解説

日本の太陽系探査ロードマップにおける陸空海ローバの役割

Potential Roles of Terrain, Aerial and Hydro Rovers in the Solar System Exploration Roadmap of Japan

矢野 創* 岡田 達明* 今村 剛*

*文部科学省宇宙科学研究所・惑星研究系

Hajime Yano*, Tatsuaki Okada* and Takeshi Imamura* *Planetary Science Division, Institute of Space and Astronautical Science

1. 太陽系探査ロードマップ

前世紀半ばに人類が宇宙に進出した直後から、太陽系天体の探査は新しい科学のフロンティアとして、重要な位置を占めてきた。今や人類は冥王星を除くすべての惑星と、月や火星衛星のフォボス・ダイモス、木星のガリレオ衛星、そしていくつかの彗星と小惑星への「初訪問」を終えている。これらの天体と地球を比べると、進化の程度がおおの異なり、表面地質や内部構造に違いが生じている様子がよく分かる。そこで今後の太陽系探査ロードマップの方向性も、(1) それら以外の「未踏峰」たる衛星や始原天体への訪問か、(2) 再訪問すべき天体における科学的により高度で絞り込まれた課題への挑戦の、いずれかに大別される(図1) [1]。

それらを通じた最も重要な科学目標としては、(1) 太陽系の誕生と進化過程の解明、(2) 地球型生命の起源の解明と地球外生命(痕跡)の発見、(3) 系外惑星系の統計における太陽系の位置づけなどが挙げられるだろう。特に惑星がどのように形成され、進化してきたか、今後どのような進化をたどるかについては、遠隔観測の高精度化に加えて、惑星内部の物質や構造を直接調べる探査が必須である。日本の惑星探査が戦略的に「固体惑星の内部構造の解明」と「始原天体の物質分析」を推進しているのも、天体の材料や環境を比較しながら(1)や(2)へ実証的に迫るためである。

2. ローバを使った探査方法

惑星探査の手法としては、(a) フライバイ、(b) ランデブ・周回観測、(c) 表面貫入・プローブ投下、(d) 表面軟着陸、(e) 表面・内部の移動調査、(f) サンプルリターンが挙げられる。以下では特に(c)~(f)において、移動ロボット(ローバ)が果たしうる役割を、探査天体ごとに検討する。物質探査には、地球上では地下深部に埋蔵されている物

質が表面に露出する地点に目標を絞り、岩石の顕微観察や鉱物分析をサンプルリターンか、その場分析により行う。いずれの場合も試料採取のために目標地点に確実に到達し、さらに試料の取舍選択が必要である。生命探査も、河川や水成状地形、氷床付近に探査目標を絞り、表面から、またはボーリングにより試料を採取して顕微観察や有機物分析などを行う。内部構造探査には、地震ネットワーク探査が精度的に最も信頼性が高い。以上の探査の共通点は、画像データの解像度の限界等により既存情報から探査目標点を厳密に確定することが困難であり、また着陸制御精度の限界のため、着陸後に探査対象地点を探索・選定し、移動する手段が必要なことである。

次に、これまでの太陽系探査におけるローバ採用の実績は、NASA アポロ計画の有人月探査ローバを除くと、月面での旧ソ連のLunokhod、火星衛星フォボスでの旧ソ連のProp-F、火星でのNASAのSojourner, Spirit, Opportunity, そして2003年5月に打ち上がった日本の小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたMINERVAなどである。ただし、科学観測パッケージやマニピュレータを積んだ投下プローブや着陸機、さらにははやぶさのように自律航法機能を持つ探査機までを広義の「探査ロボット」とすれば、表1のように範囲が広がる。

これらを比べると従来のローバの役割は、局所的な地表でのその場観測に限定されている。今後の「再訪問型」探査においては、ローバ1機のみで科学的成果を挙げるため

表1 重力・領域別のローバ探査対象天体(過去および現在運用中の探査機で、‡=着陸機・カプセルプローブ、* =ローバの使用実績がある天体)

