な着陸と移動能力を実証し、科学機器を搭載します。



Danuri – Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLRO) (KASA)

National Aeronautics and Space Administration (米国)

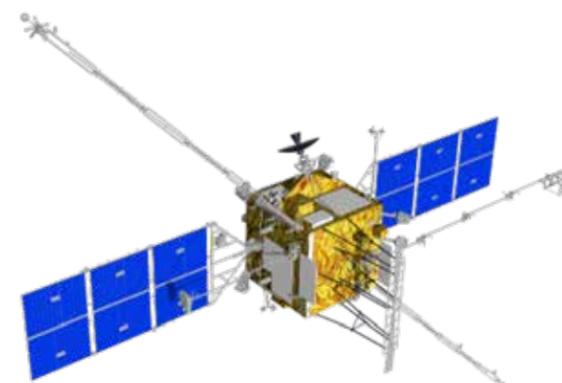
2022年に打ち上げられた月探査機CAPSTONEは、月周回有人拠点(ゲートウェイ)の先導役を務め、通信技術の検証と月周回楕円軌道の確認を行っています。NASAは、民間企業による月面へのペイロード輸送を調達し、低コストの商業月面ペイロード輸送サービスの開発を促進するために、商業月面ペイロードサービス (CLPS) プログラムを開発しました。CLPSには現在民間企業14社が含まれ、NASAが月面への輸送要求を発表した場合に、これらの民間企業は競争に参加することができます。初期のCLPSミッションは、科学実験、技術試験を実施し、NASAの月探査及び有人ミッションの準備を支援する技術を実証します。CLPSミッションは、NASA、大学、民間企業、その他の米国政府機関、及び国際宇宙機関からのさまざまなペイロードを輸送します。NASAは、月極域及び月極域以外の場所への輸送契約を締結し、月面への輸送は年間約2回のペースで行われる予定です。2024年2月、Intuitive Machines社による最初のCLPSミッション、Intuitive Machines (IM-1)が月面着陸に成功しました。2024年のCLPSミッションでは、月の南極域で水やその他の揮発性物質を探すため、月面での初のISRU実証であるPolar Resources Ice Mining Experiment 1 (PRIME-1)が着陸する予定です。NASAは、CLPSミッションを通じて月の商業通信及びナビゲーションサービスの提供を開始する準備も進めています。



2024年2月に打ち上げられた Intuitive Machines 1 (IM-1)は、初めて、月面着陸に成功した CLPSミッションです。(NASA)

Roscosmos

月着陸機Luna-25 (Luna-Glob-Lander) は、2023年に打ち上げられましたが着陸に失敗しました。Luna-26 (Luna-Resurs-Orbiter) の打上げは2027年に予定されています。この探査ミッションは、低高度の月極軌道(約50~100km)から月面を調査します。着陸機Luna-27(Luna-Resurs-Lander)の打上げは2028年に予定されています。Luna-28 (Luna-Resurs 2 または、Luna-Grunt-Rover)は、月から地球へ極域の揮発性物質を極低温で輸送するミッションで、2030年以降に打上げが予定されています。ロシアの製造企業及び研究機関は、月面探査ユーザー向けにナビゲーション及び通信サービスを提供するための先進的な方法及びシステムの研究開発を行っています。



Luna-26。(Roscosmos)

UAE及びUnited Arab Emirates Space Agency (アラブ首長国連邦)

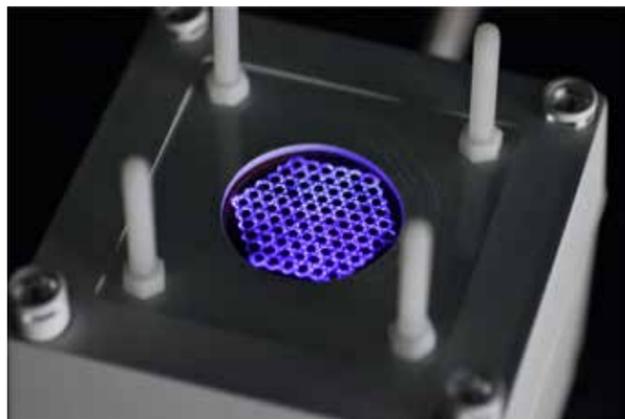
Emirates Lunar Missionは、Rashid 1、2、3を含む複数のローバーミッションのプログラムです。Rashid1のローバーは、Mohammed bin Rashid Space Centre (MBRSC、アラブ首長国連邦)によって開発され、国家の宇宙ロボット工学を発展させるプラットフォームとして主に使用された最初のローバーシリーズです。MBRSCの過去のミッションの経験を基づき、アラブ首長国連邦のエンジニアと科学者のチームが設計・製造したローバーは、2022年に打ち上げられましたが、着陸に失敗しました。Rashid 2は現在開発中です。



Rashid Rover 1。(UAE、ムハンマド・ビン・ラシード宇宙センター)

United Kingdom Space Agency (英国)

United Kingdom Space Agency (UKSA、英国) は、ESAの月面へのペイロード輸送を目的とする将来のランダーArgonautに大きく貢献しています。Argonautはアルテミスミッションのインフラ開発の支援が目的ですが、革新的な科学研究を実施するための重要なロボット技術も備えています。英国の機関は、月のレゴリスからの酸素生成やプラズマによる水浄化など、宇宙資源の最先端の研究も支援しています。英国は、NASA-ESAのPeregrine Ion-Trap Mass Spectrometerの重要なコンポーネントである外気圏質量分析計を開発し、さらにLunar Thermal Mapper (LTM)とレーザー測距装置をNASAのCLPSミッション及びその他の国際的なミッションに配置します。英国は宇宙空間における原子力電源にも技術支援を行い、ESAのEuropean Devices Using Radioisotope Energy (ENDURE)プログラムに貢献しています。このプログラムでは、ESAのRosalind Franklinローバー着陸機に搭載するRadioisotope Heater Unit (RHU)を製造し、ArgonautのEuropean Large Heat Sourceに取り組んでいます。



プラズマ水浄化装置。(サウサンプトン大学)

月面有人探査

ISECGは、人類が再び月へ戻ることを可能にする探査シナリオを作成しました。月探査ミッションは次第に複雑さを増し、月周回軌道と月面の両方で持続的な活動基盤を構築することを目指しています。有人月探査には、高度に訓練された宇宙飛行士とそれを支援するロボットシステムが必要になります。本章ですでに説明したように、無人ミッションは、有人ミッションの発展に貢献します。

月周回軌道

さまざまな探査目的をサポートする月の近傍軌道

無人・有人宇宙船の月軌道を選ぶ際、地球と月の重力間の軌道エネルギーのバランスを取ること、良好な通信と熱特性を維持することが重要な要素となります。月の周辺で最も有望な場所は、7日ごとに月面から数千km以内を通過する、地球と月の直線上にあるラグランジュ点の周りのハロー軌道群です。この月長楕円極軌道 (NRHO) 内の有人宇宙船には、次のようないくつかの利点があります。

再利用性

月の近傍は、月や火星を含む他の目的地の探査のための再利用可能な要素の準備や改良に最適な場所です。この場所は、地球の強い重力環境の外側に安定した軌道を持ち、再利用可能な無人・有人月面着陸システム、及び燃料補給や整備に便利な出発点となります。

試験

月の近傍環境は、長期間のミッション中に宇宙飛行士や宇宙船が深宇宙で経験する条件に類似していません。技術、推進システム、手順、及びリスク管理プロトコルを、緊急時に備えて比較的地球の近くで試験できます。例えば、火星への有人ミッションのための宇宙空間での能力をNRHOで試験し、飛行準備を確保します。

到達性

月の近傍は、既存の政府及び民間の打上げ輸送システムで到達可能であり、堅牢性、商業サービス、そして政府と民間セクター間の協力を促進します。

この軌道を活用した最初の探査システムの一つが、月周回有人拠点 (ゲートウェイ) です。



月周回有人拠点 ゲートウェイ (概念図)。(NASA)

月周回有人拠点（ゲートウェイ）

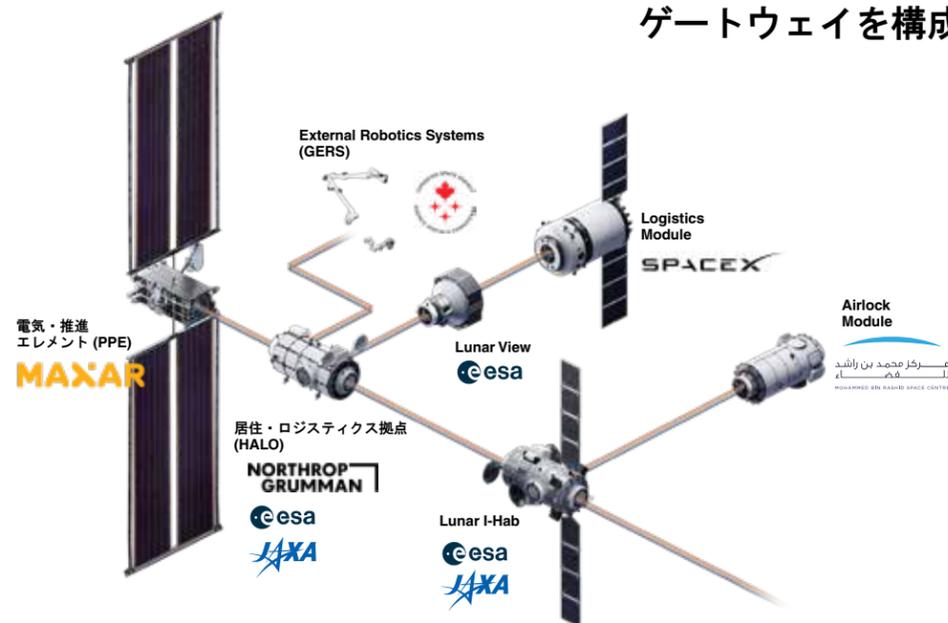
ゲートウェイの最初の構成要素は2028年に打ち上げられる予定です。ゲートウェイは、NASA、ESA、CSA、日本/JAXA及びUAEのMBRSCの貢献を通じて、NRHOに位置する居住可能なステーションとして建設されます。ゲートウェイは、地球のバン・アレン帯の保護圏外で運用や科学調査を行うための次世代深宇宙プラットフォームを提供します。国際的な科学コミュニティは、太陽物理学、放射線及び宇宙天気をゲートウェイにおける重点研究分野と位置付けています。

