

我が国の月探査戦略

～世界をリードするロボット月探査と有人宇宙活動への技術基盤構築～

(案)

平成22年 月 日
月探査に関する懇談会

目 次

1. はじめに.....	1
2. 月探査の目的.....	1
3. 月探査の目標と取組.....	2
3. 1 月探査の目標.....	2
3. 2 目標実現に向けての進め方.....	4
(1) 2015年のロボット月探査.....	4
(2) 2020年のロボット月探査.....	5
(3) 2020年より後の探査の進め方と最適なロボットの活用.....	6
3. 3 民生技術の活用とオープンな研究開発の体制.....	7
(1) 幅広い知見を結集し得るオープンな研究開発体制.....	7
(2) 評価体制の整備.....	7
3. 4 月の開発・利用に関する国際ルールの形成に向けた取組.....	7
3. 5 月探査による波及効果.....	8
(1) 次世代民生技術の革新.....	8
(2) 次世代の人材の養成.....	8
4. 有人宇宙活動への技術基盤構築.....	8
(1) 第1ステップの技術基盤の構築.....	9
(2) 研究開発の目標.....	9
(3) ロボット月探査等との連携による効率的な研究開発.....	9
5. おわりに ～我が国の宇宙開発戦略上の位置付け～.....	10
参考1. 月探査と有人宇宙活動のこれまでの取組と動向.....	11
(1) 我が国の取組.....	11
(2) 世界の取組と動向.....	11
参考2. 次世代技術の革新に期待される波及効果の例.....	13
(1) ロボット技術の革新.....	13
(2) エネルギー技術の革新.....	13

1. はじめに

昨年宇宙開発戦略本部で策定された宇宙基本計画において、有人を視野にいたしたロボットによる月探査について、1年程度をかけてより具体的に検討を行うこととされた。

これまでの月探査活動には、大きく2つの段階がある。第1段階は1960年代を中心とした冷戦中の米ソの宇宙競争の段階であり、科学よりも国威発揚が大きな動機となっていた。第2段階は1990年代以降であり、日本が立ち上げた月探査計画に続く形で科学や利用などの観点から米国・欧州・中国・インドなどが月探査活動を活発化させ、現在に至っている。

当懇談会では、このような最近の国際的な動向をも見つつ、従来の狭義の宇宙技術だけでなく、ロボット技術、エネルギー技術など、我が国の技術力を総合的に結集して初めて、このミッションを達成することができるとの認識の下、検討を行ってきた。

月探査は、今日の生活をすぐに豊かにするものではないが、明日への希望と未来を切り開く宇宙というフロンティアに日本が技術、科学の持てる総力を結集して取り組むことは、そのこと自体大きな技術力の獲得、科学的知見の獲得に貢献し、世界における日本の地位や交渉力の向上をもたらすだけでなく、宇宙開発以外の他の分野をも巻き込んで地上の技術イノベーションにつながることを期待できるものであり、さらに、次世代の子供や若者に大きな感動を与え、活力を与えるものである。

2. 月探査の目的

<月探査の目的>

太陽系の成り立ちなどを解明するためには、様々な天体の探査を行うことが重要である。その中でも、地球に最も近い重力天体である月において、

- ① 太陽系探査のための宇宙技術を自ら確立
- ② 世界トップレベルの月の科学を一層発展
- ③ 国際的プレゼンスの確立

という3つの目的から、月探査を戦略的に進めることが重要である。

①太陽系探査のための宇宙技術を自ら確立

我が国は「はやぶさ」による世界初の小惑星からのサンプルリターン技術の確立などを着実に進めているが、今後本格化する太陽系探査の対象となる重力の比較的大きな天体（重力天体）への着陸探査・帰還に係る技術はまだ有しておらず、我が国が太陽系探査を自ら推進するとともに、世界に貢献していくためには、我が国自らの技術として、重力天体への往還技術などを今後確立していく必要がある。

月は地球に最も近い重力天体であることから、重力天体への軟着陸技術、重力天体からの帰還技術、高い信頼性を有する惑星探査ロボット技術とともに、日本が得意とする民生技術をいかした燃料補給の不要な再生型燃料電池技術や軽量・高効率な太陽電池技術など、今後の太陽系探査に必要な新たな宇宙技術を確立する場として最適であり、将来の自在な太陽系探査への重要なステップとして、これらの技術の確立を目指すことが必要である。

②世界トップレベルの月の科学を一層発展

天体毎にそれぞれの探査目的がある中で、月は地球に近い成り立ちを持ちながら、火山活動や地殻変動などが早期に終了したため、進化の初期過程の痕跡が残っており、地球を含む固体惑星の誕生と進化の解明にとって重要な研究対象の一つである。月探査に関する国内外のこれまでの取組については参考1に示す。

1960年代を中心に、冷戦の流れの中で、既に米国のアポロ計画や旧ソ連のルナ計画などにより探査が進められてきたが、着陸して詳細に探査した範囲が限られていることや、当時の観測機器の能力の限界もあり、科学的に未解明の部分が多く残されている。我が国は「かぐや」による月全球についての遠隔観測の成果により月の科学で世界をリードしているが、中国、インドなど複数の国が月を目指す中、探査活動が停滞すれば、月の科学での日本の優位性を維持発展することは困難となる。我が国としては、これまでの成果を基に、世界で初めてロボットにより探査基地を構築して探査を進めることで、世界トップレベルの月の科学を更に発展させることが重要である。

