

# 1. 月探査(月周回衛星「かぐや」、月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」)

## 「月探査」の意義・目的

月探査、将来の国際協働による有人月探査において、我が国が自律性を確保し国際的な位置づけを確保し貢献するために、必須となる探査技術の実証と、現地の環境や資源などの調査を実施する。具体的には、地球以外の重力天体への軌道投入技術、自律着陸技術、帰還・回収技術等の獲得、および月面の資源および環境調査等を無人探査機により実証する。

「かぐや」: 地球以外の重力天体への周回軌道投入技術の獲得と月の高精度複合観測

「SELENE-2」: 地球以外の重力天体への自律着陸技術、ロボット探査技術、越夜蓄電技術の獲得と、月の内部構造探査、将来の有人探査に向けた月面環境(放射線、プラズマ、ダスト等)の探査

## 世界における日本の位置づけ

### 【①月周回衛星「かぐや」】

我が国は、「かぐや」の月探査により、米国アポロ計画以来の最大の月探査プロジェクトを実施し、地球以外への重力天体への軌道投入技術の実証を行うとともに、月の高精度複合観測の実施により、今までの知見を塗り替えた。「かぐや」の成功により「月探査」で世界のトップグループに位置。

### 【②月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」】

- ◆技術面においては、世界で初めて、100m級の最高精度での月面無人自律軟着陸、ロボットにより地震計等の観測機器を月面の適地を選んで設置、さらに、我が国が優位である再生可能エネルギーのみを使用した蓄電技術による越夜(2週間続く極寒の夜を越える)技術を実証。
- ◆科学面においては、最新鋭の地震計等による内部構造探査を数ヶ月間行い、世界で初めて地殻の厚さや内部の密度を高い精度で決定し、月全体の主要元素組成を明らかにする等世界をリードできる成果の達成を目指すとともに、将来の有人探査に向けて月面環境(放射線、プラズマ、ダスト等)を詳細に探査。

## プロジェクトの特徴

### 【①月周回衛星「かぐや」】

- ◆ 月への遷移軌道や月軌道投入を高精度で実施するとともに月周回中の姿勢制御・軌道制御・熱制御を計画通り実施した。これにより月探基盤技術を実証・獲得するとともに、最先端の観測機器による月の高精度複合観測により世界で最も高精度な月のデータを取得、世界のトップグループに位置するとともに、後継への技術及びデータの活用を促進した。

### 【②月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」】

- ◆ 無人・有人探査により人類が直接訪問できる宇宙空間・天体への到達とその場観測・作業、そのための先行調査を実施するため「人類の活動領域の拡大」プログラムの一環として、月探査に関する懇談会報告書「我が国の月探査戦略」(平成22年7月)を受けて、2020年頃のロボットでの探査基地構築(月南極域)・探査・サンプルリターンの本格的な月探査に反映させる技術獲得等を行うとともにキー技術及び最先端能力を獲得することにより、ISSで培った技術も取り入れることで、国際有人宇宙探査計画において主要国として参加することも視野に入れることを検討。

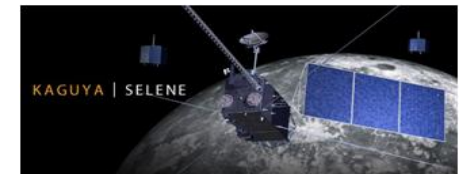
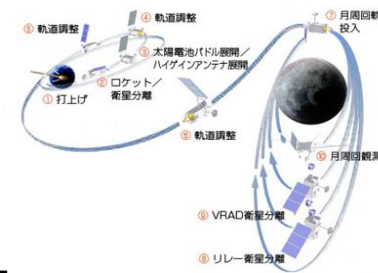
## ミッション概要

### 【①月周回衛星「かぐや」】

- ◆ 平成19年9月に打ち上げられ、約1年間にわたる定常運用、約7ヶ月にわたる後期運用が実施され、平成21年6月11日に主衛星を月の表側に制御落下させ、ミッションが完了した。平成21年11月2日より観測データの一般公開を実施している。
- ◆ 「かぐや」の月探査により、高精度な月の遷移軌道や月軌道投入、月周回中の姿勢制御・軌道制御・熱制御を計画通り実施することで月探査基盤技術を実証するとともに、15種類の観測ミッション(ハイビジョンカメラを含む)を1年以上にわたり実施し、元素分布、鉱物分布、地形・表層構造、月周辺環境、重力分布、精細画像等に係るデータを取得し、米国のアポロ計画以来の本格的な月探査を実施した。

