

# 太陽系探査の現状と宇宙資源の考え方

宮本 英昭 \*

## Results of Solar System Explorations and Their Implications to the Utilization of Space Resources

Hideaki MIYAMOTO\*

Department of Systems Innovation, School of Engineering, University of Tokyo

### Abstract

More than 200 spacecraft have successfully explored about 100 extraterrestrial bodies, including all planets and their major satellites. In-situ observations and return-sample analyses revealed the orbital parameters and compositional distributions of solar system bodies, which are essential to discuss possible utilization of space materials. At an early stage of the future in-situ resource utilization (ISRU), the availability of volatiles, including water on asteroids and putative ice on the Moon, becomes a primary issue, especially for their utilization as propellants. Autonomous transportation systems between solar bodies would then be supported by such volatile materials obtained on small bodies. Infrastructures, including bases, could be developed with materials excavated from appropriate bodies and transferred through such a system. Extensive utilization of space resources on Earth may happen but not in the near future.

**Key words:** Space resource, Solar system exploration, Asteroid, The moon

### 1. はじめに

人類のフロンティア開拓には、科学的探求心と資源確保の欲求という2つの要素があった。高地や寒冷地などの僻地に冒険家や科学者は挑み続けたが、ひとたび資源が見つかりと開発を目的に集落が築かれた。ボリビアのポトシ（標高が最も高い町）やロシアのオイミヤコン（最寒の町）は、金や銀の採掘と関連する好例である。宇宙探査もまた、科学的探求心と国家権益獲得の2つの側面がある。初期の宇宙開発や冷戦時代の月到達競争は国力示威の側面が強く、80年代以降の太陽系探査は、科学的探求心が重視された。

これまでに人類は5000回以上のロケット打ち上げを経験し、最近10年の打ち上げ失敗率は5%程度である。200機以上の探査機を100個程度の天体に送り込み、太陽系内の主だった天体の姿や構成物質を理解した。太陽系を脱出して星間空間へと到達した探査機もあり、太陽系内の好きな場所へ人工物を輸送できる技術を人類は獲得した。

各国の宇宙機関は、太陽系の具体像を把握したからこ

そ、天体や生命の起源と進化という本質的な疑問に焦点を絞った科学が推進できると主張する。その一方で、探査に関連した権益獲得という側面も重視している。NASAやJAXAなど幾つかの宇宙機関は、今後5~10年かけて月の周回軌道に宇宙ステーションを共同で建設し月開発を活性化させるアルテミス計画を発表したが、その目的には地球外での資源開発技術の確立がある。民間企業による月・小惑星の探査計画や火星有人探査計画も提案されている。

### 2. 太陽系探査と成果

#### 2.1 太陽系探査の概要

太陽系探査は、地球の調査と形態が異なる。地球では現地調査が先行し、試料分析や航空測量、リモートセンシング観測との対比がそれに続いた。つまり歴史的には、大局的な検討の前にローカルで詳細な議論があった。太陽系探査はその逆である。最も精密な議論が可能となる有人探査は失敗が許容されずコスト高のため、国威発揚の色彩が強い1970年代の月探査で実施が止まった。試料獲得も往還コストがかかるため、月、ヴィルト第2彗星、小惑星イトカワ、小惑星リュウグウの4天体に限られている<sup>1)</sup>。しかし無人機によるグローバルな観測は成功例が多い。つまり太陽系探査では、まず大局的でグロー

**キーワード:** 宇宙資源, 太陽系探査, 小惑星, 月  
東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻  
2021年3月5日受理

\*e-mail: hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp

バルな観測が実施され、これに隕石や地球周辺での微小粒子のサンプルに基づく化学分析と理論的研究が組み合わせられて議論の精緻化が進んだ。

無人機による観測には、周回中や天体への接近（ランデブー）時、天体の横を通りすぎる（フライバイ）時のリモートセンシング観測もあれば、天体表面での「その場」観測もある。金星を皮切りに多くの天体（月、火星、火星衛星、水星、いくつかの小惑星・彗星、木星、木星の衛星、土星、土星の衛星、冥王星など）で地形マッピングが実施され、いくつかの小惑星と天王星や海王星、さらにそれらの衛星についてもフライバイ観測が実施された。