③国際的プレゼンスの確立

複数の国が月を目指し、科学探査のみならず、資源利用調査などの点でも国際的に競争や協力が活発化しつつある中、今後月とその資源の開発・利用に関する国際ルール作りが進展していくと考えられる。こうした状況の中で、継続的な月面での活動を行うことは、協調的な国際ルール作りなどで世界を先導していくために不可欠であり、国際的プレゼンスの観点からも重要である。

「かぐや」の成果を基とした科学探査活動の段階的なステップアップや、将来想定される人とロボットの連携による高度な探査活動にもつながる取組により、宇宙先進国、技術先進国として、国際協力におけるリーダーシップの発揮や外交力の発揮を可能とすることが重要である。

また、各国が独自に進めるであろう月探査活動において、我が国が月面でのロボットによる探査活動の有機的な国際協力を提案するなどにより、世界全体で研究成果を高める国際コーディネータ役を目指していくことが重要である。

3. 月探査の目標と取組

3. 1 月探査の目標

<月探査の目標>

2020年に月の南極域に世界で初めてロボットにより探査基地を構築し、地震計などの観測機器を設置して1年以上の内部構造探査、ロボットによる数ヶ月間の周辺探査、これまで人類が手にしたことのない岩石の採取とサンプルリターンを行う。これにより、今後の太陽系探査に重要なステップとなる宇宙技術を確立すると共に、月の起源と進化の解明にせまる。

月探査の目標を定めるに当たっては、①2020年に月の表側からのサンプルリターンを実現し2025年に月の裏側からのサンプルリターンを実施する案、②2020年に月

の南極域に基地を構築し2025年に月の裏側（南極エイトケン盆地）からのサンプルリターンを実現する案を中心に検討を行うとともに、別途実施された学生を中心とする月探査ナショナルミーティングや一般国民へのアンケート調査なども検討の参考とした。これらを踏まえ、更に月探査の目的を最大限効率良く、できる限り低コストで早期に達成することを目指した検討を行った。すなわち、今後の太陽系探査のための宇宙技術として重要な、重力天体への往還技術、長期ロボット探査技術などを効率良く早期に確立できる進め方とすること、世界トップレベルの科学的成果を、効率的かつ早期に獲得できる進め方とすること、また、持続的な月面活動により、時期的にも内容的にも国際的に存在感のある進め方とすることを検討した。なお、科学的には、月の起源の解明には内部構造探査が、月の進化の解明には異なる年代の岩石の分析が決定的に重要であることを勘案した。

その結果、以下のような点を総合的に勘案し、できる限り低コストで最大限の結果を早期に得るために、まず2020年まではロボットによる月探査を実施することとし、月探査の当面の目標を冒頭のように定めて進めることとする。

技術的には、

- ・ サンプルリターンを実現する往還技術、長期のロボット探査技術を2020年に実現することは可能であること。
- ・ ロボットにより構築する基地を活用することで、多様で長期にわたる探査や作業が可能になると考えられること。

科学的には、

- ・ 南極域に構築する基地を用い、長期間の日照が確保できる場所でエネルギーの確保を行い、地球との通信や月面での岩石分析を可能とし、長期間のロボット探査や内部構造探査を実現することで、以下のように世界に類を見ない科学的成果を獲得できる可能性が高いこと。
 - 南極域は、月の裏側からも多様な物質が飛散してきている可能性が高く、周辺を長期間探査することができれば、例えば月の裏側のマンツルの岩石（月内部の深部の物質）や形成年代の古い石から新しい石まで、これまで人類が手にしたことのない科学的価値の高い岩石を採取できる可能性が高い。
 - 南極域は、今まで観測できていない月の裏側で発生した地震を直接計測できる可能性があるなど、地震計などを使った内部構造探査の場所としても価値が高い。
 - 南極域において形成年代等の多様な岩石が採取できれば、その岩石を地球に持ち帰って詳細分析を行うことで、月の起源・進化の解明にせまるような科学的成果を得られる可能性が高い。（なお、月の裏側での探査は、直接月の裏側の岩石を採取可能であるが、地球からは見えない領域への通信確保の観点から、月周回軌道上に複数のデータ中継衛星が必要となり、そのための費用が大きくなるため、その実施については、2020年の探査の成果を見極めつつ2020年より後の発展的な探査の1つとして検討することが適当である。）
 - 2020年にこれらの内部構造探査やサンプルリターンが実現すれば、引き続き世界トップレベルの科学的成果による国際貢献が可能である。

なお、当面我が国独自で達成可能な目標とするものの、特に内部構造探査など、国際協力によりいっそうの価値のある科学的成果が見込めるものについては、国際協力を呼びかけることも検討する。

3. 2 目標実現に向けての進め方

2020年の月探査の目標は、重力天体への往還技術を実現していない我が国にとって技術的に極めて難易度の高い目標であり、トップレベルの科学的成果を獲得するためにも、技術を段階的に確立し、確実に探査活動を遂行していくことが必要である。このため、目標の5年前には前段階として必要な技術実証を実施し、その結果を5年後の本格的探査に反映させる進め方とし、2015年に軟着陸とロボットによる予備的な探査を実施する。

