解 説

宇宙機関における探査ロボットの国際動向

State of Art for Planetary Robotics on Space Agencies

上 野 浩 史* *宇宙航空研究開発機構

Hiroshi Ueno* *Japan Aerospace Exploration Agency

1. は じ め に

本稿では、海外の宇宙機関における探査ロボットの国際動向について紹介する。有人探査は国際協力を前提とする動きがより強くなり、各国が独自に実施してきたロボットによる探査ミッションも、最近では共同開発で進める動きも出てきている。国際宇宙探査のロードマップ、各国で進める無人ロボット探査の現状と計画、報奨型研究開発の動向について概説する。なお、宇宙機関とはいえ、研究開発の内容・手法は詳細・多様化している。すべての活動を網羅できているわけではないことをご容赦いただきたい。

2. 国際宇宙探査フォーラム

2014 年 1 月ワシントン D.C. にて、宇宙機関間の枠を超え、政府主導の宇宙探査に関する会合が開催された。米国務省が主催し、世界の 35 カ国の閣僚級が有人・無人の宇宙探査の政策対話を行う国際宇宙探査フォーラム (ISEF: International Space Exploration Forum) がそれである。ISEF では、過去半世紀にわたる宇宙開発の多くは、国際協力なしには実現しなかったことが強調され、また、競争に基づく産業や科学の革新も、宇宙探査の発展にとって重要であることが確認された。さらに、有人・無人の宇宙探査が地球上の経済成長と社会福祉に直接的に寄与し、長期的目標となる火星の有人探査に向けた協力推進が最良な成果に繋がるということが認識された。次回の ISEF は日本で 2016 年もしくは 2017 年に開催される予定である [1]。

3. 国際宇宙探査のロードマップ

2007 年に世界の 14 宇宙機関で設立された国際宇宙探査協働グループ (ISECG: International Space Exploration Coordination Group) は、2011 年 9 月に続き、2013 年 8 月に国際宇宙探査ロードマップ (GER: Global Exploration Roadmap) 第 2 版を策定・公開した [2]。GER に

は、機関レベルで調整された有人探査の共通目的と有人火星探査に至るロードマップ、および各機関の宇宙探査にかかわる計画等がまとめられている。GER は、国際約束を規定するものではなく、国際協力による有人宇宙探査プログラムを立ち上げるための調整用ツールであり、各国/機関は、GER を活用して、ステークホルダとの協議を行い、適宜、政策や宇宙開発計画に反映させている。

ISEF にて、GER を策定した ISECG 活動は支持され、より多くの宇宙機関の ISECG への参加が促されている。また、ISECG 活動における有人・無人の宇宙探査による相乗効果の拡大に向けた努力が歓迎され、探査を段階的に進めることの価値が認識されている。

3.1 長期的な有人探査戦略

長期的な有人探査戦略を検討するに当たり、拠り所にすべき六つのガイドライン (現実的な予算の成立性、探査成果の創出、国際間パートナーシップ意義、段階的な技術開発、有人とロボットとの連携、ロバスト性) を策定し、図 1 に示す ISECG ミッションシナリオを定義した。本ミッションシナリオは、関心を有する宇宙機関がそれぞれの優先事項を実施しつつ、火星探査への重要な貢献に備えることを可能にし、共通の探査目的・目標を達成するよう国際的に調整した結果を反映している。

本ミッションシナリオは以下の三つの月近傍探査ミッション・テーマから構成される。

3.1.1 有人小惑星探査ミッション

無人ロボットにより地球に接近する遠方の小惑星を捕獲し、月近傍に軌道変換させ、有人により小惑星探査を行う。このミッション・テーマは NASA の国際協力提案であり、自律接近捕獲、次世代電気推進、有人輸送および運用の技術実証を行う。

3.1.2 長期滞在有人ミッション

深宇宙探査技術の発展と、有人ロボット協調による月面探査の革新的手法の実証のために、月近傍にて長期滞在有人ミッションを行う。このミッション・テーマは達成可能な近々のステップであり、月と深宇宙を目指す将来の探査ミッションに向けた技術を直接進展させることを目標に定義されている。このミッション定義は、ISECG 各宇宙機関