固体天体の表層に関するデータ量・種類は特に多く、たとえば火星は20 cm程度の高解像度で表面画像<sup>2</sup>が撮像された。そのため各天体の特性は地球と具体的に比較できる。はやぶさ探査機が隕石の多くが確実に小惑星起源であることが示したこともあり<sup>3</sup>、物質化学的な研究も融合し、太陽系全体の物質分布について大まかな描像を得ることができた。以下に今後の資源開発に関連しそうな部分について、概説する。

## 2.2 太陽系の物質分布

太陽系は、地殻と組成が大きく異なるため、地球の常識で天体を考えるべきでない。地殻はO, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mgでほぼ99%が構成されるが、太陽系を全体的にみるとH, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe, Niでできている。地球上で希少なものが太陽系全体では豊富であることもあり、その逆もある。平均組成を持つ物質が均質に太陽系に散らばっているわけではなく、太陽系の質量の99.9%は太陽で（その99.9%はHとHe）、残り0.1%の大部分が、HやHeガスを主体とする木星型惑星であるため、地球型惑星は0.001%にも満たない。

太陽系は分子雲の一部が重力収縮して形成した。初期太陽の形成後、残ったガスや微粒子（宇宙塵）が冷却し微惑星が生まれた。このとき難揮発性成分は太陽に近い側に、揮発性成分は太陽から遠い側に分布したため<sup>4</sup>、太陽系の内側に岩石と金属鉄で構成される天体があり、それらを地球型惑星と呼んでいる。逆に、外側には揮発性成分があり、木星型惑星（木星・土星）や天王星型惑星（天王星・海王星）などがある。

どの地球型惑星も組成や内部構造の意味で類似している。形成時に蓄積された熱により熔融し、重い金属が中心部へ分離したため、鉄とニッケルに富む中心核が形成された。この際鉄に溶けやすい元素も、中心核に運ばれたので、地球の地殻は起源物質と比べて鉄や白金族を含む親鉄元素が少なく、逆に長石(Na,K,Ca,Ba)(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>や、Mgよりもイオン半径が大きな元素（UやThなど）が

濃集している。PbやSn, Moなど原子数が大きく太陽系内での存在度が格段に少ない元素も、地殻には比較的多い。

鉱物種でみると、地球は太陽系の天体の中で最大の鉱物種（5000種ほど）を持ち、地球で見つからないが地球外に安定して存在する鉱物は、ほとんど無い。これは地球が岩石天体として最大であるため、放射性元素の総量が多く発熱を長期間維持したためであろう。具体的には①地球は部分的な熔融と固化を繰り返して莫大な量の花崗岩を生成したが、その過程で鉱物に取り込まれにくい不適合元素が地殻に凝集した（類似したプロセスは恐らく金星も経験したであろう）、②豊富な水と岩石の相互作用を経験した（火星も類似の作用を経験したであろう）、③プレートテクトニクスによって高压下の鉱物が地表にも循環した、④さらに約30億年前から生命活動の影響を受けた、⑤地表では生命の多様性と共に複雑な生化学的反応が生じた、などが原因として挙げられる。

## 2.3 固体天体の表面物質

宇宙資源を考える上で、天体内部の組成はあまり重要でない。天体のごく表層の最も入手しやすい部分のみが興味の対象となる。

表層環境の意味で地球と最も類似した進化過程を迎ったのは火星である。そのため火星にも、地球と類似した鉱床が見つかる可能性がある（図1）。現在の火星は平均気温-50度以下で極めて乾燥した環境を持つが、かつては水が表面付近に大量に存在しており、火山活動も活発で熱水循環もあった。多くの硫酸塩や塩化物などの蒸発岩や熱水活動の痕跡が見つかったことから、精錬しやすい金属鉱石の確保も可能と考えられる。現在も水が地下に広域で分布しており、水を獲得することも場所次第で可能である。これはロケット等の推進剤（燃料）や有