(1) 2015年のロボット月探査

＜月の表側での探査活動：月面へのピンポイント軟着陸、短期間のロボット探査＞

2020年の本格的探査に向け、2015年に以下のような世界をリードできる成果の達成を目指すと共に、利用に向けた環境調査などを実施する。

① 技術

＜世界初＞

- ・ 世界初の100m級の最高精度での月面無人自動軟着陸
- ・ 世界初の再生可能エネルギーのみによる越夜（2週間続く極寒の夜を越える）
 - 従来、越夜には原子力電池が使われているが、世界で初めて太陽光発電と蓄電池（リチウムイオン電池）のみによる、観測機器の越夜を行う。

＜我が国初＞

- ・ 我が国初の重力天体でのロボット探査と最新鋭の地震計等による観測
 - 月探査ロボットは、目的を確実に達成し、かつ限られたリソースの中で最大限の機能を発揮できるように、軽量・低コストで、かつ高い信頼性を有する効率の良いものとする必要がある。
 - 地上での技術を過酷な条件の宇宙仕様とするために、5年程度の時間を要することを考えると、5年程度前には地上においてその技術の見通しが立っている必要がある。
 - したがって、ロボットについては、月探査を確実に実行するという観点でローバタイプのロボットで実施する。

② 科学

＜世界初＞

- ・ 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とともに、「マグマの海」の冷却に伴って直接形成された岩石を採集分析し、月の地殻が形成された過程の実態を明らかにする。

③ その他

<世界初>

- ・ 「かぐや」による月周回軌道上からの世界初のハイビジョン映像配信に続き、月面からのハイビジョン映像を世界で初めて地上に配信する。

資金規模は、2015年頃までに約600～700億円程度と試算。

(2) 2020年のロボット月探査

<月の南極域での探査活動：基地構築、長期観測、長期サンプル探査、サンプルリターン>

2020年に以下のような世界をリードできる成果の達成を目指す。

① 技術

<世界初>

- ・ 世界初の基地構築と、数ヶ月間の総走行距離100kmを超えるロボット探査
 - 月の南極域の日照条件の良い場所を選んで、電力エネルギー供給機能、地球との通信機能、岩石の分析機能を備えた基地を世界で初めてロボットで組み立て、設置する。
 - ロボットについては、現時点では技術の実現性や確実性の観点から2015年のロボットの発展型であるローバタイプが有力であるが、今後のロボットの技術開発の進展を十分見定めつつ、2015年頃を目処に適用可能な最適な技術を選定する(*1)。
- ・ 世界初の再生可能エネルギーによる長期間のエネルギー供給
 - 太陽光発電と再生型燃料電池、リチウムイオン電池の組合せにより、ロボット・観測機器に世界で初めて越夜を含め1年間以上にわたり1kW級の持続的なエネルギーを供給する。

<我が国初>

- ・ 我が国初の重力天体への往還（サンプルリターン）

② 科学

<世界初>

- ・ 高性能化した地震計等による内部構造探査を1年以上行い、それまでの観測データと合わせて、世界で初めて、月の密度の分布、月の中心核の大きさ、状態（固体・液体）やマントル構造を明らかにし、原始惑星と地球の巨大衝突で飛び散った物質が集まって月が誕生したとされる月の起源（ジャイアント・インパクト説）を検証する。
- ・ ロボットが基地周辺を探査し、月の裏側に存在する太陽系最大のクレーター（南極エイトケン盆地）に由来する内部物質や、形成年代の古い岩石から新しい岩石まで多様な岩石を採取する。採取した岩石を、基地に備えた分析装置を利用して世界で初めて月面で自動選別し、これまで人類が手にしたことのない価値の高い岩石をサンプルリターンすることにより、月の進化の謎にせまる。

③ 利用

<我が国初>

- ・ 我が国で初めて、岩石の組成分析などにより月資源利用の可能性を探る。

④ その他

<世界初>

- ・ ロボットの活動など、世界初の月面からの臨場感のある定期的なハイビジョン中継
- ・ 世界初のインフラのリソース提供による月面公募プロジェクトの検討
 - 最先端の技術や独創的な技術などを将来の探査技術にいかすための工夫として、メインミッション以外にも、月面での実証実験ができるよう、例えば公募して選定されたヒューマノイドロボットや高速移動ロボットなどのプロジェクトに対し、スペース・電力等のインフラのリソースの一部を提供することを検討する。

資金規模は、2020年頃までに累計約2000億円程度と試算。(ミッションの実現には、活動を支える重量級ロケットの開発や深宇宙用の追跡管制設備の整備を、並行して進めることが必要)

(3) 2020年より後の探査の進め方と最適なロボットの活用

① 2020年より後の探査の進め方

科学的成果、技術蓄積の状況、各国の動向、国際協力の状況などを見極めつつ、より高度なロボットによる探査、有人による探査の在り方などについて検討を行い、2020年より後の更なる発展的探査を目指すとともに、獲得した技術を幅広い太陽系探査の技術基盤として活用し発展させる。