原稿受付 2014 年 4 月 14 日

キーワード: Planetary Robotics, Global Exploration Roadmap

〒 305-8505 つくば市千現 2-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

図1 ISECG ミッションシナリオ

によって進められている。

3.1.3 有人月面探査ミッション

月面有人滞在を活用し、居住性、移動性などの惑星探査技術を進め、月探査の優先的目的を達成する月面ミッションである。このミッション・テーマは探査目的地の一つである月を目指すミッションであり、多くの宇宙機関は、有人火星ミッション準備の本質的ステップと見ている。この数年、本ミッションは、個々にあるいは共同で研究が進められている。

3.2 有人探査への準備

人類の活動領域を宇宙へ広げるため、月近傍への有人ミッションおよび有人火星探査に向けて、必要不可欠な準備活動に取り組んでいる。共通ロードマップの策定により、各機関はその短期投資を適切に調整し、協働して活動するようになり、投資効率を最大限にし、各機関の目的と目標を早期に実現することが可能になる。以下の6分野において活動が進められている。ロボティクスに関する内容を含む(1)～(3)については、本章で補足し、(4)は次章で記述する。

- (1) 国際宇宙ステーション（ISS: International Space Station）の探査への活用
- (2) 先進技術の開発
- (3) 探査目的地を模擬した地上類似環境実験
- (4) ロボット探査：有人探査にかけがえのない貢献
- (5) 新世代の宇宙システムとインフラの開発
- (6) 宇宙飛行士の健康管理とリスクの低減

ISSの探査への活用の分野では、有人宇宙船内外で使用

されるロボットと遠隔操作システムが、飛行士とロボット間の相互作用の有無にかかわらず、ミッション目的を達成する人・ロボットの役割分担を示す運用概念の具体例となる。米航空宇宙局（NASA）が搭載したRobonautは、通常、時間がかかりクルー活動を阻害する定型的なISS保守タスクから始めて、短時間遅延のロボット遠隔操作技術実証を進め、惑星面上のロボットを惑星周回軌道にいるクルーが遠隔操縦し、高度な探査活動をロボット用いて行う利点をISSで明らかにする予定である。

また、NASAは、無人機による燃料補給サービス技術の開発を目指し、カナダ宇宙庁（CSA）と協力して、ロボットによる衛星への燃料補給ミッション（RRM: Robotic Refueling Mission）をISSで実施した。燃料再補給を行う設計でないサービス対象衛星に見立てた装置に対して、地上からのロボットアームの遠隔操作により、燃料バルブのワイヤ切断やふたの取り外し、液体燃料の注入等を行った。

先進技術の開発の分野では、有人火星探査ミッションのクリティカル技術を識別し、各機関における技術開発状況を分析し、原子力発電技術等、現時点で不十分な技術開発項目を識別した。また、深宇宙での自律ランデブ・ドッキング技術等の宇宙機関が競合して技術開発をしている項目を識別した。

探査目的地を模擬した地上類似環境実験の分野では、他惑星で人が生存するために重要な資源利用システムの地上試験が行われ、無人実証への準備が進んでいる。将来の惑星面探査の類似環境模擬実験として、ハワイにて、NASA、CSA、スミソニアンおよびマインツ大学（ドイツ）から成

図2 無人ロボット探査の各機関の計画

るチームが、現地資源活用技術・運用の模擬実験を実施した。NASA のレゴリス、環境科学、酸素および月の揮発性物質抽出の試作装置と CSA のアルテミス Jr. ローバ上のドリルと航法誘導機器を実験パッケージとして、月極地域の準永久陰領域で水と揮発性物質を検出・観察し、分布図作りを目指す。現地資源利用のシミュレーションは、地球から輸送される補給量軽減を狙い、現地原材料を使用し、より持続的なミッションを遂行することを狙った準備活動である。

4. 無人月・火星探査ミッション

ロボット探査ミッションは、有人探査への貴重な準備ミッションとして位置付けられ、各機関のロボット探査ミッション計画・概念を整理した結果が GER に掲載されている。さらに、ロボット探査ミッションで得られる情報が有人月近傍探査や有人火星探査ミッションのリスク管理上十分かを分析し、現状のロボット探査ミッション計画だけでは不足する情報を識別した。図2は、その最新版である[3]。

地球から最も近い重力天体である月では、1960年代の冷戦中の米ソ宇宙競争以降、月面上の移動探査は行われていなかった。しかし、1990年代以降、日本の月探査計画に続く形で科学や利用などの観点から NASA・ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) 等各機関が月探査活動を活発化させ、日本・中国・インド・ロシア等が月着陸の計画を進めてきた。

