

国際宇宙探査における 月・惑星探査の動向について

平成26年5月9日(金)

(独)宇宙航空研究開発機構

構成

1. 国際宇宙探査ロードマップにおける位置づけ
2. 各国の取組
 - A) 月
 - (1) LADEE (米)
 - (2) 嫦娥3号 (中)
 - (3) Luna-25, 26, 27 (露・欧)
 - (4) RPM (米)
 - (5) 月周辺ミッションに関するJAXAの取り組み
 - B) 小惑星
 - (1) はやぶさ2 (日)
 - (2) OSIRIS-REx (米)
 - (3) 小惑星再配置ミッション (ARM) (米)
 - C) 火星
 - (1) MSL (米)
 - (2) マンガルヤーン (印)
 - (3) ExoMars (欧・露)

1. 国際宇宙探査ロードマップにおける位置づけ(1/2)

国際宇宙探査ロードマップでは、2030年以降の有人火星探査を目指しその準備として、

- ISSを最大限活用し、探査に向けた技術蓄積を行う。
 - 月・小惑星・火星への無人探査(新発見と有人準備のための無人ミッション)
 - 2020年代に月周辺での有人探査を実施(地球低軌道以遠の有人ミッション)
- としており、上記位置づけの中で各国の宇宙機関が無人ミッションを実施する。



1. 国際宇宙探査ロードマップにおける位置づけ(2/2)

- 国際宇宙探査ロードマップにおける一連の月・小惑星・火星の無人探査ミッションは、将来の有人探査の準備として、有人探査を安全で効果的に行うための技術的・科学的知見を獲得し、後に続く有人探査の投資に対する最大限の成果を確保するために不可欠なものと位置づけられている。
- 有人探査に先行する無人探査ミッションにより、科学の進展に加えて以下が可能となる。
 - 有人探査に必要な技術の実証: 軌道間推進、エネルギー、有人支援ロボティクス、その場資源利用技術(ISRU: In-Situ Resource Utilization)、その他の重要システムの技術実証
 - 有人探査のための情報収集: 将来の着陸地点の選定や有人探査に伴うリスクの把握・低減のために必要な環境データ(資源分布、放射線、ダスト、大気成分等)の取得
- 有人探査に貢献する最近の主な成果
 - ① ルナ・リコネサンス・オービタ(LRO)/米国、かぐや/日本
リモートセンシングデータにより、月面の詳細な地形データや利用可能な資源分布など、有人探査に向けた月環境データを取得。
 - ② はやぶさ/日本
小惑星イトカワの特性を解明すると共に、小惑星サンプルを用いた網羅的な小惑星の分析を可能にし、有人探査での環境条件の設定に寄与した。
 - ③ キュリオシティ(MSL)/米国
火星有人探査で必要な突入・降下計画立案に向けた火星の大気特性データ、および有人滞在に向けた火星の表面の宇宙放射線の最初の測定データを獲得。

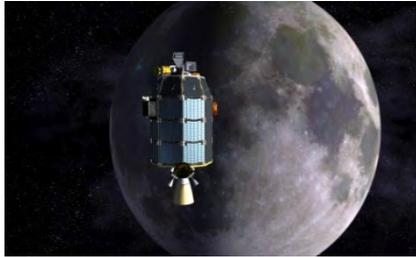
2.各国の取り組み

各国が無人探査ミッションで解決を目指す課題

- 将来の有人探査の準備として、将来の着陸地点の選定や、新システムの設計、有人探査に伴うリスクの低減等に用いる知見・技術の獲得の為に、各目的地毎に無人探査を計画している。