2018年の国際宇宙探査ロードマップの発表以来、ゲートウェイのコンセプトは発展し、高出力太陽光電力の電気・推進エレメント (PPE) と与圧された居住・ロジスティクス拠点 (HALO) が組み込まれ、最初のゲートウェイの打上げに統合されます。ESAとその加盟国は、ゲートウェイの月通信システム (Lunar Link) を補完する強化された通信ストリングや、日本/JAXAの協力による国際居住棟 (Lunar I-Hab) を開発しています。これにより、ゲートウェイの居住能力とドッキングポートの数が増加し、さらに燃料補給システム及び視認機能 (LunarView) も開発されます。日本のJAXAは、物資補給能力も提供します。ゲートウェイは、MBRSCが提供するエアロックと、CSAが提供する

External Robotics Systems (GERS) の外部ロボットアーム (Canadarm3) を運用する居住機能を備えます。ゲートウェイは、地球と月面の通信を可能にし、月の裏側及び極域の探査に新たな機会を拓きます。

ゲートウェイのクルーは、科学実験を行い、将来のミッションのために居住機能の評価を行い、深宇宙環境で試験が必要な探査技術を調査します。官民連携を通じて、民間団体もゲートウェイを活用することができます。クルーが滞在していない期間中、ゲートウェイは地上から運用され、科学やその他の活動をサポートし、月面ミッションに不可欠な支援を提供し続けます。

ゲートウェイを構成する宇宙機



月面への有人ミッション

軌道上施設を通じた月探査は科学的に非常に価値がありますが、ISECG加盟機関のほとんどが、月面拠点による月探査と、国際協力及び商業参加を通じた長期的かつ持続的な月面探査ミッションの実施に取り組んでいます。



月面に科学計器を配備する宇宙飛行士 (概念図)。(NASA)

National Aeronautics and Space Administration (米国)

2022年にNASAは、米国の産業界、学術界、国際的な宇宙機関、及び内部の職員からの意見を取り入れて、月から火星への目標を設定しました。NASAのMoon to Mars Architectureは毎年更新され、これらの目標を達成するためのロードマップとして機能し、月面への帰還と火星探査に必要な技術や能力を特定しています。

探査計画における最初のステップはアルテミス計画であり、これにより月への有人ミッションを長期的かつ持続可能な方法で実施し、将来の火星有人ミッションに向けて必要なシステムやオペレーションを試験します。アルテミスIIは、月の遠月逆行軌道における無人ミッションで、2022年11月に打ち上げられました。次の有人月周回ミッションアルテミスIIIは、2025年以降に計画されています。NASAの目標は、2026年に予定されているアルテミスIIIを皮切りに、月面への有人ミッションを実現することです。これにより、10年後には持続的な月面探査の実施を目指しています。

多くの国際的なパートナーシップがNASAのアルテミスミッションを支援することが期待されています。ESAは、Orion宇宙船の動力となる欧州サービスモジュール (ESM) を提供しています。ESM1はアルテミスIミッションのOrionカプセルに使用し、ESM2はアルテミスIIIに供給され、ESM3はアルテミスIIIに向けて輸送準備が整っています。また、さらに6つのESMが開発中または計画されています。ゲートウェイには、ESA、CSA、JAXA、及びMBRSCが国際的に参加しています。NASAは、その国際的なパートナーシップを月面にも拡大しています。2024年4月、NASAと日本は協定を締結し、日本は月面に与圧ローバーを提供することが約束されました。NASAは、月の周辺や月面での協力に関して、複数の機関と議論を行っています。

European Space Agency (欧州)

ESAは、加盟国の宇宙機関として、宇宙探査活動及びプログラムを開発・実施し、関連インフラを運用しています。ESA European Explore 2040 Strategy (2024)は、ESAが月面探査活動の特定分野で戦略的自律性を発揮するとともに、国際的なパートナーシップを強化する指針となっています。月面ランダーArgonautは、複数の欧州の宇宙機関の貢献を受け、欧州の月面科学及び技術実証を可能にし、国際的な有人ミッションのための物資補給及びインフラ展開を支援しています。ESAは2031年にArgonautに搭載する主要のペイロードとして、月面通信、着陸精度向上のためのPNT、越夜（クルーへの電力供給など）のための基本インフラであるArgonetの研究を進めています。Argonetのインフラは、少なくとも5年間の運用寿命があり、月周回軌道上のMoonlight Initiative及び月周回有人拠点（ゲートウェイ）のLunar Linkの通信及びナビゲーション機能を補完・強化します。

ESAは、ESM及びゲートウェイを通じて、NASAのMoon to Mars Architectureに不可欠な能力を提供しています。ESAは、月面ランダーArgonautの開発を進め、さらに重要な輸送能力として、より大きな着陸能力やゲートウェイからのサンプルリターンなど、さらなる重要な輸送能力を研究しています。

ASIは、ESAを通じて月面探査を支援し、いくつかのイタリア企業が欧州の探査戦略の重要な技術、能力、及び要素に取り組んでいます。ASIは、将来の有人探査計画を支援するための多目的居住モジュールの設計も主導しています。

Canadian Space Agency (カナダ)

2021年、CSAは月面探査イニシアチブを開始しました。カナダが月面での持続可能な有人滞在を支援するためにできる主要なインフラ投資を特定することに重点を置いています。そして、カナダの宇宙飛行士を農業と食料、ローバーとロボット工学、発電と配電、通信、探掘（リモートセンシング、地表探査、資源のその場利用（ISRU）などの月面探査に参加させます。CSAのHealth Beyond InitiativeとFood Production Initiativeは、それぞれ深宇宙での医療技術と食糧技術の研究を行っています。CSAは、月面での物資補給、クルーの運用、科学調査を支援するLunar utility vehicleも開発し、貢献します。



Lunar utility vehicle (概念図)。(CSA)

Japan Aerospace Exploration Agency (日本)

2020年6月、日本は宇宙基本計画を改訂しました。その中で、日本はゲートウェイへの居住技術と物資補給能力の提供を通じてアルテミス計画を支援し、月面での輸送手段の提供を通じて有人月面探査に貢献することが記されました。JAXAは、日本の自動車業界と協力して、有人と圧ローバーの研究開発を進めています。このローバーは、有人・無人ミッションの探査範囲を劇的に拡大し、科学研究の柔軟性を高めるものです。2023年に更新された宇宙基本計画で、日本はアルテミス計画を含む国際的な宇宙探査の重要性を強調しました。日本政府の宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）の下、JAXAは長期的な月面探査の実現に向けて、高精度着陸技術などの重要な月通信・測位技術を開発しています。



有人と圧ローバー (概念図)。(TOYOTA)

Indian Space Research Organisation (インド)

インドは、チャンドラヤーン3号のランダー（着陸機）及びローバーの月面着陸に成功した後、2040年までにインドの宇宙飛行士を月面に着陸させる目標を発表しました。



月面を探索する宇宙飛行士 (概念図)。(ISRO)

China National Space Administration (中国)

CNSAは、ILRSの基本モデルの建設を2035年頃に、拡張モデルを2045年頃に完成させる予定で、これは長期的な自律運用と短期的な有人参加を伴います。



ILRS (概念図)。(CNSA)

火星無人探査ミッション

無人探査ミッションは、火星の地質学的歴史、気候、及び過去・現在の生命の可能性に関する科学的な疑問に答えるためのデータを収集します。無人探査ミッションは、将来の有人探査に向けた準備として、環境条件を評価することもできます。無人探査機は向上し続けており、より多くのミッションが火星のさまざまな場所に訪れることができます。従来型のミッションモデル（大型オービターやローバーなど）と新たなミッションモデル（飛行機器、ネットワーク型ミッション、キューブサットなど）は、火星の科学調査と探査において重要な役割を果たします。

無人探査計画は、潜在的な資源やリスクを特定するために先行調査を行ない、また、宇宙飛行士が直面するコストや危険を軽減するために機材や補給品を事前に配備する役割も果たします。人類が火星に進出する前に、火星の表面、地下、及び大気のマッピングと特性の評価を行うことは、惑星保護のために不可欠です。これにより、地球由来の生体物質による資源の損傷や汚染を避け、火星の物質（生物学・地質学的物質）が宇宙飛行士や地球環境に及ぼす危険を最小限に抑え

ることができます。慎重に選別され、採取された火星サンプルの回収は最優先事項であり、科学者は地球上の実験室の非常に優れた能力を活用して分析を行い、将来の探査の目標、戦略、及び技術に関する情報を得ます。

現在、LEOでの長期滞在有人宇宙飛行ミッションでは、必要なものをすべて地球から持ち込まなければなりません。ただし、有人火星ミッションは、最終的には既存の現地資源に依存する可能性があります（ISRUなどにより）。例えば水などの資源は、宇宙飛行士による利用及び推進剤生成のために処理されることが考えられます。現地の無人探査によって感知、マッピング、収集されたサンプル及び軌道からの測定値は、潜在的な資源の位置を検討する上で役立つ可能性があります。資源の特定は、宇宙飛行士がそれらにアクセスし、利用する為に適切な方法や技術の開発及び試験を促進します。回収したサンプルは、実施可能な模擬実験や開発施設の準備にとって不可欠です。