中国国家航天局 (CNSA) は、月周回衛星「嫦娥1, 2」に続き、2013年12月、月着陸機「嫦娥3号」を打ち上げ、推力可変式エンジンにより月面へ降下させ、月の表側の北西部分にある虹の入江内の地点へ軟着陸させた。また、同機に搭載された月面探査ローバ「玉兔」が、着陸機から伸展されたスロープを下って月面に降りることに成功した。これにより、中国は、旧ソ連と米国に続き、月面への軟着陸に成功した世界で3番めの国となった。

月着陸機は月面で1年間運用され、(1) 着陸機サブシステムの状態監視、(2) 望遠鏡での天体観測、極端紫外線 (EUV) カメラによる地球の撮影、および月面の塵の観測を含む科学観測、(3) 月の昼夜に合わせた休眠モードへの移行と復帰の管理が行われる。玉兔は3ヵ月間、レーダによる月地下140[m]と地下10[m]の構造をそれぞれ観測し、パノラマカメラ、アルファ粒子・X線分光計、赤外線撮像分光計による観測を行う。

月面では約2週間ごとに昼夜が繰り返されるため、着陸機と玉兔は夜間前に休眠モードに移行し、活動を停止する必要がある。玉兔が休眠モードに移行する場合、1枚の太陽電池パネルを日の出方向に向けた後、カメラと高利得アンテナを備えたマスト部を玉兔内に折り畳み、最後にもう1枚の太陽電池パネルをフタのように閉じるとされ、これにより、放射性同位体熱源による夜間の極低温環境に対する装置の保温が可能になる。1月の月面での2回めの休眠モードへの移行直前に、玉兔のマスト部と太陽電池パネルの駆動を行う制御回路に不具合を生じ、両部分を動かさない状態となり、地球時間で約2週間続く月の夜間の極低温環境にペイロードを含む内部の装置が長時間さらされたが、2度にわたって復帰している。

CNSA の月探査プログラムの第3フェーズとして実施される月のサンプル採取・回収ミッションを行う月探査機「嫦娥5号」とその試験機の打ち上げを、それぞれ2017年ごろと2014年後半に実施する予定である。試験機では、嫦娥5号ミッションで使用される試料カプセルの再突入試験が行われる。

ロシア連邦宇宙局 (Roscosmos) は、月探査プログラムについて、積極的に研究を継続していく姿勢である。2016年に Luna-25 (Luna-Glob 着陸機)、2018年に Luna-26 (Luna-Resurs 周回機)、2019年に Luna-27 (Luna-Resurs 着陸機) を計画している。その次の「Luna-Resurs-2」では、月の南極付近へ着陸した後、月探査ローバにより土壌を掘削し、サンプルを持ち帰る計画である。また、さらに多数の実験を月面で行い、今後の月面基地建設計画などにつなげていくことを目指している。

インド宇宙局 (ISRO) は「Chandrayaan-1」で月周回衛星に成功し、「Chandrayaan-2」では、月面の土壌サンプル収集やその場分析を行う月探査ミッションをインドの国産ロケット GSLV で、2015年以降での打上げを目指す。韓国航空宇宙研究院 (KARI) は、2017年に試験用月周回機と深宇宙通信施設を構築し、2020年に韓国製ロケットで月周回機と月着陸機の打ち上げを実施する計画である。

一方、火星探査ローバは、7回に渡る火星着陸の成功実績のある NASA の独壇場である。2012年8月にスカイクレーン方式で着陸したキュリオシティはこれまでに、約6[km]を踏破し、Kimberley と呼ばれる生命の痕跡を見つけられ

る可能性があるサイトにまもなく到着する。キュリオシティは、65 [cm] の障害物を乗り越え、1 日あたり 200 [m] 移動することができ、ミッション期間の 2 年間で 19 [km] を移動探査する計画である [4]。

NASA では、次の火星探査ミッションへの計画も進めている。2020 年に打上げ予定の火星探査ミッション「Mars 2020」の探査ローバに搭載する装置の提案募集を行い、国外からの 17 件を含む全 58 件の提案を受領した旨報告されている。Mars 2020 用ローバは、着陸システムや機体構造に、キュリオシティの設計を用い、着陸地点付近の地質、生命居住可能性に関係する環境、過去に生命が存在した痕跡、および将来の有人火星探査のための天然資源や危険性に関する調査を行う計画であり、将来のサンプルリターンの可能性を考慮し、採取サンプルのローバ内部への保存機能を有する。