	主な関心	目的	課題	対応するミッション	日本の優位性
月 (極域)	その場資源 利用 (ISRU*)	<ul style="list-style-type: none"> • 現地の資源を有人ミッションのためにその場で利用 	<ul style="list-style-type: none"> • 水、氷の確認と存在量 • 月の砂(レゴリス)からのに含まれる酸素等の抽出 • 氷の存在が予測される極域の永久影クレータの傍でかつ日照条件の良い地点へのピンポイント着陸 	A-4.RPM(米) A-3.Luna-27(露・欧) <u>A-5.月着陸ミッション(日)</u> (検討中)	○
月 (中低緯度)	環境調査 技術実証	<ul style="list-style-type: none"> • 有人活動のための月表面の環境調査 • 着陸技術の実証 	<ul style="list-style-type: none"> • 月地表面の物理特性、放射線、ダスト環境等の調査 • 着陸技術の実証(極域と比較して容易) 	A-1.LADEE(米) A-2.嫦娥3号(中) A-3.Luna-25(露・欧) A-3.Luna-26(露・欧)	△
小惑星	有人探査目標の特定	<ul style="list-style-type: none"> • 有人探査の対象となる小惑星の特定 	<ul style="list-style-type: none"> • 小惑星の物理特性、組成等の調査(サンプルリターンによる) 	<u>B-1.はやぶさ2(日)</u> B-2.OSIRIS-REx(米) B-3.ARM(米)	○
火星	大気モデル	<ul style="list-style-type: none"> • 火星着陸のための大気モデル構築 	<ul style="list-style-type: none"> • 火星大気の詳細、密度、圧力、温度、風向等の調査 	C-1.MSL(米) C-2.マンガルヤーン(印) C-3.ExoMars(欧・露)	△

A-1. LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer)

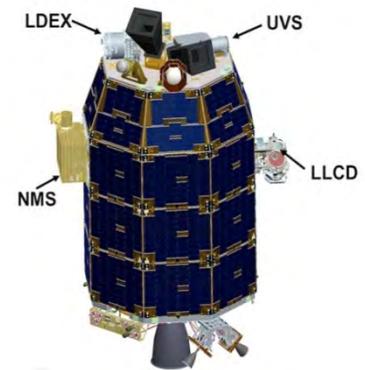


有人探査システム設計のための月大気・ダストなどの月近傍環境の調査を主目的としたミッション。

NASAの月大気・ダストの調査を目的とした周回機。2013年10月6日に月周回軌道に投入され、11月10日から科学データの収集を開始し、11月20日に高度12-60kmの科学観測運用軌道に投入された。科学観測は当初約100日間の予定から150日間に延長され、2014年4月18日月面に制御落下して運用を終了。打上げ費用を含むミッション予算は約2億8000万ドル。

■ ミッションの概要:

- 月周辺有人探査システム設計のために、機器に影響を及ぼす月近傍環境の調査を目的とした月周回探査機(打上げ重量383kg、ミッション機器50kg)
 - 希薄ながら存在する月大気の構造と組成に関する調査
 - 月の塵が上空まで巻き上げられているか等の調査
- 月裏側探査ミッション等への応用を目指したレーザー通信技術実証



■ LADEE搭載機器:

- 月大気中浮遊物収集分析装置
- 紫外線・可視光分光計
- 月レーザー通信実証ペイロード
- 中性粒子質量分析計



日没時に輝く月面から巻き上げられた塵(イメージ)



レーザー通信技術実証(イメージ)

A-2. 嫦娥3号



月着陸技術の習得を目的とした中国初の月着陸ミッション。

嫦娥3号は、着陸機とローバ「玉兔(Yutu)号」より構成される中国初の月着陸探査機。月の「周回」「着陸」「サンプルリターン」からなる嫦娥計画の第2段階「着陸」を担う。2013年12月2日に長征にて打上げ。同月15日に月中緯度地域への着陸とローバの展開に成功。(米国・ロシアに続く3番目の月着陸国になった。)



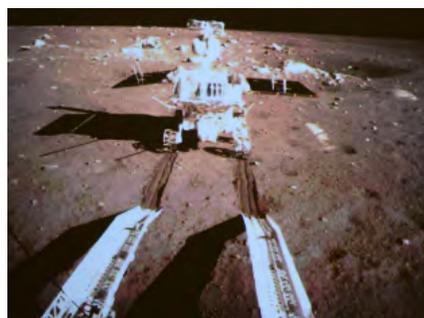
嫦娥3号が着陸時に撮影した月面

■ ミッションの概要:

- 月着陸・移動探査技術の習得
- 地球の電離層観測
- 月面の土壌・地下構造の調査

■ 搭載機器:

- 紫外線カメラ
- 土壌調査用の分光器
- 地下構造調査用のレーダ
- 越夜用の原子力電池(着陸機)・原子力熱源(ローバ)



月面に降りるローバ“玉兔号”

嫦娥3号の概要

- 2013年12月2日「長征3号乙」打上げ
- 同6日月軌道への到着、15日「虹の入り江」に着陸
- 打上重量3800kg
(着陸機1200kg、ローバ140kg)
- ミッション期間: 着陸機1年、ローバ3か月

(参考)嫦娥計画

- 第1段階「繞」(2007年～) : 嫦娥1号、嫦娥2号による月周回。
- 第2段階「落」(2013年～) : 嫦娥3号による軟着陸(ローバー含む)。
- 第3段階「回」(2017年～) : 嫦娥5号による月面のサンプル採取・回収。

<嫦娥計画の達成目標>

- 嫦娥1号、2号により月周回を達成。 第一段階の予算は14億元と報道されている(2007年2月6日付人民網)。
- 嫦娥3号では、月面軟着陸、月面探査、月面での生存、深宇宙の観測・通信、遠隔操作、ロケットによる月遷移軌道への直接投入などの技術習得を目指す。
- 嫦娥5号では、月面のサンプル採取・回収ミッションを実施。



第1段階(繞:月周回)

嫦娥1号 2007年10月24日打上げ
嫦娥2号 2010年1月打上げ



第2段階(落:軟着陸)

嫦娥3号 2013年12月2日打上げ
嫦娥4号(3号のバックアップ)

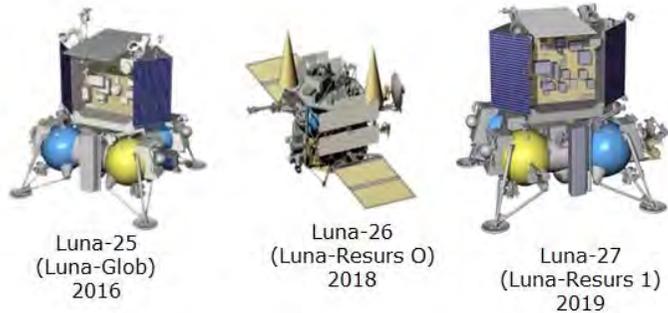


第3段階(回:試料回収)

嫦娥5号 2017年頃打上げ予定

図 ©月探査プロジェクトセンター

A-3. Luna-25, 26, 27



月の水、氷の調査及びその場資源利用(ISRU)の実証を目的とした月極域着陸ミッション。着陸技術の実証機、周回機を含む3機で構成。

月南極域での水、揮発性物質調査を主目的としたESAとRoscosmosによる月探査ミッション。

ロシアにおいても月極域着陸探査は技術的なハードルが高く、2016年の着陸技術再実証機(Luna-25)、2018年の通信リレー衛星(Luna-26)の後、2019年の本格的な月南極着陸探査機(Luna-27)を予定。

■ ミッションの概要:

Luna-25

- 着陸技術の再実証を目的とした技術実証探査機
- 月の南半球高緯度に着陸

Luna-26

- Lunar-27以降の探査機のための通信リレー及び着陸地点調査を目的とした月周回衛星
- 月の極軌道周回衛星(1年目:高度100km~150km、2、3年目:500km~700km)

Luna-27

- 月面の水、氷、揮発性物質探査を目的とした大型着陸探査機
- 月の南極近傍に着陸し、ローバと着陸機を用いた探査を実施
- ドリルを用いた掘削・サンプル採取・分析を実施