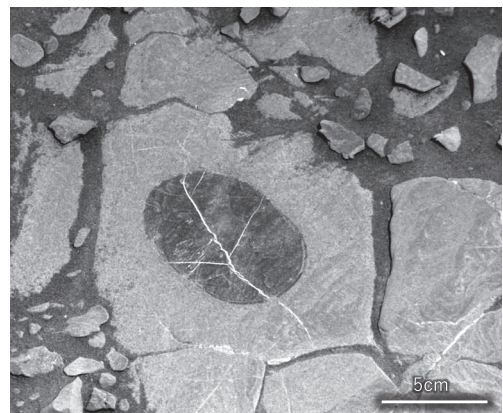


図1 火星ローバの発見したヘマタイト（Image Credit: NASA）

人活動維持（酸素源、食糧生産や物資の生産など）に利用できるはずだ。また濃度は低いメタンの存在が確認されているため、サバティエ反応で合成し水や二酸化炭素起源の酸素とあわせて推進剤にできる、とする提案もある。

月は直径約3,474 kmと小さく、約40億年前に熱的な活動度がほぼ停止した。大気も無い表面には、荒涼とした玄武岩と斜長岩の砂漠が広がる。しかしこれが幸いして、多くの外的要因物質の破片が蓄積されている。これが天体規模では取るに足らない小さな特異的な現象でも、人類にとって巨大な鉱山と呼べる元素濃集域を形成する可能性がある。最も注目度が高いのは、極域の水資源の可能性である。彗星や小天体の衝突で運び込まれた揮発性成分は、月の重力を脱出できずに水平移動し、極域の低温度領域で捕獲されたかもしれない。特に南極域のクレーター内部などには、自転軸傾斜角の影響で日照が全くない永久影領域があり、35-120 Kと極低温が維持されるため有望である。月の軌道進化を考えると、この低温領域が10億年ほど安定していたはずで、中性子分光計測でこの領域から水素の濃集が検知されたことから注目される。NASAのエルクロス探査機（Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS）による表層掘削探査（2009年）は、燃料を抜いたアトラスロケット上段をこの領域に衝突させ、その放出物を羊飼衛星（SSC）や月周回衛星（LRO）で観測するというものであった。ところが赤外吸収スペクトルが5 wt%のH<sub>2</sub>Oを示唆したとする報告があるものの<sup>5</sup>、他のH<sub>2</sub>Oの検出報告が1件にとどまるなど、確定的な結論がまだ得られていない。JAXAの進める月極域探査計画（Lunar Polar Exploration Mission, LUPEX）は、着陸機とローバによる直接掘削探査でこの論争を決着させることを主目的としている。

火星より遠方に目を向ければ、太陽から遠いほど氷や有機物が豊富に存在し、ほぼ氷でできている衛星もある。こうした天体の中には、巨大惑星の重力場で生じる潮汐加熱の影響で熱的に活発で独特の進化をしている天体もある。たとえば土星最大の衛星タイタンの表面には、液化天然ガス（LNG）の巨大な海があり<sup>6</sup>、その総量は地球の石油や天然ガス等による炭素の総埋蔵量の百倍以上とされる（図2）。太陽系で最も火山活動が活発なのは木星の衛星イオで、溶岩流の流出や爆発的噴火を頻りに繰り返すため、表面は常に更新され硫黄の濃集も見られる（図3）。

火星と木星の間には無数の小惑星が存在する（図4）。これらは太陽系形成期における残存物が進化したもので、その破片である隕石を調べることで組成を予想できる。小惑星は溶融や冷却、水との化学反応をしたものが

