

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	有人宇宙計画と宇宙探査
他言語論題 Title in other language	Human Space Activity Program and Space Exploration
著者 / 所属 Author(s)	佐伯和人 (SAIKI Kazuto) / 立命館大学総合科学技術研究機構教授・立命館大学宇宙地球探査研究センター (ESEC) センター長
書名 Title of Book	日本の宇宙政策を考える—今後10年のために何をすべきか— —科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Considering Japan's Space Policy: What Should Be Done in the Next Ten Years?)
シリーズ Series	調査資料 2023-4 (Research Materials 2023-4)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2024-2-29
ページ Pages	—
ISBN	978-4-87582-922-5
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	—

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

有人宇宙計画と宇宙探査

佐伯和人

立命館大学総合科学技術研究機構教授・
立命館大学宇宙地球探査研究センター (ESEC) センター長
小型月着陸実証機SLIM搭載マルチバンドカメラMBC開発リーダー
月極域探査機LUPEX搭載近赤外画像分光装置ALIS開発リーダー



ESEC
EARTH & SPACE EXPLORATION CENTER, RITSUMEIKAN UNIVERSITY

2023/9/22

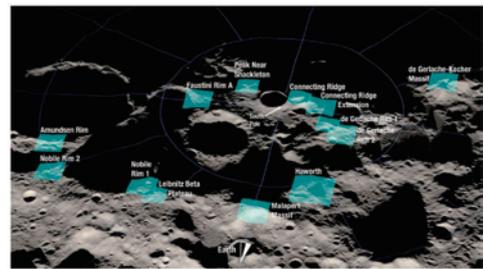
科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

1

スライド 1

有人宇宙計画のドライビングフォース

- ・月の氷資源
 - ・月の永久影領域に水氷が存在する可能性が高まる
 - ・水氷を電気分解してロケット燃料とすることで、地球帰還や火星等へ旅立つ燃料の補給が月でできる
 - ・月で燃料資源の採掘、売買を通じて経済活動が宇宙へ
 - ・永久影周辺の日照率が高い領域は限られている
 - ・アルテミス3号の着陸候補地点は全て永久影クレータ近くの日照率が高い地域
 - ・良い場所が限られていることで早く行く意味が発生



Shows here is a rendering of 13 candidate landing regions for Artemis III. Each region is approximately 9.3 by 9.3 miles (15 by 15 kilometers). A landing site is a location within those regions with an approximate 325-foot (100-meter) radius.
Credits: NASA

- ・国威発揚
 - ・ポストISSの国際宇宙秩序のハブをめざす中国
 - ・携帯電話網、高速鉄道などにつながる、国際市場への科学技術アピール
 - ・安全保障目的

2022年8月25日NASA発表のArtemis 3 着陸候補地点

2022年:アルテミス1号【無人】 25日後に帰還、飛行6日目で月に最接近。
2024年:アルテミス2号【有人】 月には着陸せず、往路4日、復路4日。4名搭乗。
2025年:アルテミス3号【有人】 4人で月へ、2人が月面着陸、6.5日月面に滞在。
2026年:アルテミス4号【有人】 月周回宇宙ステーションゲートウェイに人を送る。

- ・民間主導の宇宙旅行・移住ビジョン
 - ・2021年民間の宇宙旅行が続々とスタート。2021年宇宙に行った民間人は29名
 - ・火星に移住するという民間ビジョン

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

2

スライド 2

日本の科学探査の決め方

宇宙基本計画：10年で中型(最大400億円規模) 3機、小型5機のミッションを行う。

JAXAのGDI構想

- ・国際宇宙探査枠 (トップダウン)
月・火星は国際宇宙探査枠を活用して、そこに科学をうまく絡めて欲しい。
 - ・宇宙科学枠 (ボトムアップ)
今後のボトムアップはGDI (Groupe de Discussion Intensive)を通して行う。
2024年冬候補決定・プリプロジェクト準備チーム2033打ち上げ目標
分野は以下の三分野でそれぞれGDIを形成
 - ・宇宙工学
 - ・太陽系科学
 - ・宇宙物理学
- GDIは戦略的中型をJAXAに提案する枠組み (採用が保証されているわけではない)

・ボトムアップの方式はこれまで二転三転して科学者はかなり疲弊している。今回は、ボトムアップの道筋を絞った点は評価できるが、定着するかはやや心配。

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

3

スライド 3

諸外国の状況 (初成功の年)