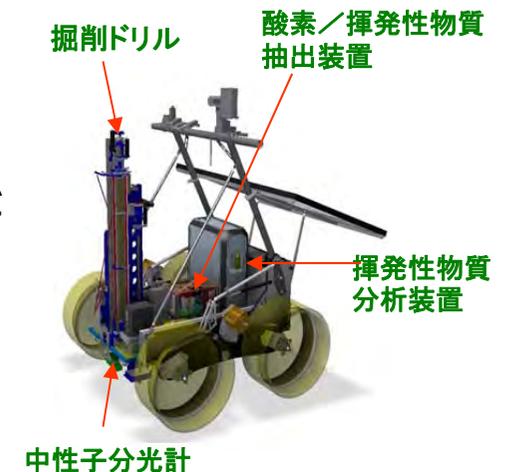
A-4. RPM (Resource Prospector Mission)



月の水・氷の調査及びその場資源の実証を目的とした、世界初の月極域着陸ミッション。

その場資源利用(ISRU)の可能性を調査するためのミッション機器群 (RESOLVE: Regolith and Environment Science and Oxygen and Lunar Volatiles Extraction)を搭載したローバを用いて、水・酸素等の揮発性物質が見込まれる月南極地域を着陸調査する。

2013年9月にMission Concept Reviewを完了し、現在2019年の打上げを目標にPre-Phase A活動(概念検討)を実施中。国際協力を前提としたミッションであり、着陸機、ローバ等について国際協力を検討中。打上げ費用とミッション機器費用として想定予算は約2億5000万ドル。

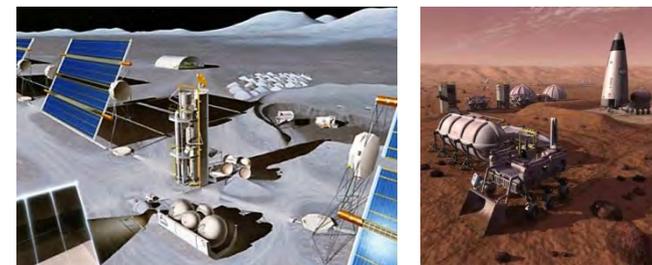


■ ミッションの概要:

- 極域における水・氷などの揮発性物質の探査
- その場資源利用技術(ISRU)を月面で実証するミッション (酸素の抽出など)

■ RPM搭載機器:

- 中性子分光計
- 揮発性物質分析装置
- 酸素／揮発性物質抽出装置



将来のISRU拠点(左:月、右:火星)(イメージ)

A-5. 月周辺ミッションに関するJAXAの取り組み



世界初となる月南極域への高精度(ピンポイント)着陸探査ミッション。(検討中)

月南極域への着陸探査ミッションの技術検討を継続中。

“月面その場観測”を目指し、着陸技術や表面探査の研究開発を行っている。本ミッションにて検討してきたJAXAの誤差100mの高精度着陸技術に関し、NASAより月無人探査ミッションへの協力打診があり、JAXA-NASA共同月着陸探査ミッションの共同技術検討を実施中。

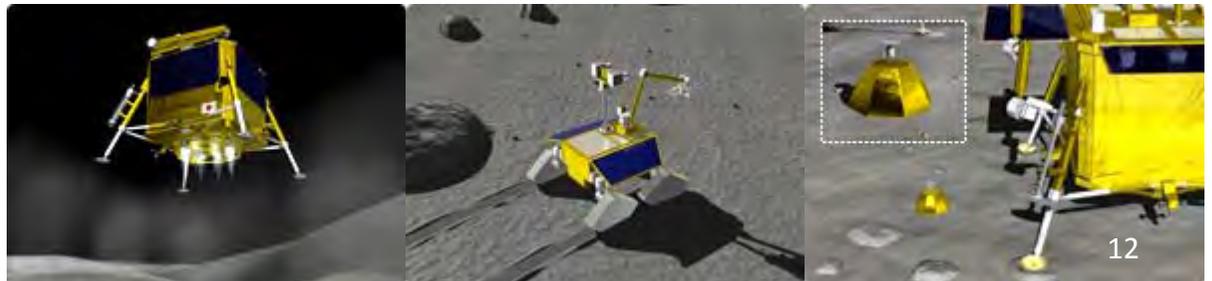
■ ミッションの概要:

□ 今後の宇宙探査に必要な基盤技術を確立

- ✓ 狙った場所にピンポイントで着陸できる、安全で高精度な無人軟着陸技術
- ✓ 広範囲の探査を実現するロボットによる移動探査技術
- ✓ 月の厳しい夜を越え長期観測を実現する越夜技術

□ 「かぐや」(SELENE)で確立した世界トップクラスの月の科学を継承・発展

- ✓ 月の誕生・進化の解明に繋がる重要な観測を行い、固体惑星形成に関する人類の知見を獲得。
 - 内部構造探査
 - 地質探査
- ✓ 将来の本格的利用に必要なデータを取得し人類の月探査活動に貢献。
 - 放射線計測
 - 地盤計測
 - ダスト計測



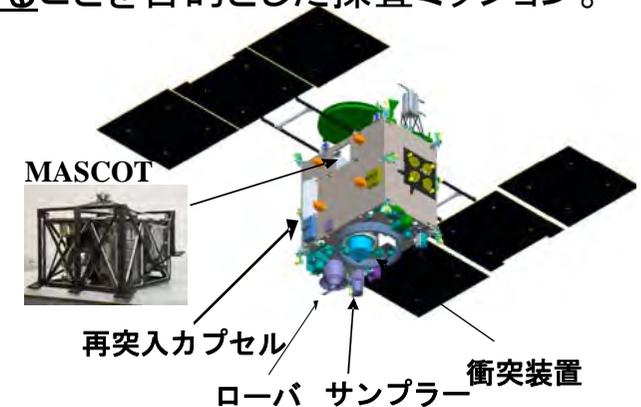
B-1. はやぶさ2プロジェクト



「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を発展させることを目的とした小惑星サンプルリターンミッション。

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星の探査およびサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用の解明から、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を発展させることを目的とした探査ミッション。

- 対象天体： 地球近傍炭素質小惑星(1999 JU3)
- ミッションの概要：
 - 小惑星からのサンプルリターン
(打上げ:2014年、小惑星到着:2018年、地球帰還:2020年)
 - 探査対象小惑星の鉱物組成や重力等の科学観測
 - 小型ローバによる小惑星表面の調査
日本の小型ローバ(MINERVA)と独DLRが開発するローバ MASCOT(Mobile Asteroid Surface SCOUT)を搭載
 - 衝突体を衝突させ人工的にクレーターを作ることで、太陽光や太陽風にさらされていない内部物質を観測、試料採取を試みる。
- はやぶさ2搭載機器
 - サンプリング機構、衝突装置、地球帰還カプセル
 - レーザー測距計
 - 多バンド可視カメラ、中間赤外カメラ、近赤外分光計
 - 小型ローバ



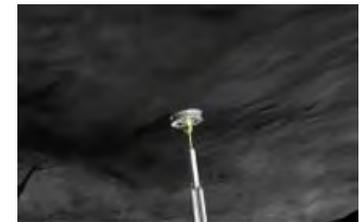
B-2. OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer)



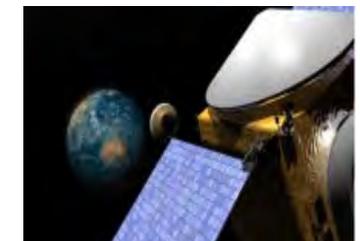
小惑星の環境調査・サンプルリターン技術の実証を目的した、米国で初めての小惑星サンプルリターンミッション。

太陽系探査プログラム「ニューフロンティア」の3件目*のミッションとして、2011年5月に選定された米国初の小惑星サンプルリターンミッション。2013年5月に開発フェーズに移行。打上げ費用を除く予算は約8億ドル。

- 対象天体：地球近傍炭素質小惑星「ベンヌ」(1999 RQ36)
- ミッションの概要
 - 2016年9月打上げ。
 - 2018年10月に小惑星ベンヌに到着予定。
 - 小惑星到着後、最大505日間のリモセン観測。
 - 60g以上の小惑星表面物質(サンプル)の採取。
 - 2023年9月に地球に帰還。
 - NASAジョンソン宇宙センターにてサンプルの分析。