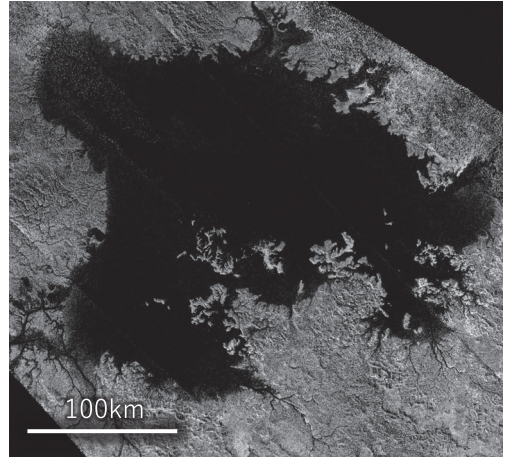


図2 土星の衛星タイタンに見られる炭化水素の湖。地球の全埋蔵量を上回ると推定されている。

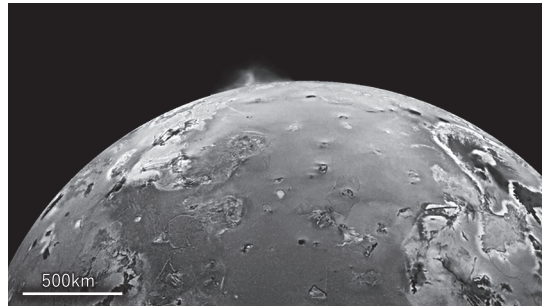


図3 木星の衛星イオに見られる巨大な火山活動。地球と似たケイ酸塩を中心とした地表だが、硫黄の濃集がみられる。

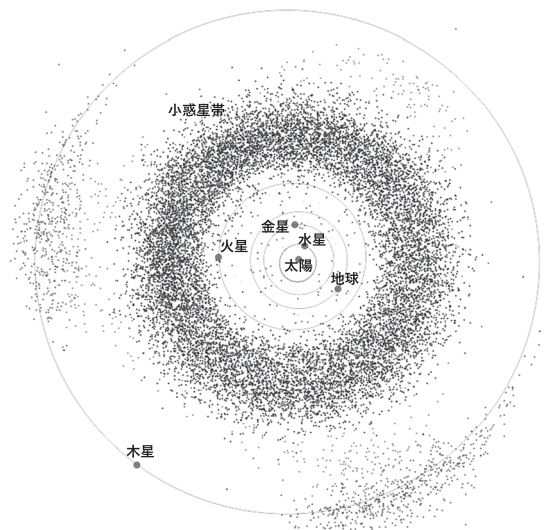


図4 太陽系の惑星と小惑星の軌道分布の模式図



多いが、地球のように大規模な元素分別は生じておらず、地球の地殻にあまり存在しない物質を多く含む場合がある。たとえば白金族元素や金は、地殻の数十～数千倍多く含まれているものがあり、中心核と似た組成を持つ鉄隕石は、濃集度が特に高い<sup>7</sup>。この中にはPtだけでなく、Ru, Os, Irなどが数十ppmの濃度で含まれるものもあり、地球の白金族鉱山に匹敵する濃集度である。

### 3. 宇宙資源の考え方

#### 3.1 ΔVによる整理

「資源という言葉には経済性が含まれるため、地球外に何があっても資源と呼ばない」と資源工学で教える時代は過ぎ去った。人類は既に地球外天体を利用して探査を実施している。今のところは地球重力を利用した探査機の加減速（スイングバイ）や、天体上層大気を利用した減速（エアロブレーキング）など、間接的な天体利用に留まるが、今後はもっと直接的な形で月や小惑星など地球外の有用物質を「その場」で利用する時代が来るだろう。この概念はISRU（In-Situ Resource Utilization）と呼ばれ、宇宙開発の現場では、あたりまえに議論されている。

ある物体が天体表面や近傍にあるとき、その物体の挙動は天体の重力に支配される。表面への落下を防ぐには、重力に応じた相対速度が必要となる。速度が早ければ周回軌道に入り、さらに速度を上げれば別の天体へ移動する軌道に入れる。そこである場所から別の場所へ移動する際の困難さを、必要となる速度変化の総量（ $\Delta V$ ）を尺度として考えると見通しが良い。 $\Delta V$ が大きいということは、それだけ推進力が必要という意味で、これを化学推進で獲得するなら、燃料量が指数関数的に増大することを意味する。つまり $\Delta V$ の増加は大幅なコスト増を意味する。

宇宙ステーションは地球低軌道（高度約400 km）にある。地球の直径がおよそ12,740 kmなので、地球の中心から見ればその距離は地上とほぼ変わらないが、地表から低軌道に到達するには、およそ10 km/sの $\Delta V$ が必要となる。一方で地球低軌道から月まで行くのに必要な $\Delta V$ は約3 km/sにすぎない。つまり地表から低軌道に到達する方が、直線距離で約1000倍も遠い月へ行くより困難である。

さらに小惑星2000SG344は、月より遠く離れているにも関わらず、地球低軌道から3.5 km/sの $\Delta v$ で往復することができる。これは質量比でみると、月は地球の100分の1であり、2000SG344は月の何百万分の1しかないことに由来する。このように小惑星は小さく、小惑星の持つ重力場が極めて弱いため、相対速度がゼロとな