太陽系で知られている中で最大の衝突盆地である火星のユートピア平原。この領域では霜の形成が観測されています。(ESA/TGO/CaSSIS)

第6章

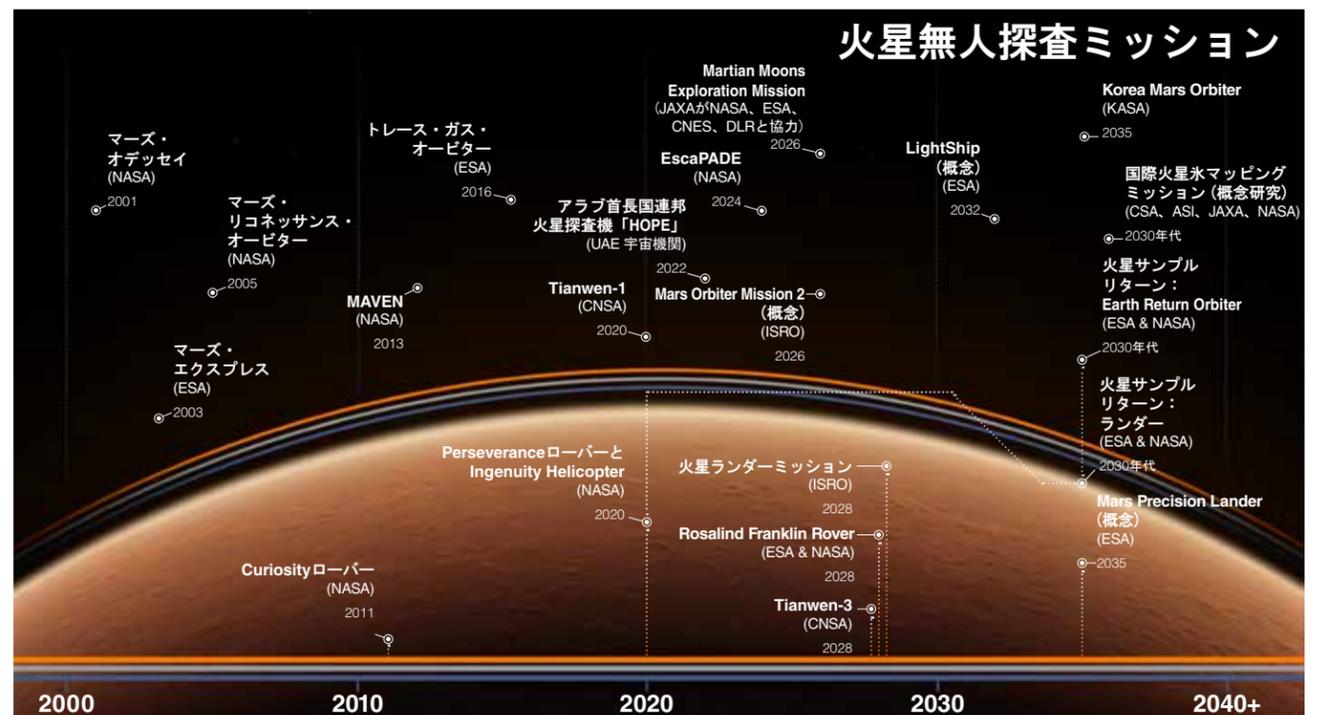
火星

地球から最も近い惑星の一つである火星は、生命の痕跡調査をはじめ、火星の表面、内部、大気及び気候のプロセスの研究、さらに軌道上及び火星の表面に人類の存在を段階的に確立する機会など、さまざまな科学的探査の可能性をもたらしています。火星は、ますます野心的となる無人・有人探査ミッションの焦点であり、世界中の多くの宇宙機関にとって依然として将来目標となっています。

火星科学の目標

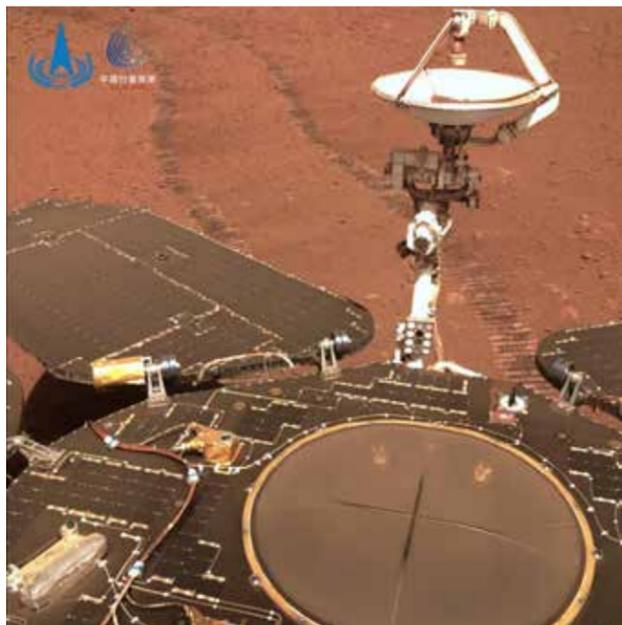
火星ミッションを通じて火星自体だけでなく、基本的な惑星のプロセス、気候統計、地球外生命の可能性、人間の身体的及び社会的健康についても学ぶことができます。火星は、比較惑星学を通じて、太陽系内外の岩石天体の形成について学ぶ上で役立ちます。かつて火星はより温暖で、液体の水が表面を流れ、より厚い大気が居住可能な環境を創り出していたという証拠があります。しかし、火星は劇的な気候変動を経験し、その結果、現在、火星の表面は冷たく、乾燥しており、生命にとって住みにくい環境になっています。地上の火星模擬環境での研究と訓練は、科学者が火星と地球の類似点と相違点を理解する上で役立つ上、また、火星の他の科学調査の機会を最大限に活用する上で役立ちます。火星における水の歴史、鉱物学、そして有機化学の調査は、生命がどのように誕生し、生存した可能性があるかを発見する上で役立つ可能性があります。さらに、惑星地質学は火星の歴史に関する手がかりを得るために、岩石、堆積物、土壌を調査します。火山、隕石及び彗星の衝突によるクレー

ター、大気または光化学影響の兆候、そして地形学的及び地球物理学のプロセスはすべて、火星の歴史の一面を捉えています。火星の大気のサンプルは、その形成と進化に関する重要な詳細を明らかにする可能性があります。これらの目的やその他多くの科学的目標は、今後数十年にわたる有人・無人探査の最優先課題となります。



注記：縮尺は正確なものではありません。図内の位置は着陸場所を示すものではありません。

無人・有人探査ミッションは、共通のインフラ要素や機能を備えた相互運用可能なシステムとサービスの恩恵を受けます。技術開発は、次世代のミッションを実現するための鍵となります。例えば、相互運用可能な火星近接通信及びナビゲーションサービスのインフラは、いくつかのミッションにおいて地球への直接的な通信依存を軽減し、科学探査機がより多くの質量を、ペイロードに割くことが可能となります。ペイロード搭載能力や輸送能力を備えた高効率な推進技術（電気推進など）により、幅広い参加者（国際機関、商業、アカデミア）の様々な低コストミッションコンセプトにより火星へのアクセスが拡大する可能性があります。最終的には、火星表面への確実なアクセスには、確実かつ正確な突入、降下、着陸能力が必要です。将来のミッションでは、さまざまな場所・地形に対して、重質量の物体を正確に着陸させる必要があります。



Tianwen-1 landerから見た火星表面のZhurong rover。(CNSA)



ESAのLightShipコンセプト:通信及びナビゲーションサービスや科学ペイロードを含む、地球帰還オービターの技術を基に構築された火星推進牽引機能。LightShipは、複数の科学的な有人オービターも火星に運びます。(ESA)



インジェニイティヘリコプターで自撮り写真撮影をするNASAのPerseveranceローバー。(NASA/JPL)

有人火星探査

火星への有人ミッションは、科学的及び探査活動の範囲を広げ、世界中にインスピレーションを与えることとなります。地球-月空間及び月面での持続的な有人探査の確立はLEO以遠の探査要素の検証を含め、火星への有人ミッションに必要な能力を開発するための基盤となります。しかしながら、火星への往復にかかる距離と時間は月面より桁違いに大きく、ミッションの複雑さを劇的に増加させています。



有人火星探査(概念図)。(NASA)

有人火星探査能力

火星への有人ミッションには、ISECG参加機関がいくつかの重要な能力を開発し、検証することが求められます。

- » 火星への有人ミッションに先立ち軌道上および着陸機による着陸候補地の特性評価を行い、場所の選定、科学ターゲットの評価、高解像度のセンシングを行うことで、精密着陸やミッション要素の開発・実施を支援します。
- » 地表無人探査による有人着陸地点の偵察により、地表と環境の状態を特徴付け、潜在的な資源を特定します。これにより、過酷な環境(放射線など)からの保護に必要な適切な技術を定義し、開発することができます。環境へのより深い理解は、現地気候モデルの作成、科学調査のための基準測定値の設定、そして惑星保護対策にも役立ちます。
- » 宇宙飛行士が火星への往復飛行中及び火星表面で、緊急事態の計画を含め、効果的かつ自律的に作業できるようにする居住施設、ツール及びシステム。
- » 突入、降下、高精度着陸及び地表から軌道への上昇のための有人宇宙船。次第に重量を増すペイロードを火星表面の特定の場所に正確に無人輸送し、貨物及びインフラ要素の配備を可能にすること
- » によって、有人地表探査ミッションをサポートします。
- » クルールの探査活動をサポート及び強化するための機能とインフラ(計測機器・ツール、サンプル処理、ロボット機器、ISRUなど)。
- » ロボットによる点検・メンテナンスシステム。
- » 長期的な深宇宙ミッションのための放射線影響緩和。
- » 長期的生命維持を含む、クルーの身体的及び精神的健康のサポート。
- » 軌道及び地上通信ならびにナビゲーションサービス。
- » 発電と配電。