② 最適なロボットの活用

2020年より後のロボットについては、月探査の成果や月探査ロボットの活動成果、地上のロボット技術の進捗などを踏まえ、最適な技術について検討・選定する(*1)。

(*1) 月探査ロボットについて：

月探査ロボットは、月面の過酷な環境下で、高い信頼性を有し、様々な状況に対応できる高度なシステムとする必要があり、多様な作業を的確に実行する操作機能と、広範囲の移動が可能な移動機能とともに、人による修復が不可能な中での自己回復機能を持ったロボットを実現する。

操作機能については、ロボットに要求される探査基地の組み立て、観測機器の設置、岩石の採取・研削・観察などの多岐にわたる作業が必要となり、センサ類なども含め地上の先端技術を宇宙用途に取り入れつつ、「きぼう」のロボットアームなどの技術の実績を踏まえ、それを発展させることで実現を図る。

移動機能については、月面の不整地で総走行距離 100km を超える広範囲な移動能力が必要であることを踏まえれば、ローバタイプのロボットが地上での技術成熟度も高く、最も実現性が高い。また、脚タイプ、特に二足歩行タイプのロボットについては、2020 年までの実現を目指すためには、不整地・砂地における歩行の実現性を早期に見極める必要がある。なお、今後の地上サービスロボット等での技術開発の進捗次第では、2020 年より後に、人との連携などが想定される場合には、二足歩行タイプの活用も考えられる。

自己回復機能については、人が直接修理できない部品の故障や砂地で身動きが取れなくなるなどのトラブルに、自ら対処できる高度な自己回復能力の実現を図る。

月探査ロボットは、地球からの指示に基づいて、周辺の地形や自分の姿勢などの情報を基に自ら判断・作業を行う高度な自律性を備えたシステムとする必要があり、従来の宇宙用ロボットの知見に加え、地上の最先端の知能ロボット等の研究成果を積極的に取り込んで研究開発を進める。

3. 3 民生技術の活用とオープンな研究開発の体制

(1) 幅広い知見を結集し得るオープンな研究開発体制

目標を実現するために必要なロボット技術やエネルギー技術などについては、従来のいわゆる宇宙技術とは異なり、民生分野での企業や研究者なども多く、技術的に裾野も広いことから、我が国の優れた民生技術、幅広い知見を総結集することが重要であり、宇宙関連以外の大学・企業からの公募や共同研究などをより積極的に取り入れるオープンな研究開発体制を構築する。また、可能な限り最新の技術を取り入れられるように、要素技術やサブシステムのインタフェースを標準化したモジュラー型の研究開発手法についても検討する。加えて、宇宙技術として開発されたシステム、装置、ソフトウェアなどの技術成果を、スピノフを通じて再度民需に還元し、地上の技術革新につなげるために、成果の積極的な活用促進を行う。

更に、メインミッション以外に一部提供されるリソースを活用したプロジェクトの実施に当たっては、若手研究者・技術者の育成や宇宙開発の裾野の拡大などの観点も踏まえ、広く提案・参加を募り、選定していくような仕組みについて検討する。

(2) 評価体制の整備

特に月探査に最適な技術を選定するまでのフェーズにおいて、研究開発の目標設定と研究開発の状況に関して、幅広い外部の有識者を含めたオープンな評価を行い、次の研究開発計画に反映していく体制を整備する。

3. 4 月の開発・利用に関する国際ルールの形成に向けた取組

現在、月とその資源の開発・利用などに関して定めた月協定を批准している国は非常に少なく、我が国も含め、実際に月探査に取り組んでいる国々はまだ批准していない状況である。今後、各国が月探査に取り組む中で、月やその他の天体の開発・利用に関しての実効性のある国際ルールが必要となってくると考えられることから、我が国は継続的な月探査への取組を通じて、国連宇宙空間平和利用委員会等における国際ルール作りにおいてリーダーシップを発揮し、平和利用を軸とした我が国の方針を反

映できるように取り組む。

3. 5 月探査による波及効果

月探査の取組を通じて、以下の波及効果が期待される。

(1) 次世代民生技術の革新

ロボット技術やエネルギー技術などについては、昼夜の激しい温度差など、月の過酷な環境や高い信頼性要求に対応することによるステップ的な革新が、地上における次世代の民生のロボット技術、エネルギー技術のイノベーションや新たな産業の創出などに繋がるとともに、新素材や新技術などが地上の国民生活の向上にも資することが期待される。期待される波及効果の例を、参考2に示す。

(2) 次世代の人材の養成

月探査の取組を通じた宇宙技術の確立、世界トップレベルの科学的成果、国際的プレゼンスの確立は、国民に自信を与えるものであり、また、探査活動の臨場感のある高頻度かつ高精細な映像を長期間国民に提供することは、あたかも自らが月に行き探査をしているような疑似体験を可能とするものである。これらの取組は、特に次世代を担う子供や若者が活力ある未来への夢や希望を持ち、それに向かって歩き出すきっかけを与えるものであり、次世代の我が国を支える人材の養成につながることを期待される。

また、我が国の将来の高度な宇宙活動を持続的に支えるためには、高度な専門性を備えた宇宙関連の技術開発や科学研究に携わる人材の他、国際協力においてコーディネータ役を果たせるような視野の広い人材の層を厚くし、その人材の基盤を継承・発展させていくことが重要であり、月探査の取組においてもこの点の配慮が必要である。