失敗は一部のみ抜粋

図は講談社ブルーバックス「世界はなぜ月をめざすのか」の図の、イラストレーター浜島かのう氏自身によるカラー化画像

	月	火星
周回探査 	ソ連 1966 アメリカ 1966 ヨーロッパ 2004 日本 2007 中国 2007 インド 2008 韓国 2022	ソ連1971 アメリカ1971 日本2003失敗 ヨーロッパ2003 インド2014 中国2020 アラブ首長国連邦2021(H-IIA)
軟着陸 	ソ連 1966 アメリカ 1966 中国 2013 イスラエル 2019失敗 インド 2019失敗 ispace 2023失敗 ロシア 2023失敗 インド 2023 日本 2024? 民間企業	ソ連1971 アメリカ1976 中国2021 ・月は2000年代から様々な国が挑戦できる対象となる。 ・今、月の軟着陸がホット
サンプルリターン 	アメリカ 1969 ソ連 1970 中国 2020	アメリカ2033前後? 中国2030前後?
有人探査 	アメリカ 1969-1972 中国 2030?	アメリカ 2033? 中国 2033? スペースXはもっと早い?

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

4

スライド 4

諸外国の状況（月探査の波）



ispace社 ミッション1ランダー
2022年12月11日打ち上げ成功
2023年4月26日惜しくも
着陸失敗



ISRO
インド チャンドラヤーン3
2023年7月14日打ち上げ成功
2023年8月23日着陸成功



ROSCOSMOS
ロシア ルナ25号
2023年8月11日打ち上げ成功
2023年8月20日着陸失敗



JAXA
SLIM
2023年9月7日打ち上げ成功
2024年1月以降着陸予定
2023/9/22



米国 Astrobotic社
PEREGRINE
2023年度打ち上げ予定



米国 Intuitive Machines社
ノバC
2023年度打ち上げ予定



科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

スライド 5

宇宙探査と安全保障

- ・ 開発能力と軍需産業
 - ・ 海外の軍需企業の体力と、軍需産業の層の厚さに、日本は対抗しなくてはならない
 - ・ 例えば宇宙探査に必要な近赤外撮像素子の需要の多くは誘導ミサイルなど軍需用
 - ・ MILスペック（米軍調達規格）を支える充実の試験環境
- ・ 日本の大学の研究者のほとんどは、防衛関連研究に明らかには係わることができない
- ・ 原子力利用
 - ・ 月の2週間の夜、火星の低温、太陽光の弱い木星以遠、これらの環境に対抗する最適解である原子力電池を日本は打ち上げられない
 - ・ 月で水の燃料化（電気分解）が始まれば、米中は原子力発電設備を持ち込むはず



兵器にとどまらない軍需産業の副産物
米空軍によって規格化された、顕微鏡等光学装置
の解像度を試験するテストチャート
(日本の民間企業や研究者も活用)

・ 軍事に絡まない日本の特徴を逆に利点として活かす必要あり
・ 宇宙での原子力利用は日本もいずれ必要になるはず
しかし、種子島から打ち上げることは不可能（宇宙で調達？）

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

6

スライド 6

宇宙探査の今後の変化

- ・民間参入等による探査機会の多様化
 - ・大型研究予算があれば、JAXAの選定プロセスからはずれても民間委託で探査が可能（例えばispaceは、2億円/kgで月に観測装置を運んでくれる）
 - ・日本の探査計画だけでは日本の研究者の要望を満たせないで、今後、海外の探査に観測機器を提供したいという研究者が増加する
- ・有人探査の恩恵
 - ・相乗りできるペイロードが爆発的に増える
 - ・有人探査は無人探査よりも耐放射線性能、耐衝撃性能がゆるくなるので、実は参入しやすくなる
- ・資源開発の恩恵
 - ・資源売買の経済活動の一環として、資源探査に大きな資金が配当される
- ・移住ビジョンの恩恵
 - ・移住の安全確保のための現地探査へ要請は、科学目的探査への要請よりも切実かつ大規模。結果、科学成果も移住目的の探査の方が勝る。