米国以外の火星探査ローバでは、ESA と Roscosmos との共同により、火星着陸・ローバ探査を行う「ExoMars」計画がある。本計画は、将来のサンプルリターンに必要な飛行・探掘技術の実証と火星での科学探査を目的とし、2016-2018 年の打ち上げを目指す。開発予算の認可には至っていない。Roscosmos は 2020 年までに打ち上げを目指す火星探査ミッション「Phobos-Grunt-2」計画も有する。

5. 報奨型研究開発

5.1 NASA 100 年記念チャレンジ

NASA 100 年記念（センテニアル）チャレンジは、先進技術開発の過程に一般市民を直接参加させ、賞金を発明者に提供するプログラムであり、ライト兄弟の精神に沿って、飛行後 100 年を記念して開始された。プログラムは従来方式でない革新的な方法で NASA や国の関心事への解決策を探索する。

2005 年からこれまでに、無線電力伝送デモ（2005～2009, \$0.9M, M は 100 万）、軽量高強度テザー（2005～2011, 受賞者無）、レゴリス掘削（2007～2009, \$0.75M）、月面着陸（2006～2009, \$2M）、飛行士グローブ（2007～2009, \$0.55M）、グリーン航行（2007～2011, \$1.56M）、月面酸素製造（2009, 受賞者無）が実施されている。現在は、サンプル回収ロボット（2013～2014, \$1.5M）、無人飛行機（2014, \$0.5M）、夜間ローバ（2014, \$1.5M）が実施され、キューブサットによる深宇宙用通信や推進系に関するチャレンジも計画されている [5]。

5.2 DARPA チャレンジ

米国国防高等研究計画局（DARPA）でも、2004 年から報奨金方式の研究開発を実施している。未舗装路の制限時間内の自律走破を目指すグランドチャレンジ（2004, 2005, \$2M）、市街地の制限時間内の自律走破を目指すアーバンチャレンジ（2007, \$2M）に続き、昨年 12 月には、ヒュー

マノイドによる災害救助（2012～2014, \$2M）を DARPA ロボティクスチャレンジ（DRC）として開催した。DRC では、グーグルが買収した東大ロボット研究者が中心となって設立した日本のチーム「SCHAFT」がトップで予選会を通過している。

5.3 グーグル X プライズ

政府系機関だけでなく、民間主導の報奨金型の研究開発が探査ロボットの分野で進められている。民間の資金と組織によって開発された月探査機を 2015 年までに月面に安全に着陸させ、着陸地点から最低 500 [m] 移動して高解像度の動画と画像を含むデータを地球に送信することを目指す。月探査コンテスト「Google Lunar X Prize」がそれであり、月面探査を実現したチームには優勝賞金 \$20M が提供される。

同コンテストは 2007 年に開始されたもので、これまで 33 チームがエントリーし、撤退やチームの合併等の結果、現在は 18 チームが活動しており、日本からは、東北大学の吉田教授を中心に月面探査ローバの開発等を行う「ハクト」が参加している。

6. お わ り に

本稿では、宇宙機関における探査ロボットの国際動向をまとめた。海外の宇宙機関による探査ロボットの研究開発は、国家間の競争的な側面と、最終的な有人国際探査を見据えた協力的な側面があり、各国がしのぎを削って進めている分野である。探査ロボット技術は、日本の強みを活かして、国際プレゼンスを確保できる・すべき分野であり、その時期が到来している。より積極的に国内研究開発に取り組む必要があると考える。

参 考 文 献

- [1] 文部科学省：「国際宇宙探査フォーラム（ISEF）の結果について」、内閣府宇宙政策委員会宇宙科学・探査部会第 9 回会合、平成 26 年 2 月 19 日、資料 2。
- [2] ISECG, Global Space Exploration Roadmap, August 2013.
- [3] <http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/?p=568>
- [4] http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html
- [5] http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/index.html

上野浩史 (Hiroshi Ueno)

1988 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年清水建設（株）入社。宇宙・建設ロボット等の研究・開発に従事。1989-1991 年米国カーネギーメロン大学客員研究員。1999 年宇宙開発事業団（現 JAXA）入社。宇宙ロボット研究に従事後、2005 年より「きぼう」ロボットアーム・結合機構の開発・運用に従事。2010 年より有人探査・宇宙船に関わる研究に従事。現在に至る。1992 年日本ロボット学会研究奨励賞。2007 年 PMP（Project Management Professional）取得。日本機械学会会員、日本航空宇宙学会会員。（日本ロボット学会正会員）