重力強度	ローバ探査領域	探査対象例
微小~低重力天体	陸 (固体表面・内部)	小惑星*, 彗星核‡, 火星衛星*, カイパーベルト天体
	空 (大気)	金星, 火星, タイタン‡, 木星‡, その他ガス惑星
高重力天体	陸 (固体表面・内部)	月‡*, 水星, 金星‡, 火星‡*
	海 (液体表面・深部)	タイタン‡, エウロパ

原稿受付 2003年6月3日

キーワード: Solar System Exploration, Primitive Bodies, Differentiated Bodies, In-situ Analysis, Sample Return, Gravity

*〒229-8510 相模原市由野台3-1-1

*Sagamihara-shi, Kanagawa

図1 太陽系探査ロードマップ：研究対象と探査検討案（点線内[1][3]より改訂）

には、前述のようにローカルな情報がグローバルな傾向に外挿できる特殊地域に着陸させる制御技術と、サンプルリターンにも勝るその場試料分析ができる観測機器の両方が不可欠である。

一方、探査地点を複数、またはある程度広い領域をカバーすることも科学成果を著しく向上させる。そこで再訪問探査用のローバでは、小型・軽量・小電力消費を実現したバスシステムに比較的「単純機能」の科学機器を搭載して、探査天体上に複数ばらまき、オービタないし着陸機と多対一通信をしながら、多点観測ネットワークを構築することも検討に値する。彗星核や小惑星など表面積の小さな天体では、少数のプローブでも全球的傾向を捉えられる。

さらにローバシステム選択に際して考慮すべきは、探査天体の重力強度と調査領域によって移動方法や移動距離が異なる点である。探査対象の小惑星は大きさ数百[m]～数十[km]程であり、表面重力は $10^{-3} \sim 10^{-5}$ [G]オーダー程度である。そこで陸上では物体に作用する力が重力支配か、摩擦力など非重力支配かによって、車輪移動型（例、SELENE-B）か跳躍型（例、MINERVA）や昆虫のような登攀型（例、クリフハンガー・ロッククライマー[2]）かを、正しく選択し

なくてはならない。本稿では、車輪型の移動に適したサイズの天体を「高重力天体」、それより小さな重力を持つ天体を「低重力天体」と定義して、今後の議論を進める。これらを踏まえた上で、次章からは太陽系天体の陸空海におけるローバ探査の意義と可能性をまとめる。

3. 陸上探査

地球表面は、風や波、あるいは火山活動やプレートテクトニクス運動によって、今も絶えず変化している。惑星誕生直後の情報を現在の地表からを見つけることは難しい。

太陽系内の天体は45.6億年前に宇宙塵が集まって形成された。その集積エネルギーと取り込んだ放射性同位元素の壊変エネルギーは熱に変換された。天体が小さいとわずかに温度上昇するにすぎないが、天体が数百から数千[km]に達すると、この熱によって熔融し、億年単位の地質時間でみると岩石も流動する。重いものは惑星中心に沈降し、軽いものは惑星表面に浮上するという重力分離（分化）が起こる。この結果、地球などの岩石惑星では中心に金属核、周囲にマントル、表面に地殻という層構造が形成される。逆に小惑星や彗星の多くは小さなサイズゆえに未分化のまま

進化を終了した「始原天体」であり、それぞれ内惑星領域と太陽系外縁における原始太陽系の誕生時の物質情報を、比較的よく残していると考えられている。したがって、様々な進化段階の固体天体を調べれば、地球の研究だけでは知ることのできない惑星の形成・進化の過程について理解を深めることができる。