4. 有人宇宙活動への技術基盤構築

<有人宇宙活動への技術基盤構築の目標>

2020年頃までに、有人宇宙活動の根幹となる有人往還システムについて鍵となる要素技術等の基礎段階の研究開発に取り組み、実現の見通しを得る。

今後の我が国の有人宇宙活動そのものをどう進めていくかといった本格的な検討は、国際宇宙ステーション（ISS）計画の運用延長への対応に加え、有人探査の目的、その実施場所の検討などを必要とする。本懇談会では、月探査に絞らずに有人宇宙活動全般について広く議論を行ったが、月探査に関する懇談会の検討範囲を越えるものでもあり、有人宇宙活動そのものについて本格的な検討は行わなかった。しかしながら、我が国が宇宙先進国として有人宇宙活動を可能とする技術を保有することの重要性や、有人技術の保有に向けた現実的な進め方については一定の議論を行い、以下の結論を得た。

月探査については、ロボット探査で多くの成果を上げることが可能と考えられるが、

仮に月で有人探査を行う場合を想定すると、人の経験や知識に基づき、その場での高度な判断を必要とする質の高い探査活動を行える可能性がある。また、有人探査を含めた有人宇宙活動への取組みは、厳しい環境や要求に挑戦することを通じて最先端科学技術をさらに進化させ、将来の環境・エネルギー問題、医療問題などの解決の鍵を提供できる可能性を秘めている。さらには、有人宇宙活動を通じ、国境のない一体としての地球の大切さを認識し、新たな世代を中心に、将来の地球や人類全体の安全保障・生存保障に向け、国際協力をリードしていくことも重要である。

このように意義のある有人宇宙活動であるが、その取組には巨額のコストがかかることから、我が国一国で取り組むことは非現実的であり、国際協力が必須となる。このような中、我が国は、宇宙先進国・科学先進国として、将来の国際協力において諸外国と対等のパートナーシップを発揮できるようにするため、有人宇宙活動を可能とする技術的能力を確保することが、今後の宇宙開発の展開には必須である。しかし、現状、我が国はISS計画への取組により地球低軌道上で活動する能力を獲得したが、未だ宇宙空間に自力で出て行き、帰還するという技術を有していない。

このため、まずは将来の有人による探査にもつながる安全かつ低コストで有人宇宙活動を実現するための技術基盤の構築を着実に進めていくことが重要であり、今後10年程度は、我が国の自律性を確保し、国際協力において対等のパートナーシップを発揮するための鍵となる要素技術等は独自に確立することを目指し、技術基盤の構築の第1ステップとして、基礎段階の研究開発に取組む。その成果を踏まえ、技術基盤の構築の第2ステップとなる実機規模の研究開発についての見通しや、その後の実際のシステムを開発する段階での国際協力上の戦略を立てることが必要である。

なお、これまでの有人宇宙活動への取組や国際動向については参考1に示す。

(1) 第1ステップの技術基盤の構築

有人宇宙活動に関わるシステムの中でも、有人ロケットや有人宇宙船などの有人往還システムは、探査目標にかかわらず、有人宇宙活動の根幹となるシステムであることから、その鍵となる要素技術等の研究開発に重点を置くこととし、システム検討とともに有人に特有なエンジンの安全化技術、緊急脱出技術、生命・環境維持技術、帰還の安全化技術などの研究開発から進める。

その他の有人探査システムなどの技術については、ISSの活動やロボット月探査の実現により基本的な技術を蓄積しつつ、具体的目標が明確になった時点で、それまでに蓄積した技術を発展させ、本格的な研究開発に移行することを検討する。

(2) 研究開発の目標

2020年頃までに、有人往還システムの鍵となる要素技術等の実現の見通しを得ることを目指し、まずは基礎段階の研究開発に取り組む。なお、適宜研究開発の進捗や国際的な動向などの状況を踏まえて見直すこととする。

(3) ロボット月探査等との連携による効率的な研究開発

研究開発を進める上で、ロボット月探査の取組等を通じて得られる成果、国際宇宙ステーションや基幹ロケット等への取組から得られる成果等を研究開発に有効活用し、これらの取組と密接に連携しつつ、着実かつ低コストに研究開発を進めるこ

とが重要である。なお、研究開発の過程で必要となる宇宙での技術実証に当たっては、これらの宇宙活動の機会を有効に活用することにより、研究開発を効率的に進めることとする。例えば、有人宇宙船の要素技術の一つである帰還の安全化技術の確立に向けて、現在、国際宇宙ステーションへの物資の輸送・補給を担っている宇宙ステーション補給機（HTV）を活用して、帰還の安全化技術につながる再突入技術の実証を行うことなどが考えられる。

このような効率化を図ることで、2020年頃までの資金規模としては、900億円程度と試算。（なお、その後の実機規模の研究開発のための第2ステップには、数千億円規模を要する見通し。）