るよう接近（ランデブーと呼ぶ）するだけで探査可能であり、その往復に必要な $\Delta V$ は、月に着陸するよりはるかに小さくてすむ場合がある。地球近傍小惑星の中には、 $\Delta V$ が0.1 km/sで地球に戻るものもあるため、資源利用の意味では極めて魅力的になる。

#### 3.2 揮発性成分の資源利用

地球重力は太陽系の岩石質天体中で最も大きいので、地球重力に打ち勝つ難しきこそが、宇宙開発の最大の足枷であった。地球の重力圏外において、宇宙機の移動に必要な物質を獲得することができれば、最もコスト高である推進剤を打ち上げる必要がなくなる。すると現地で推進剤を手に入れながら、自律的に何度も移動を繰り返す宇宙機が誕生するかもしれない。これこそが今後の宇宙開発の大きな目標となる。

推進力を得るための材料を地球外天体で見つけることは、それほど困難ではない。太陽系全体でみればH, He, O, Cは際立って多く、その組み合わせで形成されるメタンなどの有機物や水（氷）は無尽蔵に存在している。一般的な炭素質隕石には、オイルサンドやシェールガス生産が行われている頁岩と同様に数パーセントの炭化水素が含まれ、さらに10–20%程度の水も含まれる。こうした隕石の母天体である炭素質小惑星に行けば、揮発性成分が得られるだろう。はやぶさ2探査機による炭素質小惑星リュウグウの観測（図5）<sup>8</sup>は、この考えが正しいことを示している。

小惑星は300万個以上あると言われており、軌道が判明しているものが約105万個（2021年2月現在）ある。分布は主に小惑星帯に集中しているが、地球近傍など他の領域にも存在する（図5）。私たちの研究室では、世界最大の隕石組成データベースを作成しており、これと軌道情報や反射スペクトル等の観測情報との比較を統計的に比較しつつ、NASAのジェット推進研究所（JPL）が作成したSmall-Body Databaseを利用する形で、小惑星ごとの経済性リストも作成している。

地球から遠方に揮発性成分が存在していても、これを利用できる体制をすぐに構築できるとは考えにくいので、 $\Delta V$ の意味でも地球近傍の小惑星が有望である。また内側太陽系に飛来する太陽系外縁部を起源とする彗星も、天体内部に揮発性成分を保持したまま地球近傍に存在できるという意味で重要である。彗星は太陽の影響を受けて尾を持ち小惑星と区別されるが、表面の揮発性成分が消失すると、枯渇した彗星核なのか岩石質の小惑星なのか判断できなくなる。しかしその場合でも、内部には揮発性成分を豊富に保持していると期待できる。このような天体は一般に低アルベドである（黒い）ため発見が困難である。これは多くの使いやすい小天体が、未発見である可能性が高いことを示唆している。広域赤外線

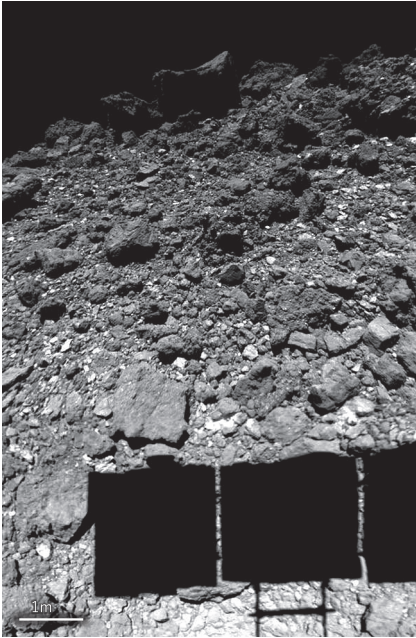


図5 はやぶさ2が撮影した炭素質小惑星リュウグウの表面。手前の黒い部分は、はやぶさ2の太陽電池の陰。(Image Credit: JAXA/U. Tokyo/Kochi U./Rikkyo U./Nagoya U./Chiba Inst. Tech./Meiji U./U. Aizu/AIST)

探査衛星(WISE)が多くの小天体を発見したが、こうした観測が今後も期待される。小天体はいまも毎日のように見つかっており、確率的にも都合の良いものが次々と見つかるもおおしくない。