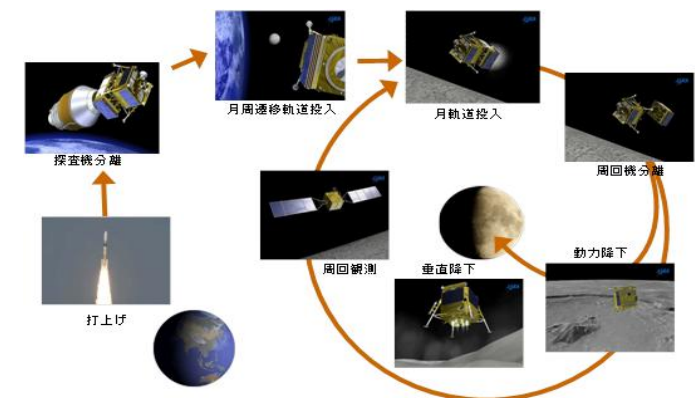
### 【②月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」】

- ◆ 無人の探査機を月面の狙った場所にピンポイントで軟着陸させ、探査ローバを使用して短期間のロボット探査(広域の地質探査、環境計測等)を行う。また、夜間のエネルギー確保に燃料電池等を用いた越夜技術実証を行う。



「かぐや(SELENE)」  
のミッションシーケンス

月周回衛星「かぐや」  
概念図



月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」概念図

## 推進体制

### 【①月周回衛星「かぐや」】

- ◆ 主として、バス機器を日本電気、三菱電機、IHI エアロスペース等が、観測機器には国立天文台等の研究機関及び大学等が参加し、明星電気、富士通、日本電気、住友重工業、日本飛行機が、ハイビジョンカメラをNHKが、それぞれ担当。
- ◆ また、有人月探査を検討するためのデータを取得するNASAの月周回衛星(LRO)とデータ共同処理・共同観測などの相互協力を行うと共に、SELENE で得られたデータを用いて国土地理院、国立天文台と共同開発で月面地図の作成を実施した。

### 【②月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」】

- ◆ JAXAにて全体システム検討や技術面についてバス機器の要素技術研究を実施中。科学面については、宇宙理学委員会の下に「SELENE-2理学評価小委員会」を組織し、評価を実施。また、宇宙理学委員会、宇宙工学委員会、宇宙探査委員会の委員を含む科学技術評価委員会を組織し、ミッションの妥当性について議論を行った。さらに、惑星科学会を中心とした外部コミュニティに対して「SELENE-2着陸候補地点検討」を依頼し、現在検討継続中。
- ◆ 今後、国際協力対応のコンフィギュレーション(打上げロケットに応じた探査機構成、ペイロード配分等)案等の検討を実施する。

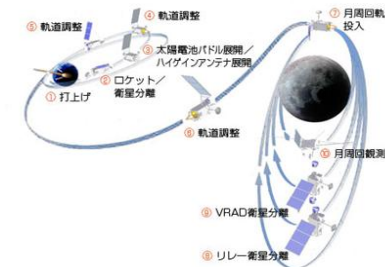
## 成果

### 【①月周回衛星「かぐや」】

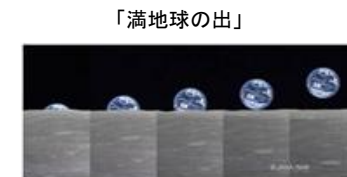
- ◆ 高精度な月の遷移軌道や月軌道投入、月周回中の姿勢制御・軌道制御・熱制御などの月探査基盤技術、月の裏側との通信技術などの技術を獲得した。
- ◆ また、科学的成果として、月全表面の鉱物分布や元素分布、磁場のこれまでにない高精度な観測や、世界で初めて月の裏側を含む重力の全球観測を行うなど、最高性能の月探査実施により、月の起源と進化に迫る新たな知見を獲得した。その成果は世界的にも認められ、平成22年2月に米科学誌「サイエンス」の特集号が組まれるなど大きな成果をもたらした
- ◆ さらに、ハイビジョンカメラによる「満地球の出」の撮影や、Google Moon への地形データ提供等により、広報・教育等の観点からも成果も上げた。