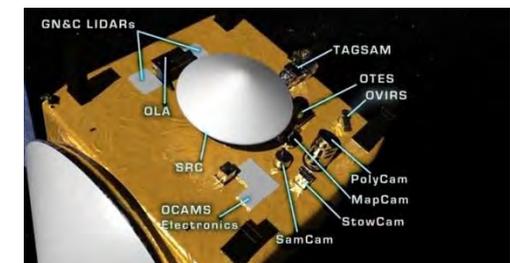
サンプラー(TAGSAM)による試料採取



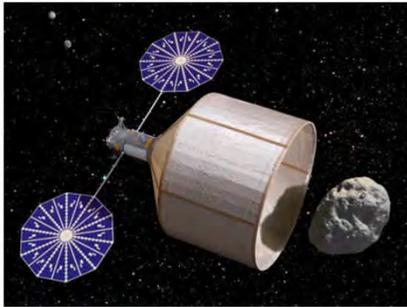
耐熱回収カプセルを地球に分離

■ OSIRIS-REx搭載機器：

- Camera Suite (OCAMS) : 長距離／表面観測用カメラ
- Visible and IR Spectrometer (OVIRS) : 可視赤外分光計
- Thermal Emission Spectrometer (OTES) : 熱放射分光計
- Laser Altimeter (OLA) : レーザー高度計



B-3.小惑星再配置ミッション (ARM: Asteroid Redirect Mission)



無人機による月周辺への小惑星再配置と有人探査ミッションから構成される、世界初の有人小惑星探査ミッション。

- 対象天体：
10m程度の小型小惑星の天体全体を月周辺への再配置するA案と小惑星の一部を切り取って再配置するB案の2案が検討されている。
 - A案: 2009BD (直径5m、145トン)
 - B案: イトカワの一部 (直径2~3m、18トン) その他にBennu、1999JU3も検討の対象

■ ミッションの概要:

- 直径7~10m、重量~500トンの地球近傍の小惑星 (NEA) を電気推進エンジンを搭載した宇宙機により捕獲し、月近傍の安定軌道に投入。Orionを用いて宇宙飛行士が訪問、調査し、サンプルを持ち帰る。
- ①NASA科学局主導の地上観測フェーズと②宇宙技術局主導の次世代電気推進による無人小惑星捕獲ミッション (ARRM)、③有人探査・運用局主導のOrionによる有人探査ミッション (ARCM) より構成される。



C-1. MSL (Mars Science Laboratory)



火星大気等の火星環境の網羅的な調査や生命の痕跡の調査を目的とした火星着陸探査ミッション。

火星大気等の火星環境の網羅的な調査や、火星の微生物及びその痕跡の探査を目的としたNASAの火星探査ミッション。火星の土壌サンプルや岩石を収集し、周囲の環境や生命の痕跡を観測する。大型のローバ「キュリオシティ(Curiosity)」は、収集したサンプルをその場で分析する装置を搭載する。ミッション費用は、宇宙機及び科学機器の開発に18億ドルで、打上げと運用費を含む総額は25億ドル。

■ ミッション概要

- 微生物の存在や、火星大気等の環境が過去の生命の痕跡を保存するのに適した環境かを調査することを目的とした探査機
- 1火星年(地球の98週間、約2年)の間調査予定。2011年11月26日にAtlas 5 ロケットにより打上げられ、2012年8月6日に着陸。

■ 搭載機器と国際協力機関

<ローバ搭載科学機器>

□ カメラ

□ 分光計

- ✓ Alpha Particle X-Ray Spectrometer 【CSA】
- ✓ Chemistry & Camera 【CNES】
- ✓ Sample Analysis at Mars Instrument Suite 等