サンプルリターンと惑星保護

火星の表面、地下、衛星及び大気から慎重に選ばれたサンプルを地球に持ち帰ることは、世界の惑星科学コミュニティにとって最優先事項です。帰還したサンプルは、地上の研究室で利用可能な様々なツールと技術を適用することができるため、その場での分析だけでは困難または不可能な研究が可能になります。これには、生命の痕跡の特定など、10年規模の調査やその他の惑星科学戦略で識別された主要な目標への取り組みも含まれます。さらに、無人ミッションによって帰還したサンプルは、火星の土壌や塵に関連する潜在的な健康リスクに関する情報を提供し、その後の有人ミッションのための適切な緩和技術の開発に役立つ可能性があります。固体サンプルと共に回収され、帰還することが期待される大気サンプルも、重要な情報をもたらします。

現在、2020年代と2030年代に地球にサンプルを帰還させるためのいくつかの無人サンプルリターンミッションが開発されています。JAXAが主導し、German Aerospace Centre (DLR、ドイツ)、National Centre for Space Studies (CNES、フランス)、NASA及びESAが協力する火星衛星探査計画は、火星の衛星フォボスからサンプルを回収し、火星の衛星の起源と原始太陽系における有機物・水の移動を調査する予定です。ESAとNASAの火星サンプルリターン計画は、Perseveranceローバーが回収したサンプルを地球に持ち帰るため、着陸、離脱、地球帰還

という要素の組み合わせで構成されています。中国の天問3号ミッションは、離着機と地球帰還のための宇宙機で構成されています。後続の有人ミッションでは、地表で訓練を受けたクルーが選定したさまざまな地点で、より広範囲なサンプル採取を行う機会が得られ、地下採掘や人間とロボットの協調システムなど、より精密なサンプル回収方法が使用される可能性もあります。

火星に生命が存在する可能性を考慮して、火星表面へのすべてのミッションは、生命の探索そのものを危険にさらす可能性があるあらゆる前方汚染（過去のミッションで地球から移動した生物の検出による「偽陽性」など）を回避するために、惑星保護に取り組む必要があります。無人サンプルリターンミッションや火星表面での有人ミッションでも、地球への逆汚染を防ぐための適切な対策が必要です。

火星の長期的目標

有人火星ミッションのリスクと課題を完全に把握し、軽減するには、広範な研究と段階的専門技術及び能力開発が必要です。火星探査ミッションは、地球から地球低軌道、月、火星、さらにその先へと拡大し、共通の技術と能力をすべての目的地で最大限に活用する継続的な有人探査の一環です。私たちが月で学ぶ教訓や開発する技術により、火星やその先へと進むことができるようになります。



第7章

太陽系のその他の目的地

現在の宇宙探査プログラムでは月と火星の探査に重点を置いています。太陽系の他の目的地への無人探査に対する国際的な関心はかつてないほど高まっています。無人探査ミッションは、現在までに太陽系のすべての惑星、太陽、小惑星、彗星、その他の小天体、衛星、準惑星の冥王星、その他のカイパーベルト天体群を訪れています。現時点では人類を月や火星を超えて送り込む具体的な計画はないものの、これらの無人探査ミッションは、宇宙における私たちの位置づけに関する理解を形成する素晴らしい科学研究を行っています。





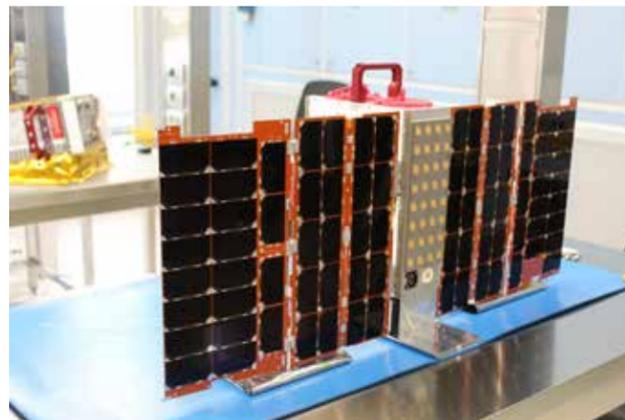
カナダアーム2のロボットアームに乗り、伸展式の太陽電池パネルを国際宇宙ステーションのトラス構造に向けて操作する、NASAの宇宙飛行士で第68次長期滞在ミッションのフライトエンジニア、ウッディ・ホーバーク。(NASA)

これらのミッションは科学以外の目的も達成しています。すなわち、多くの小惑星ミッションは惑星保護の向上に焦点を当てておりますが、他のミッションは技術実証に関連する目的を実現して月や火星、そしてその先への将来の有人ミッションに情報を提供し、前進させるのに役立っています。2023年のOSIRIS-RExミッションによるベヌスからの小惑星サンプルの回収など、これらのミッションが達成している偉業は、世界中の人々の想像力をかき立てています。

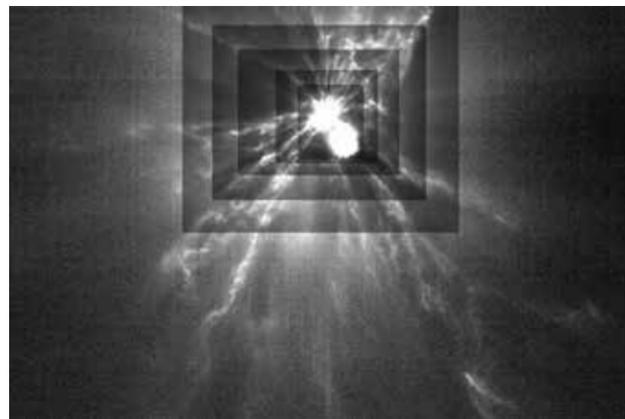
び新興国宇宙機関が月および火星以遠の探査に貢献できる機会がますます多様化していることを示しています。

これらや、将来の他の無人惑星探査ミッションは、画期的な科学的調査を実施し続け、月、火星、さらにその先への将来の有人探査ミッションへの備えとなります。

これまで、月と火星以外の目的地への宇宙探査ミッションは、より確立された宇宙機関によって主導されてきました。例えばNASAはよく知られたディスカバリー計画、ニューフロンティア計画、フラッグシップの各プログラムを運用しており、太陽系のさまざまな目的地に探査機を飛ばしてきました。



現在、他の機関も深宇宙探査ミッションを計画しており、例えば、CNSAのTianwen-2 asteroid sample return missionや木星(カリスト)及び天王星へのTianwen-4 mission、太陽を調査するISROのADITYA-L1ミッションや計画中の金星ミッション(現在は概念研究段階)、水が豊富な小惑星の起源と進化を研究し、小惑星資源の可能性を評価し、将来の小惑星資源利用に備えるためのUnited Arab Emirates Space Agency (UAESA、アラブ首長国連邦)のEmirates Mission (EMA) などがあります。科学者(共同研究者など)もミッションに独自のペイロード(観測機器)を提供することができ、小規模な機関が深宇宙探査に積極的に参加できるようになっています。NASAとESA共同のCassini-Huygens missionなど、先行事例はいくつか存在しますが、近年ではより小規模な機関の深宇宙探査への関与が進化しており、より大規模な貢献のさまざまな事例がみられます。



LICIACubeマイクロサット(上)と、DARTが衝突したばかりの小惑星ディディモス及びディモルフォス(下)。(ASI/NASA/Argotec/APL)

各宇宙機関は、他国が主導するミッションへの観測機器の提供だけでなく、ミッションを構成するその他要素や、宇宙機にも貢献しています。例としては、ESA主導の水星探査ミッションBepiColombo (ESAとJAXAのそれぞれのオービターを搭載)、NASAのDouble Asteroid Redirect Test (DART) (ASIが開発した6U LICIACube自律型マイクロサットを搭載し、DARTが小惑星ディモルフォスに衝突した後に放出された噴出物プルームを撮影)、CNES及びDLRが提供するIDEX Phobos roverなどが挙げられます。これらや、他の進行中の協力活動は、既存及

第8章

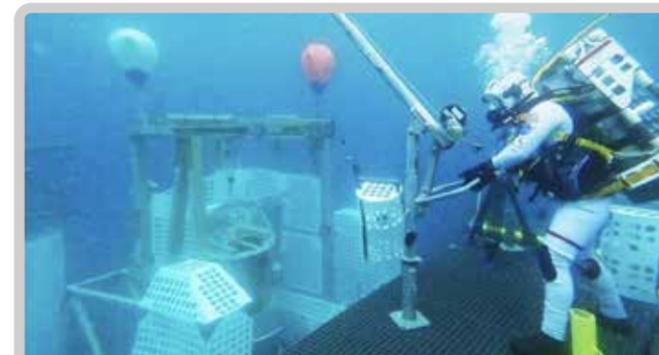
宇宙探査のための技術

前の章で概説した探査目標を達成するには、技術的な準備と能力の構築が不可欠です。将来のミッションでは、地球低軌道(LEO)、月、火星、さらにその先を探索するための信頼性が高い効率的な技術が必要になります。新しい打上げシステムから深宇宙における宇宙飛行士の居住モジュールまで、それぞれの開発が私たちの探査の野望を実現する能力を高め、また構築しています。各宇宙機関はこれらの技術を開発し実証するために協力する必要があります。また、技術開発プロセスの効果を最大化するために、総力を挙げてリソースを活用する必要があります。これは、能力をより巧みに向上させるだけでなく、共同の計画を強化する相乗効果を促進するアプローチです。重要技術リストは、指針となる枠組みとしての役割を果たします。このリストは、活動の方向性を示すロードマップを提供し、開発上の課題を特定するのに役立ちます。さらに、ISECGに参加機関が協力し、探査の推進という共通の目標に向けて取り組むことを支援します。