3.1 低重力・未分化天体

太陽系小天体探査の本格的な始動は、1985～1986年のハレー彗星探査に対する国際連携である。その後は大型惑星探査機の小惑星フライバイが行われ、NEAR シューメイカー探査機による小惑星エロスのランデブと続いてきた。これまでの検討から、2020年頃までに我が国が挑むべき始原天体探査の研究目標には、(1) 太陽光の反射分光スペクトルの特徴によって分類される型が互いに異なる小惑星からの複数サンプルリターンによる、小惑星観測データと隕石・宇宙塵の分析データとの対応の決着、(2) 彗星核、P、D型小惑星、CAT天体、トロヤ群小惑星など、有機物・揮発性物質を多く含む始原天体への初訪問（特に着陸探査）による、宇宙起源生命前駆物質の進化の理解（宇宙生物学への貢献）、そして、(3) 始原天体・固体惑星の内部構造の解明などが挙げられる[1]。

そこで、まず2010年代の次期小天体探査では、はやぶさで培った探査技術と科学的成果を最大限に活用しつつ、上記課題に必要な新規技術開発や科学的挑戦にも挑み、両者を橋渡しすることに留意すべきである。特にその場試料分析とサンプルリターンは相補的な技術であり、主に前者での活躍が期待されている低重力天体探査用ローバの開発は、目玉の一つとなる。

同時にローバには、光学カメラなどの基本機器に加えて、小惑星表面試料のその場分析装置を搭載する必要がある。その種類は、訪問する小惑星のスペクトル型によって異なる。例えば、C型やP、D型小惑星には有機物を検知するセンサ、M型小惑星には微量金属元素を検知するセンサといった具合である。さらに、小惑星の内部構造やバルク密度、引張強度などが、天体の成り立ちやその後の熱的履歴を推定する上で極めて重要な計測項目として認識されている。地質境界面を持たない未分化小惑星や、空隙率の高い rubble pile 構造の場合、地球のように土壤中の「水」の存在を活用した地質計測手法はそのまま転用できない。また地球上で確立している物理計測方法は、調査したい領域の大きさ、深さ、さらにそれぞれに求められる空間分解能によって、数種類に分岐している（図2）。ゆえに、小惑星環境に最適な物理計測装置を搭載することが、もう一つの課題である。

3.2 高重力・分化天体

3.2.1 ヴェスタ

次世代の小天体探査で解明すべき課題の一つとして、「未

分化の微惑星が衝突合体成長していくと、どの段階から熱的分化が生じ、惑星や衛星の種となるのか？」が挙げられる。これには比較的大型の小惑星の内部構造を探索することが必要なため、訪問先には、(1) 同一小惑星が衝突破壊して、似た軌道要素に分布している小惑星族の複数メンバーへの歴訪か、(2) 分化した内部が露わになっている大型小惑星表面の複数地点での露頭探査が考えられる。

後者に適した天体はV型小惑星で、熱的分化の証拠である火成岩・HED隕石の母天体と考えられているヴェスタである。ヴェスタは明らかに熱的分化が始まった「分化小惑星」で、直径500[km]である。ハッブル宇宙望遠鏡での観測によって高さ12[km]の中央丘を持つ直径300[km]以上の巨大クレータが存在することが判り、内部構造がむき出しになっている可能性が示唆されている。なおローバ移動手段の観点から、ヴェスタは「高重力天体」の下限に位置づけられる。NASAのDawn探査機は2010年にこの天体の周回軌道に入り、軌道上観測を行う予定であるが、着陸は行わない。一方宇宙研の検討では、帆に当たる太陽光輻射圧と薄膜太陽電池発電を併用した「電力セイル」を使うとこの天体へのランデブが可能になる[3]。その際、最大クレータの外側、内壁、中央丘等の複数箇所において、後述のSELENE-B同様の「ローカルな岩石鉱物分析」を行えば、分化天体の内部物質を直接調査することになる。