### 【②月面着陸・探査ミッション「SELENE-2」】

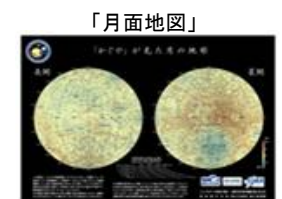
- ◆ 技術的には、重力天体への自律着陸技術、表面移動探査技術、越夜技術等)を獲得する。
- ◆ 科学的には、月の原材料物質の決定や地殻物質の詳細観測により、月の起源と進化の解明に資するとともに、環境観測による将来の有人月探査活動に必要な知見を獲得する。
- ◆ 国際的プレゼンスでは、国際協働月探査で必要となる技術の開発や月環境調査・計測等を実施し、我が国の国際的優位性を堅持する。



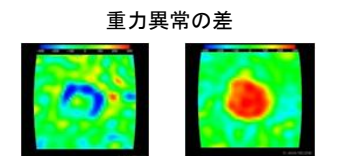
「かぐや(SELENE)」のミッションシーケンス



「満地球の出」



「月面地図」



重力異常の差

月の裏側にあるアポロ盆地

月の表側にある晴れの海



平成22年2月サイエンス特集号

## 2. 小惑星探査(「はやぶさ」、「はやぶさ2」、「イカロス」)

### 意義・目的

小惑星探査は、今後の宇宙活動における基盤技術となる惑星間航行技術において、これまでに蓄積してきた日本独自の惑星間航行技術をより確実なものとし、探査における我が国の自律性を確保する。具体的には、木星圏トロヤ群小惑星など、より遠方の未踏領域での始原天体探査を目指すことで、我が国の独自性と優位性を発揮しつつ、イオンエンジンやソーラセイルなどによる惑星間航行技術や自律航法技術などの新たな技術を牽引する。

- 「はやぶさ」：イオンエンジンによる惑星間航行技術、自律航法・接近・着陸技術、サンプル採取・回収技術等の工学技術実証  
「はやぶさ2」：「はやぶさ」で技術的に不完全であった日本独自の宇宙探査技術を確立し、国際的な優位性をさらに伸展させるとともに、地球、海、生命材料物質の起源を探るため、鉱物に加えて水・有機物の存在が考えられるC型小惑星(\*1)を世界で初めて探査  
\*1：「はやぶさ」の探査天体であるS型小惑星イトカワよりも始原的な小惑星タイプ。  
「イカロス」：ソーラセイル(超薄膜太陽帆)による航行(光子加速)やハイブリッド推進に向けた薄膜太陽電池での発電などの世界初・世界最先端の技術実証

### 世界における日本の位置づけ

#### 【①小惑星探査「はやぶさ」】

◆我が国は、「はやぶさ」による小惑星探査により、月以外の天体への離着陸・地球帰還を世界で初めて実施した。その際、技術的には不完全であったがイオンエンジン(電気エンジン)惑星間航行、自ら状況を判断しながらの離着陸、微小重力下における天体表面物質(サンプル)採取及び、はやぶさ試料回収カプセルによるサンプル回収等を実施した。これにより、誰も成しえたことのない未踏峰領域の探査を実現し、ロボティクス技術など最先端の惑星探査技術保持国として、世界のフロントランナーとして位置づけられている。

#### 【②小惑星探査「はやぶさ2」】

- ◆技術面においては、技術的に不完全であった「はやぶさ」を改良し、信頼性・運用性を向上させ、探査機技術を次のステップへ高め、世界で初めて衝突体を天体に衝突させる技術を確立し、衝突により表面に露出した地下物質のサンプル採取等を実施するとにより、日本独自の深宇宙探査技術を確立する。これにより小惑星探査における「技術開発」で世界のフロントランナーを維持・発展させる。  
◆科学面においては、世界に先駆けて有機物や含水鉱物に富んだC型小惑星の探査し、C型の微小な地球接近小惑星の特徴や、生命の原材料物質を明らかにすること等により、小惑星探査における「科学成果」で世界のフロントランナーとしての位置づけを維持・発展させる。