Analogとは、ISECG加盟機関にとって関心のある目的地または環境模擬設定を指します。これらは、自然界に存在する地上の場所から、人工的に構築された環境およびカスタマイズされた仮想設定まで、多岐にわたる設定、対象を模擬しています。Analogは、技術開発プロセスにおいて貴重なツールです。

海洋での訓練： Space Environment Analog for Training, Engineering, Science, and Technology (SEATEST)

NASAのSEATEST6のようなミッションは、南カリフォルニア大学のリグリー海洋科学センターで実施され、自然界に存在する水中環境を活用し、月や火星といった部分重力環境をシミュレートしています。クルーは、開発されたツール、機器、技術、輸送船のプロトタイプや、それらの運用コンセプトを試験することができます。



SEATEST 6で月面におけるEVAクルー支援として物質補給の作業試験方法。(NASA)

重要技術リスト

ISECGは、最先端技術と、近い将来の月面活動及び将来の火星ミッションの両方に必要な技術との間のギャップを特定しています。重要技術リストは、継続的な分析と更新を経ることによって、重要な技術ギャップを埋め、これらの技術に取り組む機関間の連携を促進することに重点を置いて、最新の探査ロードマップとの整合性を確保しています。

このリストは、重要なテクノロジーニーズを8つの主要分野に分類しています。

- ▶ 推進、着陸、帰還
- ▶ 自律システム
- ▶ 生命維持と居住性
- ▶ クルーの健康とパフォーマンス
- ▶ 通信と測位・ナビゲーション・時刻情報
- ▶ 電力
- ▶ 横断的技術
- ▶ 船外活動 (EVA)、移動、ロボット工学

国際宇宙探査ロードマップ 重要技術 (概要表)

推進、着陸、帰還
液体酸素/液体メタン/極低温推進システム
電気推進及び電力処理
核熱推進 (NTP) エンジン
宇宙空間での極低温流体管理及び移送
宇宙空間での極低温推進剤貯蔵 (ゼロボイルオフ液体酸素低減/ゼロボイルオフ液体酸素)
核電気推進 (NEP) 用マルチメガワット級電力
危険回避しながらの高精度着陸
大型ペイロード用の火星EDLテクノロジー
耐久性のある溶解熱シールド (月面帰還を超えて)・熱保護システム
自律システム
宇宙服を着たクルーと協調して作業するロボット
自律型機体システム管理
自動型/自律型ランデブー及びドッキング
自律運用のための宇宙空間での時刻とナビゲーション
地球低軌道 (LEO) 外でのミッション管理自動化
自律的な居住システム
生命維持と居住性
閉鎖型生命維持システム
高信頼性の生命維持システム
船内の環境モニタリング
火災予防、検知、消火
地球低軌道 (LEO) 外でのミッション管理の自動化
自律的な地表居住システム

現在 ISS & 宇宙飛行の遺産

DART (2022) 3.5 kW NEXTグリッド式イオンスラスタ
地球軌道実証 (DRACO) 開発中
火星2020レーダー高度計、光学TRN
火星2020クラス: LOFTID 6m実証試験
オリオン熱シールドテスト飛行 (アルテミスII)
ISSのアストロビー、EVAへの限定的サポート
ISS: 限定的な機上管理機能 (5秒未満の通信遅延)
ISS: 自律ドッキング
ISS: GPS範囲に限定 / 宇宙船: DSN測距
ISS: 限定的な自律性
ISS: 軌道上修理システムの実証
ISS: 二酸化炭素から42%の酸素回収、90%の水回収
ISS: MTBF <10 ⁶ 、地上管制による監視/操作
ISS船内空気雰囲気モニタリング (ANITAなど)
難燃性物質、CO2消火器。軌道上での火災安全実験 (シグナスでの Saffireなど)
科学実験 (例: Veggie、ISSでの小規模実証を含む地上での生体再生実験)
ISS: 地球によって部分的に保護されているアポロ: (許容リスク)

近い将来 月 近傍/月面

着陸用の出力可変式再生冷却エンジン
月周回有人拠点 (ゲートウェイ) 用12kWスラスタ
推進系移送用非蒸発微小重力液体タンク数ヶ月分の低出力液体酸素及び酸素貯蔵
推進剤保管用システム、ISRUの物資
約100mの精度、数十センチメートルの障害物認識、あらゆる照明条件に対応可能
アルテミスIIによる月帰還の生存実証
遠隔操作及び自律型ロボットによるアルテミスミッションのクルーを支援
機上システム管理機能 (5秒以上の通信遅延に対応)
高い信頼性、あらゆる照明条件に対応、相対速度ゼロでの停留
ISS: 深宇宙環境での先進技術の実証
クルーの監視下で行われる大部分が自律的な通常オペレーション
居住時及び非居住時における完全性を維持するための自動化機能を含む自律型地上居住システム
深宇宙環境での先進技術の実証
より堅牢で信頼性の高いコンポーネント (地球からの供給依存を排除)、システムの自律性・故障検出機能・飛行中修理能力の向上
空気、水、汚染物質の軌道上分析
現在の解決策のパフォーマンス、適応性、持続可能性を向上させ、要素アーキテクチャ全体にわたる共通の火災安全戦略を実現
長期滞在ミッションのクルーの糧食量の現地生産食品による補充が必要
高度な検出及び遮蔽技術/新しい生物医学的対策

将来 火星 近傍/火星面

着陸用の出力可変式再生冷却エンジン
1スラスタ当たり約30~50 kW (いくつかのミッションオプションの場合)
高速往復 (2.5年未満) を実現する高比推力 (Isp) システム
推進系移送用非蒸発微小重力液体タンク
効率的な上昇推進、効率的な低電力液体酸素及び水素貯蔵 (1年以上) をサポートするシステム
大型無人機 > 5,000 kg; 有人機約40,000 kg相当
直接/軌道ランデブーアプローチによって定義される再突入環境
初期の火星宇宙飛行士が制御するロボットシステムによる探査及びメンテナンスの支援
機上システム管理機能 (40分以上の通信遅延を処理)
高性能な絶対及び相対測位、最先端技術の10倍を超える宇宙対応時計を提供
自律的な通常オペレーション、クルー管理用の例外報告
酸素/二酸化炭素ループの閉鎖、水回収とさらなる閉鎖、固形廃棄物の容積/貯蔵量の削減
高度な検出及び遮蔽技術/新しい生物医学的対策

国際宇宙探査ロードマップ 重要技術 (概要表)

クルーの健康とパフォーマンス
LEO以遠でのクルーの自律性
長期宇宙飛行医療
長期宇宙飛行での行動の健全性とパフォーマンス
深宇宙ミッションのヒューマンファクター
LEO以遠でのミッション管理の自動化
生鮮食品の栄養、品質、及び保存
コミュニケーションとPNT
地球へのダウンリンクのための光通信
高データレート送信リンク (フライト) 通信
月面及び火星表面ネットワーク用の無線LANと3GPP
完全網羅された高速通信及び遅延耐性ネットワーク (DTN)
月近傍及び以遠での測位・ナビゲーション・時刻情報 (PNT) サービス
電力
大規模、柔軟かつ展開可能な地表設置型太陽電池
展開可能な高出力宇宙空間アレイ
地表ミッション用の原子力発電
高エネルギー密度燃料電池
低温及び長寿命バッテリー
放射線耐性の電力制御及び配電
横断的技術
現地資源利用 (ISRU)
粉塵の軽減
膨張式モジュール用の膨張構造及び材料
低温メカニズム
熱管理
EVA、移動性、ロボット工学
深宇宙宇宙服
地表用宇宙服
迅速に実施可能な船外活動 (EVA)
地表での移動能力と探査
時間遅延時に部分的自律可能ロボットの遠隔ロボット制御

現在 ISS & 宇宙飛行の遺産

部分的自律性
遠隔医療システム
地上チームによる観察
ISS: 大型トレッドミル、その他の運動器具
ISS: 大型クルー収容スペース、食品及び消耗品の定期補給
食品及び消耗品の保存
地上 (DSN) : 10Mbps送信リンク
地上 (DSN) : 256kbs送信リンク
部分的機能
DTN実証
GPS範囲に制限、宇宙船: DSN測距
火星フェニックス太陽電池
IROSAアレイ構造、DART反転・変形型 (IMM) 太陽電池、反射集光器
火星探査車「パーシビアランス」MMRTG
スペースシャトル: 12kW KOH燃料電池
ISS: リチウムイオン、低温での限られた寿命
火星の二酸化炭素大気から酸素を生成する技術、例: MOXIE
アポロ計画: 3日間限定のクルー運用ローバー: 部分的軽減
ISS: ビグロウ膨張式活動モジュール (BEAM)
ISS: +121~-157°C
ISS: 火星装備
ISS: 0.3 bar (4.3 Psid) での船外活動
アポロ: 最長3日間 (月)
宇宙船: 月面及び火星探査車の最先端技術
ISS: 地上制御操作の遅延は1~10秒未満/宇宙船: 月面/火星探査車