5. おわりに ～我が国の宇宙開発戦略上の位置付け～

我が国の宇宙開発戦略では、国民生活の向上や安全保障の確保など、地上生活の便益を高めることを直接的な目的とした地球周回や静止衛星を使った利用システムなどへの取組、及び宇宙科学や有人宇宙活動のように、すぐには地上の便益には繋がらないものの、宇宙という無限のフロンティアへの挑戦により先端的な科学技術の研究開発を行うことを通じて新しい技術のブレークスルーをもたらすと共に、次世代を担う子供達や若者に夢や希望を与えるような取組がある。

月探査への取組と有人宇宙活動への取組は、後者のフロンティアへの挑戦という点において、科学や利用面の重要性はもとより、以下のような技術面での重要な位置付けを持つこととなる。

- ①ロボット月探査は、天体への往還と活動の技術という将来の自在な太陽系探査を可能とする技術の自らの確立に向けた重要なステップとなる。
- ②有人宇宙技術については、国際宇宙ステーションでの活動に加えて、宇宙空間への往還に必須な技術の獲得に向けた蓄積を着実に図ることにより、将来の有人宇宙活動に向け、国際協力において対等なパートナーシップを発揮できる技術基盤を構築することが可能となる。
- ③これらの取組を通じて、我が国は、長期的には、ロボットによる自在な宇宙活動、及び有人による国際協力での自律的な宇宙活動を展開する能力を持つことにつながり、国際的にさらに大きな役割を果たすことが可能となる。

参考1. 月探査と有人宇宙活動のこれまでの取組と動向

(1) 我が国の取組

①これまでの月探査への取組と成果

1990年に打ち上げた月探査機「ひてん」により、米ソに続く月周回・月面到達を達成した。2007年に打ち上げた「かぐや」では、月全表面の鉱物分布／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、これまでの最高性能の月探査を行った。

また、「かぐや」では、科学的成果以外に、月周回軌道への投入技術の確立、月の裏側での通信技術の確立などの技術的成果も上げるとともに、ハイビジョンカメラによる「地球の出」などの撮影や、Google Moonへの地形データ提供などにより、広報・教育などの観点での成果も上げている。

②我が国の有人宇宙活動への取組

我が国は、独自の有人輸送手段は有していないものの、国際宇宙ステーション（ISS）計画等の取組を通じて、これまで着実に有人宇宙技術を蓄積してきている。日本の実験棟「きぼう」の開発・運用や宇宙ステーション補給機（HTV）のドッキングに加え、日本人宇宙飛行士の長期滞在など、ISSで主要な役割を果たしてきており、日本の技術力や存在感が高まってきている。「きぼう」の完成により、今後本格的にその利用を進めていく段階に入ると同時に、日本人によるISSへの長期滞在も始まり、日本の有人宇宙活動も本格的に展開される時代に入ってきている。

(2) 世界の取組と動向

①諸外国の月探査への取組と動向

1959年～1976年までの第1段階では、月は米ソによる宇宙開発競争の舞台となった。当時は国威発揚、月面有人到着が優先され、科学的な探査は十分ではなく、月のごく一部にとどまった。月探査はそれ以降十数年間行われることはなかったが、第2段階として、1990年代に入り、日本が立ち上げた月探査計画（1990年～1993年：ひてん）を皮切りに、米国の2機の探査機（1994年～1996年：クレメンタイン、1998年～1999年：ルナプロスペクタ）に引き続き、欧州（2003年～2006年：SMART-1）、中国（2007年～2009年：嫦娥1号）、インド（2008年～2009年：チャンドラヤーン1号）も独自に月探査機を送り込んだ。また、米国は月の水資源探査や有人基地建設のための調査、火星有人探査への布石などから、その後も2009年に月周回の探査機（LRO）や南極のクレーターの水の調査のための探査機（LCROSS）を送り込んでいるが、月着陸探査を行うミッションはなかった。ここに来て、米、ロ、欧、中、印が着陸探査も含むミッションを検討している。なお、米国の有人月探査については、③に詳しく述べる。

②諸外国の有人宇宙活動への取組と動向

有人宇宙活動の歴史を振り返ると、米ソを中心とした科学的・技術的動機をしのごく政治的あるいは軍事的動機、すなわち、国力の顕示、国威の発揚などをその

背景として進められてきた側面が強い。有人宇宙技術は冷戦時代の米ソの宇宙競争により確立され、数年前までは米露の二大宇宙大国のみが保有するものであった。近年、科学技術の進展にともない、中国が世界で3番目の有人宇宙飛行達成国となったことに加え、欧州やインドでも独自の有人宇宙飛行に向けた研究開発が進められている。また、米国では既に民間企業がISSへの飛行士の輸送のみならず、宇宙旅行をも目的とした弾道飛行や低軌道への有人宇宙活動に向けた研究開発に取り組んでいる。

③米国の取組と動向

(ア) アポロ計画

アポロ計画は、1961年から1975年にかけて行われた、人類を月面に到着させることを目的とした米国の宇宙飛行計画である。アポロ計画では、のべ40万人、総額約200~250億ドル（現在の価値では1000億ドル以上）をかけ、27人を月へ送り、そのうち12人が月面に降り立った。月面での滞在時間は、6回の合計で約12.5日であり、短い滞在時間の中で可能な限り観測や調査が行われ、約400kgの月の石、砂が地球に持ち帰られた。但し、詳しく調べたのは月の表側の赤道域から中緯度域のみに限られ、また、当時の観測機器の能力の限界もあり、科学的な探査は十分ではなかった。なお、アポロ計画を進めることにより、広範囲にわたる技術や信頼性、特にシステム工学と呼ばれる分野の発展がなされたとともに、LSI等の半導体の発展、燃料電池など現代社会の技術基盤の発展を加速したと言われている。