既に述べた通り、月の南極周囲の永久影に揮発性成分が濃集している可能性があり、地球に近い利便性から期待が大きい。しかし月よりも地球に近い領域に、10年に1つ程度の頻度で1m以上の天体が数百日程度捕獲されるとする理論的な予想もある。短期捕獲小天体(Temporarily Captured Object, TCO)などと呼ばれるこの種の天体は<sup>9)</sup>、低軌道からの $\Delta V$ が1~3 km/sで済むものも多いと予想されている。炭素質小惑星が一定数含まれるとも期待されるので、揮発性成分獲得の候補として有望だろう。

### 3.3 地球外での輸送と利用

これまでの宇宙開発を大航海時代にたとえるなら、船や馬車で必要なほぼ全ての物品を宗主国から持ち込んだようなものだ。しかし小天体で獲得した揮発性成分を利用し、さらに地球周辺に保存したり別の宇宙機に供給することが可能になれば、入植地で必要物資を確保することで西部開拓が進んだように、宇宙開発は次のステージに突入することになる。経済的合理性に見合う手法が開

発されれば、宇宙資源は月以遠の領域への有人飛行や、木星系以遠への大型探査などでも利用され、地球周辺においてインフラ整備にも利用されるだろう。

たとえば太陽光で発電を行う衛星を地球の静止軌道に大規模に建設し、莫大な電力を地球に伝送しようという宇宙太陽光発電と呼ばれる概念がある。大規模な有人宇宙ステーションや深宇宙探査機の建設も同様だが、大規模構造物の素材を地球から全て輸送するのは、地上から静止軌道への輸送コストが約100万円/kg程度であることを考えると困難だ。さらに打上げ時の環境負荷も無視できない。すると小惑星から資源を得て、その鉄化合物を構造体に利用する方が有利であるかもしれない。

## 4. 長期的な視点

以上のように、地球外資源の利用は初期の段階では「その場」で、その後はその周辺で使われる。そして将来的には、地上で利用するかもしれない。これは長い時間スケールでの地球の状況と技術レベルの推移で決まる。

### 4.1 地球の状況

これまで地球に誕生した人間の総数は約1千億人。つまり46億年の地球の歴史の中で誕生した全人類の約7%が、いま地球に生息していることになる。しかも現生の人間は莫大な量のエネルギー(石油相当で6L/人/日)と資源(35kg/人/日)を消費するため、銅や鉛、亜鉛、原油、レアメタル、ニッケルなどの(既存技術での)可採年数は数十年とされる。こうしたエネルギーと資源の大量消費は、人口を10倍に増大させた産業革命後の現象なので、地球で46億年間かけて形成された人間が使いやすい資源が、ほんの数百年で消費されている、とも言える。資源枯渇に伴う鉱石の品位低下は環境負荷を増大させるため、文明の持続性に関する議論が活発化している。

既に流通している資源を再利用することは、エネルギー的にも環境的にも理にかなうが、回収やリサイクル処理に必要なエネルギーと副原料の確保は無視できない。エネルギー供給と環境負荷の相関、汚染除去に要するエネルギー・資源量という視点もあわせると、究極的にはリサイクルに伴うエントロピーの増大を、自然エネルギーのみで平衡に抑えられるのか、という話に帰着するため、長期間での継続性は未知数である。発展途上国が先進国並みの生活水準になれば、ストック量を上回る原材料が必要となるので、リサイクル可能な資源も超長期的には枯渇性であり、有限な資源量と環境、エネルギー問題を根本から打破する高度な技術が誕生しない限り、地球文明は大きな制約を抱えることになる。

こうした状況の打開にはいろいろな考え方があり、技

術レベルに応じて最適解は変わる。経済性に応じた資源やエネルギーの消費の抑制は社会の成熟を促し、自然エネルギーの積極的利用はエネルギーの持続性に寄与する。その間に超電導や高度な元素戦略に駆動される超高効率社会が実現されるかもしれないし、核融合などの新技術はエネルギー問題を一気に改革するかもしれない。私はそれでも、資源やエネルギー源のさらなる確保が重要で、長期的には地表面以外から得ることになると考える。