3.2.2 月

日本は月に対して、LUNAR-A、SELENEで再訪問探査を繰り返すビジョンを持っている。現在検討中のSELENE-B計画では、月のクレータ中央丘近傍に着陸し、その場での地質探査を目指す[4]。中央丘は月深部物質の露頭であり、天然のボーリング調査が実現できる。中央丘に含まれる多数の岩相を調べるために、ローバを用いて中央丘から崩落した複数の岩石を探索する。この探査がうまくいけば、月深部物質の岩石学的特徴、特にマンツルの密度情報が得られ、月内部構造の推測に役立つ。また、月の初期進化におけるマグマオーシャンと呼ばれる熔融状態について知見が得られる。ただしサンプルリターンではなく地質のその場分析であるため、岩石組織をマクロで観察する必要がある。そのとき観測面の平滑さが要求されるため、SELENE-Bでは試料を回収するローバと科学機器パッケージとしての着陸機を組み合わせ、岩石の切断・研磨機構を搭載することを予定している。開発に当たっては、岩石加工時の反力の確保、発生する削り屑や熱の処理の問題をクリアしてはいけない。

3.2.3 火星

NASAの火星探査シリーズでは、まず無人ロボットで全球マッピングを行う。そこで発見された科学的に興味のある主要な土地に、無人着陸機・ローバを下ろして地下水・生命痕跡探査を試みる。その後、無人サンプルリターンを実

図2 低重力・未分化天体の表層および内部構造探査のスケール別戦略

施して、宇宙検疫上の安全が確かめられた段階で、初めて人間を現地へ送るシナリオである。まず、Mars Pathfinder ではローバ・Sojourner を送り、数十 [m] の領域内の岩石や土壌を調査した。探査地点は各年代に様々な地質活動によって堆積した岩石が点在するアレス峡谷の河川敷が選ばれ、火星地質の多様性が明らかになった。この成功を引継ぎ、土壌中の水分調査を主とする2機の Mars Exploration Rovers が、今年6月に打ち上げられた。火星に特徴的な河川敷や峡谷内の瓦礫地帯での地質調査、最近見つかった流水に関係する地域や氷床近傍での生命探査が、特に期待される。

3.2.4 水星

水星では日欧共同の Bepi Colombo 計画で、着陸機とローバの搭載が検討されている。水星には月の海のような玄武岩質溶岩が見られないが、その原因は水星形成時に捕集した石質の成分に依存する可能性がある。レゴリス中から岩石片を採取し、その場で分析することが期待される。

4. 空中探査

大気を持つ惑星では、カプセルプローブ、気球、パラグライダー、航空機型のローバによる探査も考えられる。カプ

セルプローブは金星と木星で使用実績があり、土星衛星タイタンにも ESA の Huygens プローブが向かっている。

4.1 金星

日本は長い間、回収型気球による天文観測や大気物理学気球で実績を挙げてきた。その技術を他の天体に応用すれば、地上の障害物に関係なく広範囲を移動できて、周回衛星に比べて高い解像度で地表面を観察できる。電離層より下を浮遊し、しかも地表面に近いことは、地磁気計測や地下レーダ探査にも有利である。風まかせなので狙った地点に到達することは難しいが、風とともに動くことを利用して、風の分布を描き出して惑星上の比較的広範囲での気象を知ることでもある。

すでに実施されたミッションとしては、1985年に旧ソ連とフランスが共同で金星に送り込んだ2機の VEGA 金星気球がある [5]。これらの気球は濃硫酸の雲（高度45～70 [km]）の中ほどを約2地球日にわたって浮遊し、金星特有の強い東風に流されて金星を約1/3周する間に様々な気象観測を行った。近年、NASA ジェット推進研究所においてさらに野心的な計画が検討されており、火星の希薄な大気中を浮遊する大型気球 Mars Aerobot や、金星の高温・濃密な下層大気（460°C、90 気圧）と涼しい上層大気を往復する Venus