(イ) 宇宙探査計画の見直し

これまで米国では、新規開発の有人宇宙船とその打上げロケットなどにより、2020年までに有人月探査を目指すコンステレーション計画を推進してきた。しかし、2009年に発足したオバマ政権では、宇宙探査計画の見直しを行い、本計画については、計画の遅延、多大なコスト超過が指摘されていることなどから中止を発表。代わって、将来の有人探査に向けた先駆的なロボットによる探査ミッションも含む革新的な技術開発を立ち上げ、2030年代半ばまでに宇宙飛行士を火星の軌道に送り込み、その後火星への着陸も目指す方針を発表。

オバマ政権の宇宙探査、有人宇宙活動等に関する構想の主な点は以下の通り。

- ・探査に関する研究開発として、基幹技術実証プログラム、重量級ロケットの推進系などに係わる研究開発や、月もその候補の一つとなっている先駆的ロボット探査ミッションを新たに推進。なお、推進系などの研究開発を受け、2015年以降に重量級ロケットの開発段階に入る。
- ・ISS計画を2020年まで、若しくはそれ以上、各国の協力の下に延長。スペースシャトルは、2011年度までの打上げで退役。コンステレーション計画に向け開発を行っていたオリオン宇宙船を、ISSからの緊急脱出用に転換。
- ・民間部門における貨物輸送能力の向上に伴い、民間における有人輸送機開発を加速。NASAは、これらに対して有人安全の確保を担う。

参考2. 次世代技術の革新に期待される波及効果の例

(1) ロボット技術の革新

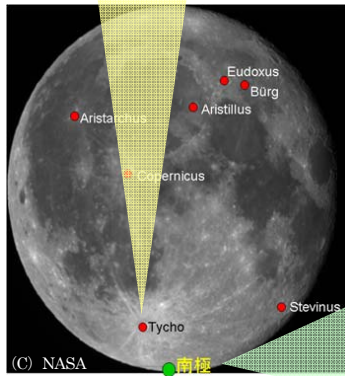
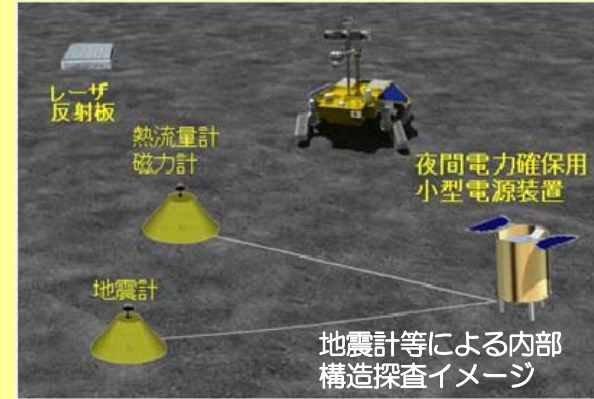
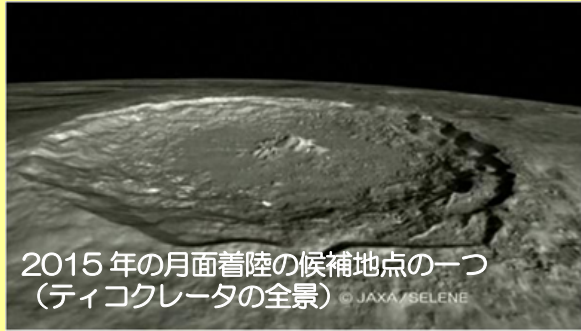
- ・ 月面で自在に移動可能なロボット技術の高度化は、砂地まで含めた不整地での着実な移動を可能とし、農林業機械/ロボット、建設機械/ロボットや、国民の安心・安全に資する災害救援ロボットなどの屋外作業機械/ロボットの移動性能の向上に繋がる。
- ・ 月面の厳しい放射線環境に耐える耐放射線技術や高信頼性化技術は、原子炉ロボットなどの放射線環境で機能する機器の耐性を向上させるだけでなく、異常検知・誤り訂正技術として醸成され、各種の機械の信頼性向上に繋がる。
- ・ 月面の高真空環境用の機構要素技術は、塵を嫌う半導体や液晶パネル製造などの産業用ロボット技術に繋がる。
- ・ また、これらに加えて、月面の宇宙機システムとして、電力、通信、熱制御、構造、ソフトウェア、操作系などを統合した上で低消費電力化を行う省エネ技術や、故障時に自己修復・自己回復可能とする高信頼性システム技術などは、より高度化、複雑化する各種の地上システムの発展に繋がる。