地球の総人口は2050年頃に100億人に達し、途上国も道路網やビル群、機械類を必要とする。リサイクル量を超えた資源量のニーズが生まれ、地表面以外からの資源獲得も次第に視野に入るはずだ。海底には未知の資源が手つかずに存在するし、未確認の地下資源も大量に存在するだろう。極端なことを言えば、地下3000 km下には鉄の塊があるのだから、これを地上に持ち込めば精錬する手間も無くて良いかもしれない。しかし地下大深部から地表面への運搬は、地表から周回軌道まで行けるほどの $\Delta V$ が必要となるし、地下深部を掘削するよりも、宇宙空間を移動の方が技術的に容易ともいえる（人類は1960年代に約40万 km離れた月面を踏査したが、人類が直接達した地下最深部は南アメリカのムボネン金鉱山の地下約3.9 kmに留まっている。1977年に打ち上げられたボイジャー1号が地球から200億 km以上離れている一方で、地球上で人工物が到達した最深部は、ロシアで科学的調査に使われたコラ SG-3 掘削坑の約12 kmである）。

すると物質によっては地球外から入手する方が、エネルギー的・環境的に有利となる可能性もある。白金の地殻濃集率は0.005 ppm程度でしかなく、世界の白金の75%を占めるメレンスキーリーフでも10 ppm程度だが、この数倍以上の白金が含まれる隕石がある（つまり白金

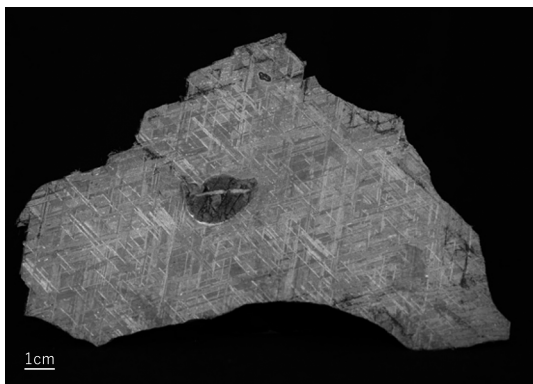


図6 鉄隕石ギベオンの断面写真。90%以上が鉄でできている。表面の模様はウィドマンステッテン構造。

族が濃集する小惑星が存在する)。地球外天体には、99%鉄でできているもの(図6)や莫大な量の液化天然ガスを持つものなど、人類に魅力的なものがあるため、往還コストが抑えられれば、価格競争力を持つかもしれない。

#### 4.2 宇宙開発の動向

地球外から物質を入手するコストを見積もるために、宇宙機関が実施している科学ミッションを尺度とするのは難しい。たとえば小惑星探査機はやぶさ2の総費用が300億円程度であったからといって、取得されるサンプルが地球近傍小惑星の3 gだから単純計算で10兆円/kgとはならない。はやぶさ2のNASA版ともいべきOSIRIS-Rexはさらにコスト高だが、これらは科学観測を行うために最適化されており、サイエンス機器を多数搭載し観測を優先するため高額になる。

一方でNASAが2012年に発表した小惑星再配置計画(Asteroid Redirect Mission, ARM)は様相が異なる。この計画は500トンの小惑星を電気推進エンジンで移動させ月近傍の軌道に投入するというものであったが、コストは30億ドル、およそ60万円/kgで月軌道に小惑星物質を持ち込める計算だった。これは地球から月への輸送コスト(約数億円/kg)より桁外れに低く、資源の利用や移動に特化すれば、コストが科学探査より大幅に下がることを示唆している。

ところでJAXAは世界に先駆けて、はやぶさ探査機や、はやぶさ2探査機を成功させ、小惑星の直接探査の道を切り開いた。宇宙空間では慣性で移動を続けられるため天体間距離は重要な要素でなく、対象天体が十分に小さければ、大型ロケットを利用せずとも世界に先駆けて小惑星のサンプルリターンが実施できることを示した。はやぶさ探査機は小惑星イトカワを調査し、この天体は低重力下であるからこそ、土砂の移動と重力偏析が生じている<sup>10</sup>ことを発見した。これは小天体に有用物が濃集している可能性が示唆されたという意味で、大変意義深い。人類にとって宝のような鉱床が、今後次々と見つかる可能性があるが、その発見は近接画像の撮像だけで可能であるため、民間企業が主体となっていち早く実施することも可能はずだ。はやぶさシリーズを成功させている日本の知見を有効活用し、宇宙利用の観点からこうした小惑星に接近する探査を実施すれば、宇宙資源利用における国際的な優位性をさらに強固にできるだろう。