#### 【③小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」】

◆ソーラセイル(\*2)のアイデアは100年程度前からあるが、極めて軽量かつ極めて広い面積を保持できる薄膜鏡が必要であり、これまで実現されていなかった。小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」によって、世界で初めてソーラセイルによる光子加速等の技術実証を成功し、日本が当該探査技術を獲得した世界で唯一の国として、世界のトップに君臨している。

\*2: 風を受けて海を走る帆船のように、宇宙空間で大型の薄い膜を展開し、太陽からの光の粒子を反射する力で推進する宇宙船。

## プロジェクトの特徴

### 【①小惑星探査「はやぶさ」】

- ◆ 惑星間航行用推進系のイオンエンジン、姿勢制御用化学スラスタやリアクションホイール等に不具合が生じ、技術的に不完全ながらも、平成22年6月にカプセルを大気圏に突入し、オーストラリアのウーメラ砂漠に着地させ、月以外の天体への離着陸・地球帰還を世界で初めて実施した。
- ◆ 回収したサンプルの初期分析・キュレーション作業を行い、また、「はやぶさ」サンプル国際研究公募を実施し、国内外の研究者にサンプルの提供を開始した。

### 【②小惑星探査「はやぶさ2」】

- ◆ 技術的に不完全であった「はやぶさ」を改良し、信頼性・運用性を向上させ、探査機技術を次のステップへ高めるとともに、衝突体を天体に衝突させる技術を確立することで、キー技術及び最先端能力を獲得する。
- ◆ 世界に先駆けて有機物や含水鉱物に富んだC型小惑星の探査し、C型の微小な地球接近小惑星の特徴や、生命の原材料物質を明らかにする。

### 【③小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」】

- ◆ 将来の国際共同ミッションとして外惑星領域の小天体、木星圏衛星等の探査の実施に繋がる技術を獲得するプロジェクト。
- ◆ 太陽からの距離が増加するに伴い、太陽電池の発電量は低下するため、海外の探査機は原子力電池を利用しているが、ソーラセイルは燃料を使用せず効率的な加速能力を有している上、大面積のセイル面に薄膜太陽電池を貼り付けることで深宇宙でも大電力を確保する。

## ミッション概要

### 【①小惑星探査「はやぶさ」】

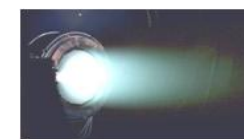
- ◆ 平成15年5月、M-V-5号機により打ち上げられ、イオンエンジンで航行の後、平成17年9月小惑星イトカワに到着、その後着陸・試料採取・離陸を行い、地球帰還に向け航行を開始した。地球の軌道により精密に近付ける軌道誘導を行い、平成22年6月にカプセルを大気圏に突入させ、オーストラリアのウーメラ砂漠に着地させた。
- ◆ 相模原キュレーション施設にて回収した初期分析・サンプルのキュレーション作業を行い、また、広く世界の専門家から、回収したサンプルの研究提案を募り、より優れた研究を選定する国際公募を実施し、国内外の研究提案を選定した。

### 【②小惑星探査「はやぶさ2」】

- ◆ 2014年に打上げ、2020年に地球帰還する計画。
- ◆ ミッションは、C型小惑星の組成(特に水、有機物)や重力等の科学観測、小型ローバによる調査、衝突体を衝突させた人工的にクレーターから太陽光や太陽風にさらされていない内部物質の観測及び同クレータからの試料採取からなる。
- ◆ 世界で初めて衝突体を天体に衝突させ、衝突により表面に露出した地下物質のサンプル採取等を実施する。