(2) エネルギー技術の革新

- ・ 限られた日照の中での高効率な発電・蓄電の技術や、燃料を再利用しながら動作する電池技術、高温下・低温下で動作する電池の技術の革新が図られ、太陽電池や燃料電池等の高効率化、高信頼性化、小型・軽量化など次世代のクリーンエネルギー技術の革新をもたらす。
- ・ 太陽電池や燃料電池の技術の高度化は、高効率な化合物太陽電池の軽量化、堅牢化、長寿命化をもたらし、太陽光エネルギー以外には頼らない住宅や自動車など、低炭素社会の実現を加速する技術の革新が促される。

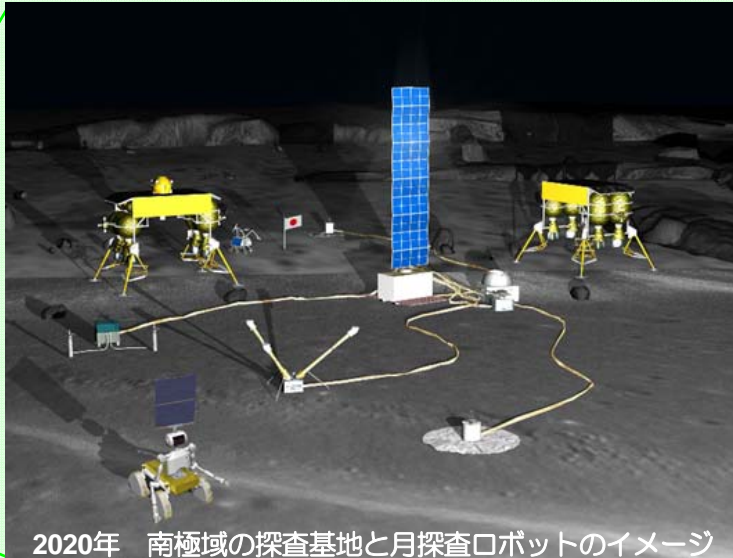
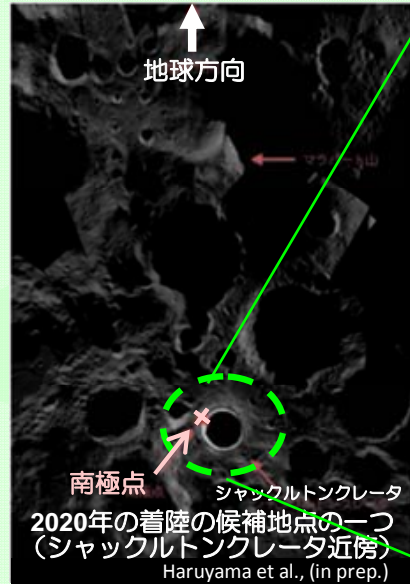
参考図1 ロボット月探査イメージ

2015年のロボット月探査イメージ



- 2015年の着陸地点候補 (大規模クレーター)
- 2020年の着陸地点候補 (南極域)

2020年のロボット月探査イメージ



(画像素材 JAXA提供)

参考表1 各国の宇宙技術の保有状況

			日本	米国	ロシア	欧州	中国	インド
無人	無人輸送システム	無人ロケット (静止軌道への輸送)	○	○	○	○	○	○
		無人宇宙船 (低軌道への輸送)	○	○	○	○	○	— (研究開発中)
	無人探査機	月周回	○	○	○	○	○	○
		月・火星等への着陸	— ⇒ 今後 研究開発	○	○	— (研究開発中)	— (研究開発中)	— (研究開発中)
		月以遠への遠方航行	○	○	○	○	— (研究開発中)	— (研究開発中)
有人	有人往還システム	有人ロケット	— ⇒ 今後 研究開発	○	○	— (研究開発中)	○	— (研究開発中)
		有人宇宙船	— ⇒ 今後 研究開発	○	○	— (研究開発中)	○	— (研究開発中)
	低軌道有人滞在システム		○ (一部のみ)	○	○	○ (一部のみ)	— (研究開発中)	—
	有人探査システム		—	○	—	—	—	—

○ 技術を保有（運用実績あり）
 — 保有していない

参考表2 主要国の月探査、有人宇宙活動等に係わる計画・構想一覧
 (報道等による情報も含む)

	2000年代後半	2010年代	2020年代	2030年代
月探査	かぐや(周回) 嫦娥(周回) 印 チャンドラヤーン(周回) LRO/LCROSS(衝突)	(着陸) (周回) (*) (着陸) (*) (サンプルリターン) (着陸) (周回) (着陸or周回) 欧 (着陸)	更なる発展的探査を目指す (探査基地構築、サンプルリターン)	(着陸) (*)
火星探査	Phoenix(着陸)	(着陸) (周回) 欧 (周回/着陸) (衛星に接近) 印 (*) (周回) (着陸or周回)	(小惑星接近) (サンプルリターン)	(火星周回) (着陸) 欧 (着陸)
低軌道有人活動	(国際宇宙ステーション) スペースシャトル ソユース 神舟6号 神舟7号 (有人宇宙飛行)	(新型宇宙船) (*) (新型宇宙船) (*) (軌道上基地建設) 印 (有人宇宙飛行)	(*) (軌道上基地建設) 欧 (有人宇宙飛行)	青字は無人事業 黄地に赤字は有人ミッション 日本 中国 アメリカ インド ロシア カナダ 欧州(ESA) (*)は非公式報道情報