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

7

スライド7

宇宙探査における政府（日本）の役割

- ・物量ではアメリカ、中国、インド、等に勝てない
 - ・これまでの日本の探査の戦い方は、自家用車ではなくスーパーカーをつくるような一点豪華主義
ただし豪華の部分をささえているのは、資金ではなく、現場の努力と根性！
そればかりやっていると主流からはずれる危険あり
- ・法律は先進的
 - ・民間企業が宇宙空間で採取した資源について、国として所有権を認めることを定めた宇宙資源法が2021年6月15日国会で成立。米国・ルクセンブルク・アラブ首長国連邦について、世界で4番目。
 - ・ispace Mission1 landerが2023年4月26日着陸目前で惜しくも失敗。
着陸が成功していればNASAと契約した月資源の商取引が行われる予定であった。
NASAの契約先選抜で宇宙資源法の整備が進んでいたことが追い風になったと推定される。
- ・基礎研究の分野でリードすべき
 - ・資源探査、資源物質濃集機構の解明（宇宙鉱床学）、宇宙資源の精錬方法の開発など
 - ・石油の探査を一手に引き受けてきた探査会社シュルンベルジェのような立ち位置をめざすべき
 - ・海外の主流の探査に主要な搭載機器として採用される観測機器の開発

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

8

スライド8

宇宙探査における政府（日本）の役割 その2

- ・ JAXAの強化
 - ・ 民間の参入や海外のロケットへの参加など、宇宙探査の多様化によりJAXAの役割が不明瞭になりつつある
 - ・ 日本は予算が少ないので、宇宙開発で国際的な発言力を維持するためには明確なビジョンが必要。
そしてJAXAがビジョンリーダーであるべき
- ・ JAXAに各省庁が資金提供して企業・大学に資金を供給する機能を与える構想が始まるらしいが、これを拡充する必要あり
 - ・ 探査機や搭載機器の開発を大学が協力しても、現状はJAXA会計で開発が行われるので大学の資金的メリットにならない。
 - ・ 従来のJAXA予算の中だけでビジョンを構築すると、国際的な発言権を維持できるような強力なビジョンとならない。
 - ・ JAXA自身のビジョン構築能力も変化する状況に柔軟に対応しつつ強化する必要がある。

2023/9/22

科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム

9

スライド 9

報告 (3) 有人宇宙計画と宇宙探査

立命館大学総合科学技術研究機構教授・

立命館大学宇宙地球探査研究センター (ESEC) センター長
佐伯 和人

今の宇宙探査は激変の時代に突入しようとしております。どのように激変しているのか、から説明して、どう戦っていけばよいのかといった話につなげていきたいと思っております。

今注目されているのは、月の氷資源です (スライド 2)。月の永久影領域に水氷が存在する可能性が高まってきました。この水氷を電気分解してロケット燃料とすることができます。そうすると、地球帰還や火星等へ旅立つ燃料の補給が月でできることとなります。月での燃料資源の採掘、売買を通じて経済活動が宇宙へ飛び出す時代に突入しようとしています。

ところが、永久影周辺の、日照率が高く基地を作るのに適切な場所は限られています。NASA が発表したアルテミス 3 号という、久しぶりの月有人計画の着陸候補地点は全て永久影クレータ近くの日照率が高い地域です。つまり、アルテミス計画は単なる有人計画の再開というだけではなく、月の水資源を強く意識した計画であることも念頭に入れておく必要があります。良い場所が限られているということで、早く行く意味が発生しているのが、ドライビングフォースの一つとして重要です。

次に、国威発揚が挙げられます。昔の国威発揚とは意味が少し変わっています。ポスト ISS の国際宇宙秩序のハブを目指す中国の台頭が加速していますが、昔のような主義主張の戦いではなく、携帯電話網や高速鉄道などにつながる国際市場への科学技術アピールの側面も強くなっています。さらに、宇宙軍なども出てきますが、安全保障目的もあります。

もう一つ、新しく大きくなってきているのが民間主導の宇宙旅行・移住ビジョンです。2021 年に民間の宇宙旅行が続々とスタートし、2021 年に宇宙に行った民間人は 29 名になりました。宇宙旅行が既に現実的になり、火星に移住するという民間ビジョンまで膨らんできています。これらがドライビングフォースになっていると考えております。

日本の科学探査の決め方を見ますと、宇宙基本計画では、10 年で中型 (最大 400 億円規模) のものを 3 機、小型 5 機のミッションを行うと言っていますが、我々研究者は、この枠を取るために莫大なエネルギーを費やしているのが現状です (スライド 3)。これまでは、各学会に検討チームが作られ、そこから意見を吸い上げるという非常に非効率な形で、いろいろなところに検討組織が乱立していた状態でしたが、それをまとめようという方向性が JAXA (宇宙航空研究開発機構) から示されました。これが GDI (戦略的中型創出グループ) 構想です。