近い将来 月 近傍/月面

リアルタイムな意思決定支援
予後、診断、緊急事態管理のための医療機器、モジュール健康データ、即時対応の医療訓練
人間のパフォーマンスと心理的健康を観察するための高度な技術
深宇宙環境の悪影響に対抗するプロトコルとデバイス
運用中及び不測の事態での認知負荷の軽減の最適化されたヒューマンシステムインターフェース
生鮮食品の栄養安定性を長期間維持
月面近傍から地球へのダウンリンクにおける光通信 (ミッションデータ、音声、HDTVの送信)
ミッションコマンドデータと音声と地球から月近傍へ伝送する高データレート送信リンク
インターネットやモバイル通信などの地上技術を月面活動に適用
複数の設備に対して、月と陸域すべてをカバーする完全な高速月面通信及びDTN
知見を得るための幾何学的多様性、局所的な動態、同時観測を可能にする月のナビゲーションシステム
高効率展開型アレイ、極地用の堅牢な垂直タワー (10~100kWクラス)
宇宙船への高効率サポート
火星探査に向けた潜在的なテストベッド、及び月面ミッションの強化
高比エネルギー、メンテナンス不要、低温
月夜間の温度と期間
広範囲な領域での継続的な探査をサポートする信頼性の高い、環境耐性に優れた技術
火星の二酸化炭素大気から酸素を生成する技術、例: MOXIE
アポロ計画: 3日間限定のクルー運用ローバー: 部分的軽減
ISS: ビグロウ膨張式活動モジュール (BEAM)
ISS: +121~-157°C
ISS: 火星装備
ISS: 0.3 bar (4.3 Psid) での船外活動
アポロ: 最長3日間 (月)
宇宙船: 月面及び火星探査車の最先端技術
ISS: 地上制御操作の遅延は1~10秒未満/宇宙船: 月面/火星探査車

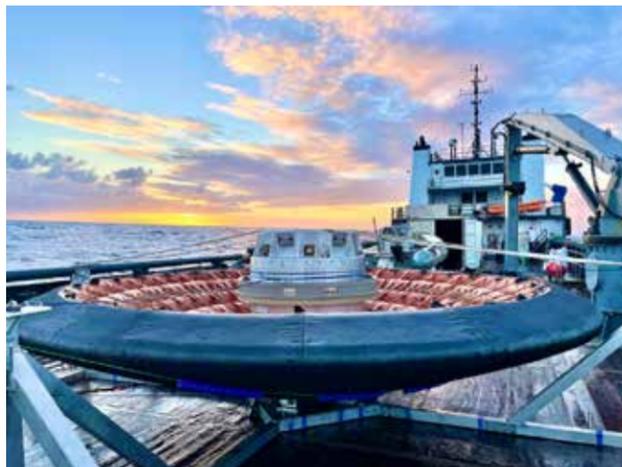
将来 火星 近傍/火星面

最適な自律性を実現する高度な技術
高度な医療観察及び意思決定支援システム、モジュール健康データ、即時対応の医療訓練機能
高度な行動的健康とパフォーマンスの観察
障害を評価/低減するコンパクトデバイス、軽量/省スペース型の有酸素運動器具及び抵抗運動器具
最適化されたヒューマンシステムファクター/インターフェースが人間の認知負荷、疲労、健康を評価
栄養安定性及び摂取量の観察技術
遅延の増加と変動に適切する月面アーキテクチャから進化したダウンリンク用の光通信
月へ伝送する高データレート送信リンクに加え、重要なソフトウェアのアップロードが必要となる火星へ伝送する高データレート送信リンク
技術の進展により月面アーキテクチャを精密に模擬する火星表面通信
複数の火星設備を同時に完全網羅する高速火星通信及び遅延耐性ネットワーク (DTN)
月ナビゲーションによって知識のギャップを埋めることにより拡大及び進化する火星ナビゲーション機能
大気処理と地下水抽出の両方からの液体酸素/液体メタン及び液体酸素/液体水素の生成
ライフサイクルにおける著しい進展を要する複数の動的及び受動的技術
大気処理と地下水抽出の両方からの液体酸素/液体メタン及び液体酸素/液体水素の生成
230°Cまでのオペレーション (低温対応)、複数年の耐用年数
大量輸送を削減し、より高いパフォーマンスを実現するために必要な熱制御と信頼性の向上
0.55 bar (約8 Psid) での船外活動、船外活動ライフサイクル延長、背面再生型CO2・湿度制御、高比エネルギーバッテリー
最低30日間の持続性、下部胴体の可動性向上、耐塵性
1年以上の持続性、断熱 (二酸化炭素大気)
月面船外活動の迅速な開始及び終了
火星での船外活動の迅速な開始及び終了
自律及び有人運用能力、地上制御の低減、走行範囲・速度・積載量の向上、軟弱な地面や急勾配など多様な土壌での走行ナビゲーション
部分的自律遠隔ロボット操作による、可変遅延とLOCを伴う数秒から数十秒の動的環境
最大40分

重要技術分野

推進、着陸、帰還

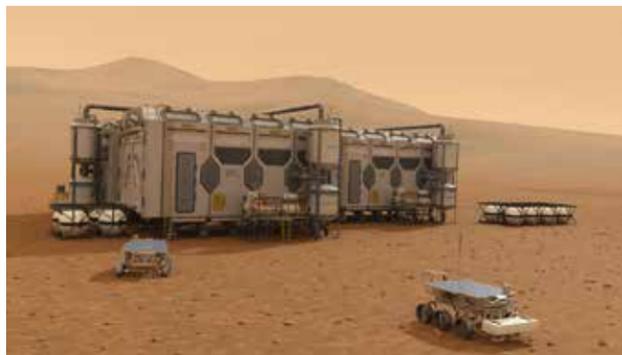
宇宙空間での操作、目的地への移動、地表への着陸、そして地球への安全な帰還は、すべて探査ミッションの基本的な能力です。地球からさらに遠く、より長期間にわたるミッションを実行する場合、低温流体管理は不可欠となります。比推力が大幅に向上した宇宙空間推進システムにより、質量効率の向上や火星往復の高速化が可能になります。安全かつ正確な突入と着陸のための技術は、持続的な運用のための資材集約をサポートし、科学的に興味深い場所へのアクセスを容易にします。民間企業は、急速に進化する推進技術をより迅速に進めるため、原子力推進も含み取り組んでいます。



2022年11月、回収船に乗った地球低軌道飛行試験で火星の飛行条件の再現に成功した6m膨張式減速機 (NASA/Gregory Swanson)

自律システム

自律システムにより、宇宙飛行士や自立したロボットシステムは、地球からの支援に依存することなく、ノミナル及びオフノミナルの状況下で動作できるようになります。例えば、自律型地表居住システムは、自律的メンテナンス、温度調節、微小隕石衝突やプルームデブリなどの事象による損傷をロボットで修復するなど、実使用期間と長期の非使用期間に対応するように設計されています。電子機器、コンピューティングアーキテクチャ、ソフトウェアの進歩は重要であり、各国の宇宙機関は民間セクターの最新技術の活用を必要としています。



自律型システムを活用した未来の惑星オペレーションの強化 (概念図)。 (CSIRO)

Analogue

エトナ山上のロボット: Autonomous Robotic Networks to Help Modern Societies (ARCHES)

DLRが主導し、ESAが大きく関与するこの取り組みでは、標準ペイロードインターフェースの技術実証中に、イタリアのエトナ山の厳しい環境を月の模擬環境として利用しています。最近のシミュレーションでは、26種類のペイロードとのモジュラーインターフェースを実証しました。65名以上が参加した全体ミッションは、4週間にわたって実施され、26 km離れたカタニア市の管制センターは、エトナ山の頂上で4種類のローバーとドローン1機を操作しました。このキャンペーンには、地質サンプルの回収、その場分析、低周波アンテナアレイのインフラ構築という3つの異なるミッションシナリオが含まれていました。



2022年、エトナ山でのARCHES類似環境ミッション中、協力ミッションシナリオでランダーからモジュール式ペイロードを回収する2台のLightweight Rover Unit (LRU)

生命維持と居住性

生命維持と居住性は、宇宙での生命を支える環境を創出し、維持するために不可欠な技術で構成されています。例えば、水や空気などの資源を保存及び再利用するための閉鎖ループシステム、信頼性の高い生命維持システム(メンテナンスの必要性や余分な消耗品やスペアパーツを減らすシステム)、飛行中の環境モニタリングなどがあります。長期ミッションでは、火災予防、検知、消火技術や現地での食糧生産も必須です。



ISSの栽培装置 (Veggie) の実験で栽培されているキャベツ。(NASA)

クルーの健康とパフォーマンス

クルーの健康とパフォーマンスは、宇宙滞在中の健康維持、医療、行動健全性、パフォーマンスモニタリングを可能にする多くのサブシステムで構成されています。クルーの健康及びパフォーマンスシステムは地上のサポートに大きく依存していますが、深宇宙探査では自律性と自給自足が必要になります。新たな軌道上医療システムは、相互運用可能な医療機器と一元的なクルー健康データの取得・分析をサポートする、モジュール型で機敏なテクノロジーソリューションで構成されます。



宇宙空間影響がクルーの健康に及ぼす影響を調べる実験における、ISSでの血液サンプリング。(CSA/NASA)

通信、測位、ナビゲーション、時間調整

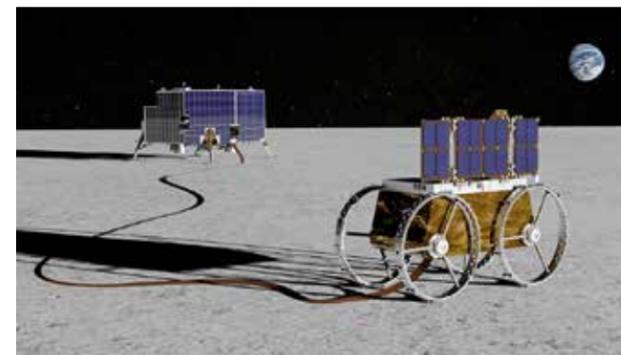
通信及びPNTは、あらゆる宇宙探査ミッションに不可欠です。宇宙物体と地上局間の長距離通信には、ハウスキーピングデータ、音声、高解像度ビデオ、及びミッション関連情報の安全かつ高速な伝送が求められます。月や火星でのロボットや人間の活動には、複数の要素にわたる測位と双方向通信の範囲が可能であることが必要です。相互運用性と標準化は、国際協力に向けた多くの機会をもたらします。