はやぶさ概念図



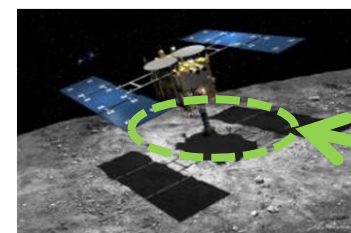
マイクロ波放電式イオンエンジン



「はやぶさ」が大気圏に突入した際に発した火球



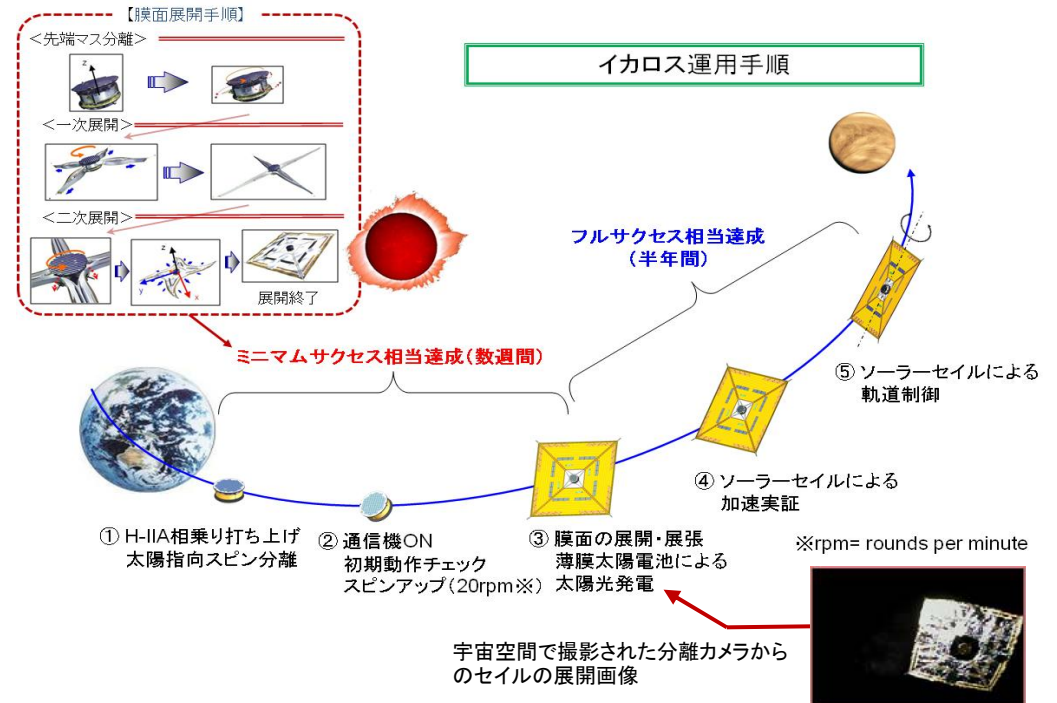
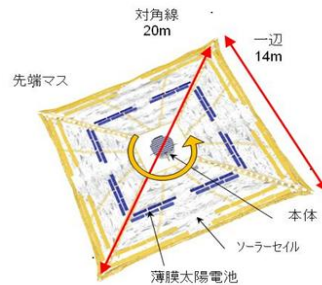
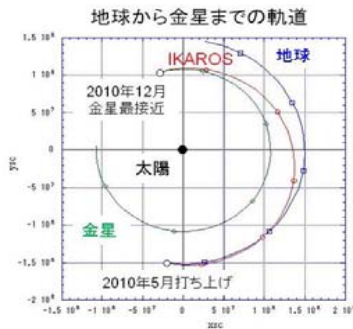
着地状態のカプセル



衝突体を作ったクレーター

### 【③小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」】

- ◆ 平成 22 年 5 月、金星探査機「あかつき」と共に、H-IIA ロケット 17 号機により打ち上げ
- ◆ 世界初となる大型膜面の展開、光子を利用したセイルの推進及び航行技術の獲得並びに電力セイル(大面積薄膜 太陽電池)からの大電力供給を小型衛星により実証した。



## 推進体制

### 【①小惑星探査「はやぶさ」】

- ◆ 主として、探査機システム・地上システムの開発取りまとめ・運用を日本電気が、探査機の開発・設計・製作を、NEC 東芝スペースシステムが、回収カプセルの開発をIHI エアロスペースがそれぞれ 担当。
- ◆ また、米国(NASA)との間で深宇宙追跡支援等(NASA)、試料提供等(JAXA)の相互協力を行うと共に、豪州との間では豪州内への着陸許可等の協力を実施するほか、国内の惑星科学や天文学に関する研究者により小惑星イトカワの観測データの解析・研究を進め、国内の大学や研究機関との間でサンプルの初期分析を共同で実施。