JAXA は、宇宙探査を、国際宇宙探査枠と宇宙科学枠に分けた上で、国際宇宙探査枠はトップダウンで行うことを宣言しています。月、火星は国際宇宙探査枠を活用してやるから、そこに関わりたい科学者は、科学をうまく絡めてほしいという意図です。一方で、宇宙科学枠は、ボトムアップの GDI という組織で意見を吸い上げて行おうとしています。宇宙工学、太陽系科学、宇宙物理学の 3 分野でそれぞれ GDI を形成して、2024 年冬に候補を決定し、プリプロジェクト準備チームを立ち上げ、2033 年頃を打ち上げ目標にするというスケジュールです。この GDI は戦略的中型を JAXA に提案する枠組みです。ただし、採用が保証されているわけでは

ありません。意見を JAXA が吸い上げる仕組みで、かつ JAXA はその GDI に協力して、その計画がより実現性の高い、科学的に実のある成果が出やすいものになるようなサポートをするという枠組みです。

ボトムアップの方式はこれまで二転三転して、科学者はかなり疲弊しています。今回、ボトムアップの道筋を絞った点は評価できますが、定着するかやや心配なところがあります。また、科学者が宇宙でやりたいことは GDI の分野に収まらないほど多様化してきておりますので、それをどうするかという問題が生じております。

諸外国の月と火星の周回探査、軟着陸、サンプルリターン、有人探査の初成功の年をスライド 4 にまとめました。このスライドで、失敗したもののうち、重要なものは赤で示しています。黄色の枠は、民間企業です。こうして見ると、ソ連とアメリカは冷戦時代に極端に先走っていました。月に関しては 2000 年代から徐々にいろいろな国が参加できるようになっていることが分かるかと思えます。現在、月への軟着陸にもいろいろな国や民間企業が参加できる状況になってきています。

スライド 5 に、2023 年度の月探査における諸外国の状況をまとめています。なんと 6 機もの月着陸機が挑戦し、実際に着陸したり、これから着陸しようとしていたりします。月探査の波は、月軟着陸という技術レベルにあります。

JAXA のプロジェクトとしては、現在小型月着陸実証機 SLIM が打ち上がっていますが、2024 年度以降にはインドと協力して月極域探査機 LUPEX を打ち上げます。これは水資源を月の南極で探そうという計画です。その後、2027 年度頃から月探査促進プログラム LEAD1、LEAD2 が計画されようとしており、2029 年度頃にはトヨタなどによる月面有人と圧ローバ計画があります。

月面水資源探査として世界の動きはどうなっているかというところ、アメリカは我々の LUPEX に少し先駆け、無人月極域探査 VIPER を上げる予定です。また、2025 年度頃にアルテミス 3 で有人月着陸により水資源のある南極近くに着陸することを計画しています。中国は、我々の LUPEX よりやや遅れて、嫦娥 7 号で無人月極域探査を計画しております。

開発能力と軍事産業は切っても切り離せないものなので、宇宙探査と安全保障に着目しておく必要があります（スライド 6）。海外の軍需企業の体力と、軍需産業の層の厚さに、日本は対抗しなくてはならないというところが大変です。例えば、宇宙探査に必要な近赤外線撮像素子の需要の多くは誘導ミサイルなど軍事用なので、圧倒的に海外製品は幅が広く選択肢があります。また、MIL 規格という米軍調達規格を支える試験環境も充実しております。スライド 6 の写真は、米空軍によって規格化された顕微鏡等光学装置の解像度を試験するテストチャートです。私も光学装置を開発しているのでこれを持っています。こういった兵器にとどまらない軍需産業の副産物が装置開発を下支えしていることを認識する必要があります。

それから、日本の大学の研究者のほとんどは、防衛関連研究に明らかに関わることができないという足かせもあります。いろいろなハンディを背負っていることを念頭に置きながら、どうバックアップするべきなのかを考えないと、なかなか競争できないというところがあります。

また、原子力利用でもハンディを持っています。例えば、月の 2 週間の凍てつく夜、火星の低温、太陽光の弱い木星以遠の環境に対抗するためには、太陽電池では難しく、最適解は原子力電池となりますが、日本はこれを打ち上げることができない状況になっております。

近い将来、月で水の燃料化のための電気分解が始まると思いますが、そうすればアメリカや中国は迷わず原子力発電設備を持ち込むはずで、そのようなときに、我々はどうしたらよいかを考えておく必要があります。軍事に絡まない日本の特徴を逆に利点としていかす必要があるのではないかと考えます。また、宇宙での原子力利用は日本もいずれ必要になるはずで、しかし、種子島から打ち上げることは不可能なので、宇宙で調達するか、何らかの方法を考えなければなりません。それらの現況を見た上で、宇宙探査の今後の変化を考えています。