図3 金星の雲の下を浮遊する気球の想像図

Aerobotなどが提案されている。

日本でも、宇宙研を中心として、金星の高度35[km]付近を数週間にわたって浮遊する気球が検討されている[6]。この高度は雲の下であるから、気象観測に加えて、いくつかの波長域では地表面の光学観測も可能となる(図3)。気温は180°Cに達するが、高温下で動作する半導体の守備範囲であり、冷却器を必要としない。この気球は、金星の大気が二酸化炭素からなることを利用して、それより分子量の小さい水蒸気を浮力ガスとして使用する。水蒸気は液体の水として気球内面に張られた吸水シートに貯蔵されて金星まで運ばれ、気球がパラシュートで金星大気中を降下する間に周囲の熱が皮膜を通して流入することによって自然に気化するため、小型・軽量の気球ブローブを構成できる。また別の構想として、高度20[km]付近を浮遊する直径1[m]程の中空金属球の気球も検討されている[7]。この高度では約20気圧という高圧のために大気の密度が高いため、そのように小型の気球でも浮遊することができる。

4.2 火星

最近のMars Global SurveyorやMars Odysseyによる高解像度撮像によって、火星表面に現在も流水が存在し、水の表層循環が起きている可能性が指摘された。γ線・中性子分光探査により、火星の高緯度は深さ1[m]以内まで水を含む凍土層が存在することが分かった。火星にはかねてより河川状地形、海岸状地形が報告され、かつて火星表面に流水があった可能性が指摘されていた。実際、火星の極冠にはドライアイスのほか、氷も存在する。火星表面の昼間の大気圧と気温は水の三重点付近であり、その場の条件さえ揃えば水は液体として存在できる。また、数値計算によって、深さ数100[m]から数[km]には滞水層が存在することが予測されていた[8]。水の存在は環境科学としての重要性

図4 火星の大峡谷を飛翔するパラグライダーの想像図

と、生命存在の必要条件としての重要性を持つ。

現在の火星表面の大部分は乾燥地帯であり、水が直接探査できる可能性が高いのは、クレータや峡谷の崖面である。崖面探査には、表面移動型よりも空中飛行するグライダー型の探査機の方が安全かつ広範囲の地域をカバーできる。火星大気圧が7[hPa]程度と薄いため、翼に揚力率の高いパラフォイルを用いる方法が考えられる[9](図4)。

火星の中高緯度のある程度の深さ(数百[m]~数[km])では地熱によって凍土層の一部が溶けて、地下滞水層になると考えられる。崖面に出口ができると、それが表面に噴出する。グライダー型探査機から可視・赤外望遠鏡でこれを観察する。地球と同様に地下水にラドンが濃集するならば、γ線計測も有効である。滞水層の電波反射率が大いことを利用して、電波エコー探査も考えられる。深さ数[km]まで浸透させるには1[MHz]以下の周波数が必要なため、火星電離層よりも下側で行う必要があり、周回探査機よりもグライダー型探査機の利用が有効となる。

5. 海洋探査

地球は「水惑星」と呼ばれるほど、大気と固体表面の間に安定的に液相の水が存在でき、それゆえに生命の多様性が育まれたと考えられる。JAMSTECの無人探査船「かいこう」などによる深海への科学探査も盛んに行われている。また地球よりも重力が弱く、大気を十分保持できなかった火星でも、太古には海洋や河川が存在したらしい。しかし地球以外で現在も、大気層ないし固体(氷)表層の下に液相の「海洋」を保持し得ると考えられる天体は、木星衛星のエウロパ等と土星衛星のタイタンである。そのため、太陽系天体の「海洋探査」はこれまで、ESAのHuygensブローブが固体表面ではなく海に「着水」しても機能するように設計されているほかは、世界でも実績がない。

しかしながら、エウロパの氷床下の海には、太陽光が弱くとも木星の潮汐力からエネルギーを得られるため、地球海溝の熱水鉱床近辺に似た独自の生態系が現在でも存在す

るのではないかと、という議論が近年注目されている。そこで米国の惑星科学者、ロボット技術者、海洋生物学者らが集い、着陸機と潜水艇ロボットを組み合わせたエウロパ海洋での生命探査計画「Ice Pick 構想」を検討している。