### 【②小惑星探査「はやぶさ2」】

- ◆ 国際協力においても「はやぶさ」と同様にNASAや豪州との協力のほか、独(DLR)の間でははやぶさ2への科学機器搭載(JAXA)、追跡局支援などとの相互協力を行う予定であるほか、「はやぶさ2」でも、始原天体探査に係わる幅広いコミュニティの研究者が、観測データの解析・研究や、採取したサンプルの分析研究に参加する予定。

### 【③小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」】

- ◆ 主として、探査機(主にバス機器)の開発・設計・製作を日本電気が、探査機の運用を富士通、日本電気がそれぞれ製作を担当。
- ◆ また、分離カメラは東京理科大学・東京工業大学と、展開機構は東京工業大学・早稲田大学・日本大学と、膜面は九州工業大学とそれぞれ協力し開発・設計・製作を行った。

## 成果

### 【①小惑星探査「はやぶさ」】

- ◆ 月以外の天体への離着陸・地球帰還を世界で初めて実施し、「5つ」の重要技術(\*1)の実証を達成しつつも、惑星間航行用推進系のイオンエンジン、姿勢制御用化学スラスタやリアクションホイール等に不具合が生じた。また、サンプル採取のための2度目のタッチダウン後、燃料漏洩により化学エンジン機能が復旧不能となり、地球へ帰路の軌道計画の大幅な変更を余儀なくするなど、技術的には不完全な結果となった。

- (\*1) 5つの重要技術
- A) イオンエンジンを主推進機関として用い、惑星間を航行すること。
  - B) イオンエンジンとスウィングバイの併用による加速操作を実証すること。
  - C) 光学情報を用いた自律的な航法と誘導で、接近・着陸すること。
  - D) 微小重力下の天体表面の標本を採取すること。
  - E) カプセルを、惑星間飛行軌道から直接に大気突入させ、サンプルを回収すること。

- ◆ 一方で、はやぶさ地球帰還においては、技術的に不具合が生じている状況の中で地球帰還への精密軌道誘導を行い、平成22年6月にカプセルを大気圏に突入・豪州ウーメラ砂漠に着地させ、月以外の天体への離着陸・地球帰還を世界で初めて実施し、惑星間航行・誘導運用についての技術的知見を得た。
- ◆ 米科学誌「サイエンス」の特集号が発行され、「はやぶさ」の観測データにより惑星の形成過程等に関する新たな知見や、回収した微粒子からの初期分析結果に関する論文が掲載された。また、世界一級の科学者が「はやぶさ」サンプル分析で最大の科学成果を上げられるよう、国内外専門家との調整を通じて国際研究公募の枠組みを設定し、国内外からの研究提案を選定。
- ◆ 平成22～23年度、「はやぶさ」帰還カプセル展示を69か所実施。見学者は約89万人となり、社会的反響も大。

### 【②小惑星探査機「はやぶさ2」】

- ◆ 「はやぶさ」で試みた宇宙探査技術の確実性、運用性等を向上させ、小惑星への往復探査技術を成熟させる。
- ◆ 天体への衝突実証により内部物質に関する新たな知見を得る手段、方法を実証する。
- ◆ C型小惑星について、表層地形、物性、内部構造を探査による小惑星の形成過程や、表層及び内部の物質を採取による地球、海、生命の材料物質に関する新たな科学的知見を得る。科学観測データ及びリターンサンプルの詳細分析を国際的に実施することで、国際社会に貢献し、責務を果たす。
- ◆ 科学技術立国を担う次世代の人材を育成するとともに、日本のイオンエンジン技術を海外衛星の搭載するなど、産業・経済へのインセンティブを得る。

### 【③小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」】

- ◆ 小型ソーラー電力セイル実証機（IKAROS）は、平成22年5月に打ち上げられ、約半年間で、(1)大型膜面の展開・展張、(2)電力セイルによる発電、(3)ソーラーセイルによる加速実証、(4)ソーラーセイルによる航行技術の獲得の4つの主ミッションを行い、いずれも世界で初めて成功した。