加えて民間参入等による探査機会の多様化も大きな波になっています（スライド7）。大型研究予算があれば、JAXAの選定プロセスから外れても民間委託で探査が可能になります。例えば、アイスペースは1kg当たり2億円で観測装置を運んでくれると言っていますので、JAXAの選定プロセスで疲弊しなくても、大型の科研費を充てれば何かできるかもしれない時代が来ようとしています。日本の探査計画だけでは日本の研究者の要望を満たせなくなっているので、今後、海外の探査に観測機器を提供したいという研究者が増加することは目に見えております。

有人探査が始まると、そこにも恩恵があります。相乗りできる総積載量が爆発的に増えます。さらに、有人探査は無人探査よりも耐放射線性能、耐衝撃性能が緩くなるので、参入しやすくなります。

また、資源開発の恩恵ということで、これから水資源をもとに宇宙での資源売買の経済活動が始まりますが、その一環として資源探査に大きな資金が配当されることが期待されます。そして、移住ビジョンの恩恵も挙げられます。これから火星や月に移住することになると、移住先の安全確保のための現地調査への要請が高まります。それは科学目的探査への要請より切実かつ大規模になることが目に見えています。結果、科学成果も移住目的の探査の方が勝るようになると考えています。

そのような状況を見た上で、宇宙探査における政府の役割について考えてみます（スライド8）。物量ではアメリカ、中国、インド等には勝てません。これを認める必要があります。これまでの日本の探査の戦い方は、自家用車ではなくスーパーカーを作るような一点豪華主義でした。ただし、この「豪華」の部分を支えているのは資金ではなく、現場の努力と根性です。そればかりやっていると主流から外れる危険があると危惧（きぐ）しております。

一方、法律は先進的だと評価しております。民間企業が宇宙空間で採取した資源について、国として所有権を認めることを定めた宇宙資源法⁽¹⁾が2021年6月15日に国会で成立しました。これはアメリカ、ルクセンブルグ、アラブ首長国連邦に続いて世界で4番目の立法です。アイスペースのMission 1 lander⁽²⁾が2023年4月26日、着陸目前で惜しくも失敗しましたが、実は、成功していればNASAと契約した月資源の商取引が行われる予定でした。NASAの契約先選抜で、宇宙資源法の整備が進んでいたことが追い風になったことが推定されますので、このような動きは非常に重要だと思います。

それから、戦い方としては、基礎研究の分野でリードすべきだと考えています。資源探査、資源物質濃集機構の解明（宇宙鉱床学）、宇宙資源の製錬方法の開発など総合的な宇宙資源学を進めるべきだと考えております。かつて石油資源が産業化されたとき、セブンシスターズが

(1) 宇宙資源の探査及び開発に関する事業活動の促進に関する法律（令和3年法律第83号）

(2) HAKUTO-R Mission 1 Lunar Lander

世界の経済に影響を与えるほどの巨大メーカーになりました。そのときに石油探査を一手に引き受けてきたのは探査会社シュルンベルジェという多国籍企業です。このような立ち位置を日本は目指すべきだと考えております。海外の主流の探査に主要な搭載機器として採用される観測機器の開発あたりに注力していくのが日本の発言力を高めておくポイントではないかと考えております。

そして、JAXA を強化する必要があります（スライド9）。今、民間の参入や海外のロケットへの参加など、宇宙探査の多様化により JAXA の役割が不明瞭になりつつあります。日本は予算が少ないので、宇宙開発で国際的な発言力を維持するためには明確なビジョンが必要です。それには JAXA がビジョンリーダーであるべきだと考えております。JAXA に各省庁が資金提供して企業・大学に資金を供給する機能を与える構想が、今年度（2023年度）あたりから始まるという話を聞いておりますが、これをもっと拡充する必要があります。探査機や搭載機器の開発に大学が協力しても、現状では JAXA 会計で開発が行われるので大学の資金的メリットにはなりません。その点も改善する必要があります。また、従来の JAXA 予算の中だけでビジョンを構築すると、どうしてもこぢんまりとしたものになります。ここから何か大きなことをやろうと思うからスーパーカーになってしまい、国際的な発言権を維持できるような強力なビジョンにはなりません。今も少数の優秀な方々がビジョン構築に頑張っておられますが、もっと人員を増やして強化する必要があると考えております。その意味では、JAXA にそういう資金をハンドリングできる能力をもっと与えて、JAXA 自身のビジョン構築能力も変化する状況に柔軟に対応しつつ強化する必要があります。以上です。

（さいき かずと）