将来の月の通信及びナビゲーションインフラの視覚化。(SSTL)

電力

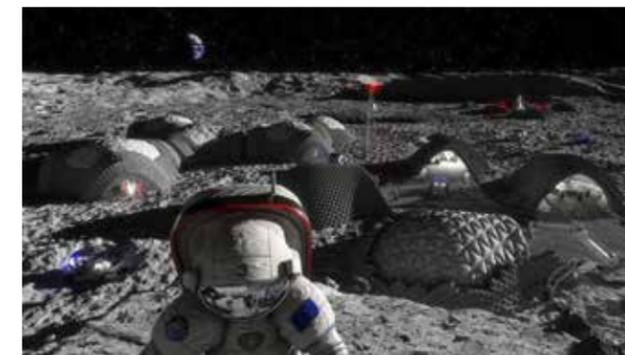
電力はすべての宇宙探査活動の中核です。月と火星の持続可能な探査には、効率的なエネルギー貯蔵及び配電システムを伴う信頼性の高い電源が必要です。太陽光発電、原子力発電、燃料電池、電池などの技術を使用した持続的で安全な地表電力インフラは、月面での人間とロボットの持続的な滞在にとって不可欠です。相互運用可能なシステムと電力規格を開発するには、宇宙機関や産業間の連携が必要になります。



月面電力システムは、コンバーター、ケーブル、展開装置などを含みます。(Astrobotic)

横断的技術

分野横断的な技術は、持続的な人類の探査を達成する上で不可欠な要素です。そのような技術として、入手可能な資源を使用可能な材料に変換し、地球からの補給依存を低減するISRU（資源のその場利用）の重要な技術、月・火星の両方で欠かせないダスト軽減技術、与圧居住モジュールの必須構成となるインフレーター構造などが挙げられます。すべての機器は、熱制御などによって、過酷な宇宙環境でも確実に動作できなければなりません。



ISRU技術を使用して建設及び維持できる将来の月面基地のイメージ図。(RegoLight Consortium, 視覚化: LIQUIFER)

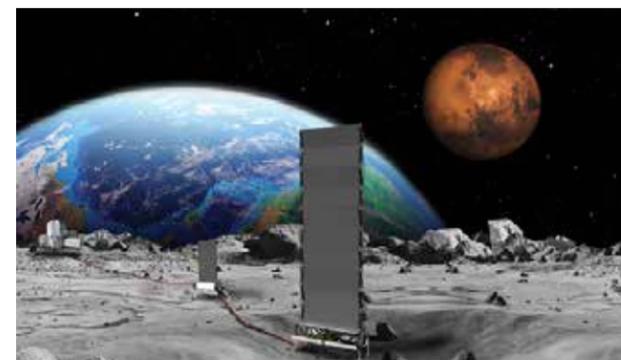
Analogue

バーチャルリアリティでのローバー操作: Virtual Operational Test Campaign

CSAは、カナダ初の月面南極ローバー展開に備えて、現実的な運用枠組みの下で運用コンセプトをテストするためのミッションシミュレーションを立ち上げました。この模擬環境フレームワークにより、ローバーと現地を、実際のもの(現地に展開されるハードウェア)またはバーチャルなもの(ゲームエンジンに配備される模擬環境)にすることができ、開発と試験のニーズに合わせて仮想環境を柔軟にカスタマイズすることができます。



月面探査機レーザー高度計デジタル標高モデルの小型版を使用した、月面風景内のローバーの仮想エンジンの予想図。(CSA)



核分裂地表電力システムは、月面の居住地、ローバー、及び機器に電力を供給することができます。(NASA)

Analogue

月面を地球で再現： Dusty Thermal Vacuum Chamber

ESAは、月面を模擬した条件下でペイロードを試験できるように、新しいDusty Thermal Vacuum Chamber (DTVC)を調達しました。DTVCの特別な機能は、非常に微細な粉塵の堆積がペイロードに及ぼす影響を個々にテストして評価できる粉塵分散システムです。DTVCは、月面環境の過酷な条件下で、チャンパー及びペイロードの性能を完全に自動化し、遠隔操作及びモニタリングすることを目的に設計されています。ヨーロッパ初となるこの施設は、ルクセンブルクのEuropean Space Resources Innovation Centre (ESRIC)に設置され、ISRUの研究、テスト、イノベーションにおける画期的な進歩の機会をもたらします。



Render of the Dusty Thermal Vacuum Chamber. (ESA)

EVA、移動能力、ロボット工学

EVA、移動能力、ロボット工学は、宇宙探査と宇宙における人類の存在を強化します。深宇宙及び地表活動用のEVA宇宙服は、与圧居住モジュール外での人間活動を可能にします。遠隔ロボット工学と移動能力は、人間とその相棒であるロボットが未踏の領域にさらに到達するのに役立ちます。自律型ロボットや自動運転車などの地上技術は宇宙探査に対して非常に応用性が高く、標準規格や相互運用可能な機器の創出は国際協力の機会をもたらします。



火星表面で科学探査を行う宇宙飛行士(概念図)。(CSIRO)

技術の結びつき

宇宙探査のための技術開発は、ひいては地球上の生活を豊かにし、その逆もまた同様です。地上用途で急速に発展した技術を取り入れることで、重要な宇宙技術の開発期間が短縮され、信頼性が向上します。その潜在的な利点は多く、宇宙機関は宇宙技術への投資を加速させています。さらに、火星探査に必要な技術を火星で使用する前に、月などで実証する必要があります。持続可能な探査ミッションでは、月探査に使用できる技術を開発し、その後火星探査のためにさらに開発することになっています。

地上から宇宙へ

地上技術の進歩は驚くべきレベルに達しました。最先端の技術を活用することで、長期的な探査活動に大きな影響を与えることができます。Wi-Fi、携帯電話ネットワーク、原子力、採掘などの地上技術はすべて、月と火星の探査ミッションと関係しています。

宇宙から地球へ

持続的な月面活動と火星探査のための重要な技術は、大きな社会経済的利益を生み出す可能性があります。深宇宙探査のために開発された医療処置や技術は、地球上の遠隔地に住む人々にも応用でき、宇宙や他の惑星で食料を栽培する技術は、地上での食料栽培をさらに発展させることができます。

月面から火星までの持続的な探査

月面技術を開発し、それを火星探査に適用することで、持続的な月面活動が火星探査の技術開発に重要な役割を果たすことができます。月探査用に開発された耐遅延性通信、放射線緩和、人間行動研究、及び長期生命維持システムは、火星ミッションに非常に役立ちます。

月面環境があらゆる技術に及ぼす制約

独特な月環境の課題を理解し、対処することは、技術開発とミッションの成功にとって非常に重要です。月面の技術は、塵やレゴリスの影響、低温、太陽光発電の不足、重力の低下、センサー性能への特有の影響に耐えるものでなければなりません。

Analogue

月のシミュレーション:

LUNAはESAとDLRの共同プロジェクトであり、宇宙飛行士の訓練場と技術のテストセンターを提供し、パートナーやユーザーに月探査のための知識と技術を提供します。用途として、「ロボットシステムのシミュレーション・検証・運用」、「科学活動、インフラ構築、メンテナンス、ならびに運用プロセス、緊急対応を含む人間-機械相互作用」、「月の塵やISRUの取り扱いを含む材料、ツール・製造の研究開発」などがあります。

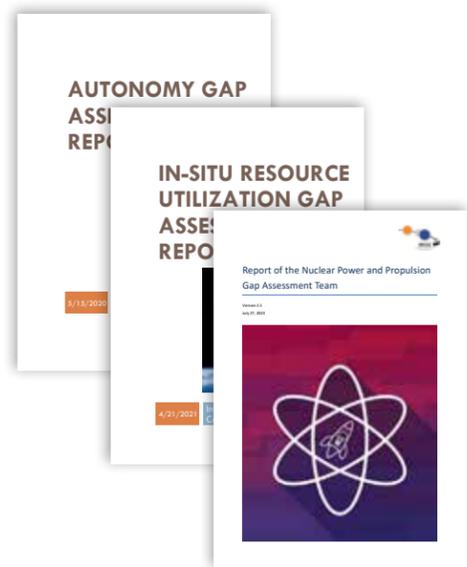


ESA-DLR LUNA模擬施設。内部の700 m²表土テストベッドエリアをレンダリングしたもの(挿入図)。(ESA/DLR-S. Asineta, F. Saling)

技術ギャップ評価とISRU:

ISECGは、専門家からなるギャップ評価チームを編成し、国際レベルで技術テーマを評価し、技術ギャップを特定し、それらのギャップを埋めるための主要な技術及びエンジニアリングソリューションを特定する報告書を作成しています。これまでのテーマには、液体酸素/メタン推進(2016年)、粉塵軽減(2016年)、遠隔ロボット工学(2018年)、自律性(2020年)、現地資源活用(2021年)、原子力発電及び推進(2023年)などがありました。すべての報告書がISECGのWebサイトで入手できます。

ISECGは、次のページのISRU概要のような技術分析も作成しています。



最新のギャップ評価報告書。(ISECG)

資源のその場利用

資源のその場利用(ISRU)は、無人・有人探査や持続的な滞在のための製品やサービスを生み出すために、その地域やその場にある資源を利用するハードウェアや作業を含みます。ISRUは、次の3つの広範な能力領域に関連しています。1. 現地での推進剤と消耗品の生産、2. 現地での建設、3. 宇宙での製造。ISRUのバリューチェーンは、次の5段階プロセスから成ります。