□ 放射線検出器

- ✓ Radiation Assessment Detector【DLR】
- ✓ Dynamic Albedo of Neutrons【ロシア】

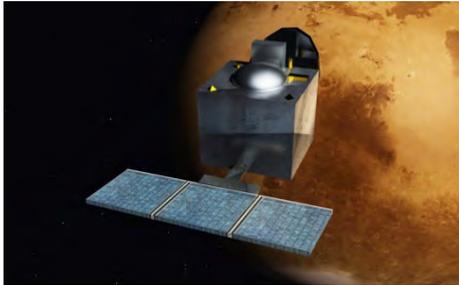
□ 環境センサ

- ✓ Rover Environmental Monitoring Station【スペイン】

<探査機搭載工学機器>

□ 大気センサ

C-2. マンガルヤーン



火星探査の技術実証および、火星の地表面、大気等の調査を目的とした火星周回ミッション。

ISROによるインド初の惑星探査ミッション。火星を周回しながら、火星の大気、地表、鉱物等に関する調査を実施する計画。

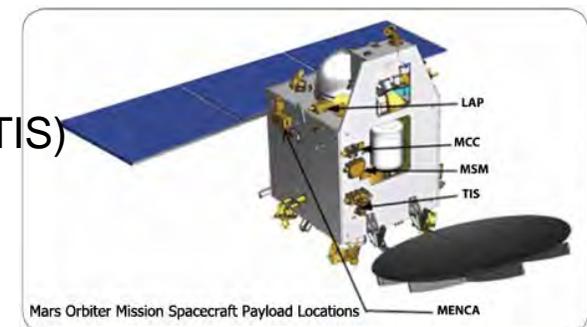
PSLV C-25ロケットにより、2013年11月に火星探査機マンガルヤーンの打上げに成功、火星への遷移軌道を飛行中。2014年9月火星周回軌道投入予定。

■ ミッションの目的

- 技術目標：火星周回、軌道投入の技術獲得。深宇宙通信、航法、ミッション運用知見獲得等。
- 科学目標：火星表面の特性、地形、鉱物、大気の調査。

■ ミッション機器

- 光学画像：Mars Colour Camera (MCC)
- 地表の組成・鉱物分布：Thermal Infrared Imaging Spectrometer(TIS)
- メタン探知：Methane Sensor for Mars (MSM)
- 上空大気組成：Mars Enospheric Neutral Composition Analyser (MENCA)
- 光度計測：Lyman Alpha Photometer (LAP)



C-3. ExoMars



火星への着陸技術の実証、大気観測、生命の痕跡の調査等を目的とした2回の火星着陸ミッション。

ESAとRoscosmosによる火星着陸ミッション。火星への着陸技術の実証、大気観測、火星の生命の痕跡の探査を目的とする。

2016年の火星周回機 (TGO)と着陸実証機 (EDM)、2018年の探査ローバ (ExoMars Rover)と科学装置群「Surface Platform」を搭載した輸送モジュールから構成。

■ ミッションの概要

2016年ミッション (2016年1月に露プロトンロケットにて打上げ予定)

TGO (周回機): 火星軌道上で、生物の存在や地質構造の形成過程に関する情報となるメタンやその他の大気成分の観測を行う。2018年のミッションでは、データ中継衛星としての役割も担う。

EDM (着陸機): 火星表面に制御着陸する技術実証を行う他、降下中の火星大気のデータ収集や、メリディアニ平原内となる予定の着陸地点の環境測定を行う。

2018年ミッション (2018年5月に露プロトンロケットにて打上げ予定)

ExoMars Rover: 広角カメラ、赤外分光器、分光顕微鏡 (MicroOmega) 等を搭載し、火星の生命の痕跡を調査する。掘削ドリルを用いて地下物質の観察も実施する。「オーロラプログラム」でExoMarsの次のミッションに計画されている火星サンプルリターンミッションで重要な技術となる、着陸・地表移動・掘削・サンプル処理等の技術実証を行う。

計画の変遷: 同ミッションはイタリアが主導するESAの任意プログラム「オーロラ宇宙探査プログラム」として、2009年に閣僚級理事会にて承認。当初、ESA-NASAの共同ミッションとして実施の予定であったが、NASAは、2012年2月、2013年度大統領予算要求にて同ミッションからの撤退を表明。代替りの国際パートナーとして2014年4月にRoscosmosが参加することで基本合意。ロシアは両ミッションへのプロトンの提供、科学装置の提供、2018年ミッションの降下・着陸モジュールへの提供を担う。