近年になって、「宇宙開発は莫大なコストがかかり、予算と技術に優れたアメリカやロシアなど一部の国家のみが実施する」という描像が変わりつつある。月の裏側に初めて着陸に成功させたのは中国であるし、インドの月探査計画も進む。2018年には、ほぼ2週間に1回程度の打ち上げをSpaceX社が請負い、民間資本の活動は



既に宇宙開発に不可欠なものとなった。Astrobotic 社や SpaceIL 社、Blue Origin 社、ispace 社などが民間資本による具体的な月着陸計画を公表するなど、これまでと異なる形で月と係わる活動が活発化している。この方向で開発が進むと、従来と異なって大国が主導するのと異なる形で宇宙資源利用が進む可能性もある。

一方で各国の宇宙機関は、今後もさまざまな探査計画を予定している。現在 JAXA は、はやぶさ 2 の後継機的な位置づけでもある火星衛星探査計画 (MMX・2024 年打上げ予定) を進めており、火星の衛星フォボスからサンプルを取得しようとしている。また月極域における水の発見を目的のひとつとして、月極域探査ミッション (LUPEX) も計画している。NASA はアルテミス計画を国際協調で 2021 年から開始することを発表し、大型の月周回宇宙ステーションを建設しつつ月面有人着陸を目指そうとしている。天体探査を主導するのが科学だけでなく、資源探査的な側面が強まっており、その成果は高いに期待できる。

## 5. ま と め

宇宙資源の利用はまず「その場」利用からはじまる。特に推進剤としての利用が考えられる揮発性成分の確保や、放射線遮蔽などのためのレゴリス利用などが進められるであろう。こうして獲得された揮発性成分を天体間の自律飛行に利用できるようになると、一気に宇宙資源の利用が広がり、人工物の建設などに幅広く用いられる。地球環境に影響を及ぼさない形で資源を入手できる見通しがたつため、将来的に地球に持ち込む可能性もありうるが、それは地球での資源環境問題と技術レベルの動向に依存する。

地球上の資源・エネルギー、環境問題を抱える人類は、リサイクルや高効率化技術を開発することで文明の持続性をのばし、その間に問題解決の技術力を養うことになる。打開策のひとつは生活圏以外からの資源獲得で、地

球外資源も含まれる可能性がある。地球表面にある酸化物を莫大なエネルギーと環境負荷をかけて精製するくらいなら、地球周辺に無数に存在する有用物を地上に持ち帰った方が環境的にもエネルギー的にも優位である。

白金族元素に富む直径 3 km 程度の小惑星を地球に持ちこめば、200 億トンの使いやすい金属状態の鉄と 1 億トン以上の白金族が手に入ることになる。これは産業革命以来 200 年をかけて人類が生みだした金属鉄の生産総量を上回り、白金の総量の倍以上に匹敵する。

人類に巨万の富をもたらす大規模な宇宙開発時代は迫りつつあり、産業革命に匹敵するような人類文明の大転換が今後 100 年以内に生じても不思議ではない。宇宙資源の利用は、地球の諸問題を一気に解決する可能性すら秘めながらも、既存の技術を組み合わせていくことで実現できる重要な概念である。ただし必要となる初期コストは高額であり、科学探査で獲得された太陽系に関する科学的知見に基づき、冷静に検討することが重要だ。

## References

1. F.M. McCubbin, et al.: *Space Science Reviews*, **215**, 8, id 48 (2019)
2. A.S. McEwen, et al.: *J. Geophys. Res.*, **112**, E5, 2005JE002605 (2007)
3. T. Nakamura, et al.: *Science*, **333**, 6046, 1113–1116 (2011)
4. F.E. DeMeo and B. Carry: *Nature*, **505**, 7485, pp. 629–634 (2014)
5. A. Colaprete, et al.: *Science*, **330**, 6003, pp. 463–468 (2010)
6. R. Lorenz: 15th Cryogenics 2019 IIR International Conference, pp. 262–267 (2019)
7. J.S. Lewis: *Nature*, **372**, 6506, pp. 499–500 (1994)
8. S. Watanabe: *Science*, **364**, 6437, pp. 268 (2019)
9. S.A. Astakhov et al.: *Nature*, **423**, 6937, pp. 264–267 (2003)
10. H. Miyamoto et al.: *Science*, **316**, 5827, pp. 1011–1014 (2007)