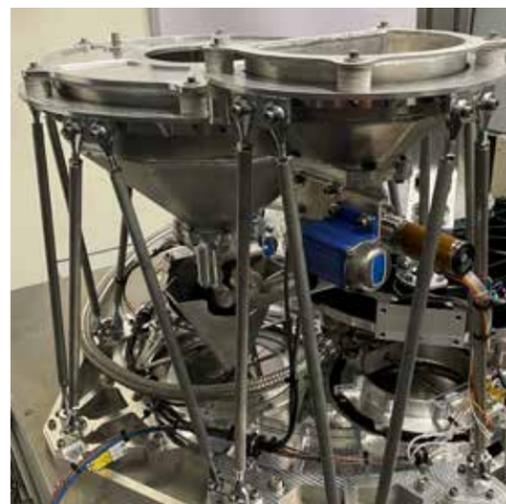
ISECGは2019年にISRUに関連する技術ニーズを調査及び特定するためのギャップ評価チームを立ち上げました。ギャップ評価チームの作業の結果、2021年ISRU gap assessment report (ISRUギャップ評価報告書)が発表されました。この報告書の主な結論は以下の通りです。

主な調査結果と利点

- » ISRUは革新的なプロセスであり、最初からアーキテクチャレベルの統合システム設計アプローチが必要。
- » ISRUがミッションとアーキテクチャに与える最も重要な2つの影響は、打上げ時の質量を軽減すること、資機材の寿命を延ばす、もしくは資機材を複数回再利用できること。
- » 有人月面活動の初期段階で使用できる最も影響力のあるISRU製品は、推進剤、燃料電池反応物質、月資源から得られる生命維持関連物資などのミッション消耗品。

現在の作業と推奨事項

- » ISRU開発に関しては、特に資源評価、ロボット工学/移動能力、表土からの酸素抽出の分野で、多くの作業が進行中または計画されています。
- » 月面探査に関する明確な戦略的知識のギャップに焦点を当てています。
- » 永久影地域の近傍及び内部の表土の地質工学的特性と資源探掘に早期に重点を置く必要があります。
- » ISRUベースの放射線遮蔽オプションを分析します。
- » 専用のプルーム-表面相互作用解析と軽減技術。
- » 地上産業との官民パートナーシップを含む、国際的な協調及び協力作業。
- » 3つの能力分野のそれぞれにおける技術ギャップを埋める取り組みを継続する必要があります。



月面酸素生産のための準飛行用炭素熱還元システム。(Sierra Space)



模擬の月塵から集中太陽光を用いて3Dプリントされた三角形のレンガ。(ESA/G. Porter)



2022年11月16日、フロリダ州NASAケネディ宇宙センター39B発射台からアルテミス1飛行試験で打ち上げられた、オリオン宇宙船を搭載したNASAスペース・ローンチ・システム (SLS) ロケット (NASA)

第9章

共通の道をたどる

国際宇宙探査ロードマップは、火星を最終目標として、太陽系の有人探査の持続可能な道筋を明らかにする国際的な取り組みを反映しています。このロードマップは、世界中の宇宙機関が探査ミッションを開発・実施する中で更新されます。

宇宙探査は経済成長をもたらし、新技術の開発を促進し、宇宙における私たちの位置づけについて好奇心を刺激し、世界中の人々にインスピレーションを与えています。宇宙飛行への挑戦は、太陽系探査に必要な能力を開発するために国々を結集させます。

各宇宙機関はそれぞれ独自の国家政策に従いますが、国際協力と、協力によってもたらされる共通の探査アーキテクチャやミッション設計により、各機関の探査計画はより持続可能で効果的なものになります。既存の宇宙機関は、単独では実行できない探査ミッションに専門知識や技術を提供できる新興宇宙機関の貢献を歓迎しています。各国の宇宙機関は、民間企業による宇宙探査活動にもますます関与し、協力と革新の新たな機会を生み出すとともに、国家経済を強化しています。

国際宇宙探査ロードマップは、ISECG加盟機関の相互のコミットメントを形成するものではありませんが、宇宙探査に対する世界的、戦略的、連携した包括的アプローチです。

この国際宇宙探査ロードマップ最新版は、多くの宇宙機関の最新の野心と計画を反映し、民間企業の多大な貢献を考慮し、火星以遠の科学的調査を取り入れ、太陽系における協調的かつ持続的な有人・無人探査の道を切り開きます。

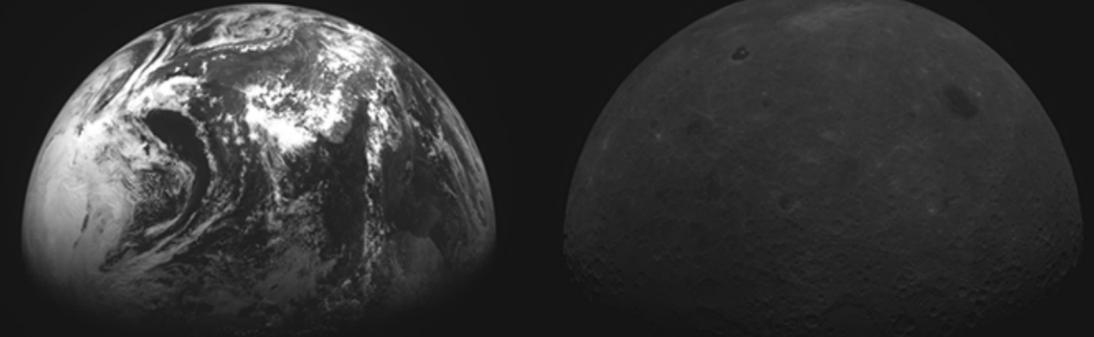
付録：略語と頭字語

AEB	Brazilian Space Agency (ブラジル)	JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency (日本)
AEM	Mexican Space Agency (メキシコ)	KASA	Korea AeroSpace Administration (韓国)
ASA	Australian Space Agency (オーストラリア)	LEAP	月面探査加速プログラム
ASI	Italian Space Agency (イタリア)	LEO	地球低軌道
CLPS	商業月面輸送サービス	LINX	宇宙計測研究所
CMSA	China Manned Space Agency (中国)	LSA	Luxembourg Space Agency (ルクセンブルク)
CNES	National Centre for Space Studies (フランス)	MBRSC	Mohammed bin Rashid Space Centre (アラブ首長国連邦)
CNSA	China National Space Administration (中国)	NASA	National Aeronautics and Space Administration (米国)
CPNT	通信、測位、ナビゲーション及び時刻情報	NOSA	Norwegian Space Agency (ノルウェー)
CSA	Canadian Space Agency (カナダ)	NRHO	月長楕円極軌道
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (オーストラリア)	POLSA	Polish Space Agency (ポーランド)
DLR	German Aerospace Centre (ドイツ)	PPE	電力・推進要素
EMBRAPA	Brazilian Agricultural Research Corporation (ブラジル)	ROSA	Romanian Space Agency (ルーマニア)
ESA	European Space Agency (欧州)	UAESA	United Arab Emirates Space Agency (アラブ首長国連邦)
EVA	船外活動	UKSA	United Kingdom Space Agency (英国)
GER	国際宇宙探査ロードマップ	UNOOSA	国際連合宇宙局
GISTDA	Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (タイ)		
GNSS	全球測位衛星システム		
HALO	居住・ロジスティクス拠点		
ILRS	国際月面研究ステーション		
ISECG	国際宇宙探査協働グループ		
ISRO	Indian Space Research Organisation (インド)		
ISRU	資源のその場利用		
ISS	国際宇宙ステーション		

ISECGの実績

ISECGの目的は、宇宙探査への関心、関与、目的、計画について議論及び促進するためのフォーラムを提供することです。過去17年間にわたり、国際宇宙機関グループは指針となる目的に沿い、次のような一連の重要な成果を成し遂げてきました。

- » ISECGは、2007年の14の創設メンバー（そのすべてが現在もISECGのメンバー）から、2024年には27のメンバーに成長しました。
- » 2007年版ISECGガイドラインは、2022年に機関のリーダー達によって再確認されました。
- » 当初6年間の存続期間が認められていたISECGは、各機関のリーダー達によって2030年12月まで継続することが承認されました。
- » 当初の3つの常設ワーキンググループと2つの特別チームは、メンバーにとって共通の関心事であったテーマ領域やプロジェクトに関するフォーラムを提供するために、7つの常設ワーキンググループと複数の特別チームに進化・成長しました。
- » この文書の発表により、ISECGは国際宇宙探査ロードマップ第4版を発行したことになり、これは各機関の関心の進化と、共通の道を歩み続けたいという持続的な意欲の両方を示しています。ISECGは、急速に変化する加盟機関の計画を反映させるために、月探査に主な焦点を当てた2つのロードマップ補足文書も発行しました。
- » ISECGは、宇宙探査のベネフィットに関する最新のホワイトペーパー、宇宙探査の科学的目標に関するホワイトペーパー、国際宇宙探査ロードマップの重要技術ニーズに関する報告書、6つの技術格差評価文書など、各機関の関心に応えるいくつかのテーマ文書を公開しており、今後さらに多くの文書が公開される予定です。



Explorando juntos

Explorăm împreună

Nós exploramos juntos

我们一起探索

Мы исследуем вместе

We Explore Together

우리는 함께 탐사합니다

เราสำรวจด้วยกัน

Vi utforskar tillsammans

Mir exploréieren zesummen

نستكشف معاً

Chúng ta cùng nhau khám phá

Esploriamo insieme

Badamy razem

Ми досліджуємо разом

Nous explorons ensemble

私たちは、ともに探査する

Vi utforsker sammen

Wir erkunden gemeinsam

Ka torotoro tahi tatou

हम एक साथ अन्वेषण करते हैं