自律型潜水艇ロボットとしては、日本にも JAMSTEC の「うらしま」がある。また、海水中の微生物検出のための搭載機器や、表層下の潮流によって短期間で閉閉を繰り返している地溝帯付近に着陸機を下ろし、新しく噴き出た海水を使った生命探査の検討も、日本の研究者が世界に先駆けて提唱した [10]。日本には水衛星の進化過程を研究している専門家も多く、宇宙ロボットと海洋探査技術が融合すれば、この領域でも新しい科学を創始できる可能性がある。

6. ま と め

以上、今後 20 年間程度の範囲で、日本の太陽系探査が目指すべき科学目標にローバが貢献できる可能性を、探査天体および調査領域別に概観した。その際、重力強度や陸空海などの移動空間によって最適な移動手段と移動距離を選び、それぞれの科学目的を満たす観測機器を搭載できるリソースの確保が必要である。さらにローバは小型・軽量・省電力消費を実現しながらも、独立した宇宙機システムとして必要な機能を高集積化できなくてはならない。なお、今後の主流となる「再訪問型」の惑星探査では、単独機によるローカルな詳細調査だけでなく、複数群の通信ネットワークによるグローバル観測のような新しい形が有効な場合も

出てくると予想される。

参 考 文 献

- [1] 矢野, 安部, 藤原, 吉光, 秋山, 小天体探査フォーラム: “次期小天体探査構想”, 第 3 回宇宙科学シンポジウム講演集, 宇宙科学研究所, 2003.
- [2] K. Yoshida, Y. Nishimaki, T. Maruki, T. Kubota and H. Yano: “Sampling and surface exploration strategies in MUSES-C and future asteroid missions,” Proc. i-SAIRAS 2003, Nara, Japan, July 2003.
- [3] 矢野, 長谷川, 石黒, 松浦, 今村: “ソーラーセイル推進を使った惑星探査・天文観測”, 第 3 回宇宙科学シンポジウム講演集, 文部科学省宇宙科学研究所, 2003.
- [4] S. Sasaki, et al.: “Rover exploration on the lunar surface: a science proposal for Selene-B mission,” Adv. in Space Res., in press, 2003.
- [5] R.Z. Sagdeev, et al.: “The VEGA Venus balloon experiment,” Science, vol.231, pp.1407-1408, 1986.
- [6] 井筒, 矢島: “膨張型低高度金星気球”, 宇宙科学研究所報告, vol.44, pp.51-61, 2002.
- [7] N. Izutsu, N. Yajima, H. Hatta and M. Kawahara: “Venus balloons at low altitudes by double capsule system,” Adv. in Space Res., vol.26, no.9, pp.1373-1376, 2000.
- [8] S.M. Clifford: “A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars,” J. Geophys. Res., vol.98, pp.10, 973-11, 016, 1993.
- [9] T. Okada, et al.: “A survey of Martian aquifer using a parafoil-based glider,” Proc. 2nd STEPS Working Group, August 2002, ISAS, Japan, 2002 (text in Japanese).
- [10] H. Akiyama, A. Shiraishi, J. Haruyama, J. Terazono and H. Yano: “Mission to Europa's sub-surface ocean and search for its possible biological evidence,” Adv. in Space Res., vol.23, no.2, pp.367-370, 1999.

矢野 創 (Hajime Yano)

1995 年英国ケント大学院宇宙科学科博士課程修了。NASA ジョンソン宇宙センター NRC 研究員等を経て、1999 年より宇宙科学研究所惑星研究系助手。専門は惑星探査、宇宙環境科学。はやぶさ計画では小惑星試料採集装置の開発、試料の初期分析を担当。次期小天体探査計画の立案でも中心的役割を果たしている。

岡田達明 (Tatsuaki Okada)

1996 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員 PD を経て、1999 年より宇宙科学研究所惑星研究系助手。専門は惑星物理学、惑星探査。はやぶさ計画、SELENE 計画ではともに蛍光 X 線分光計の開発を担当。次期月探査計画の検討・立案にもコアメンバーとして参加している。

今村 剛 (Takeshi Imamura)

1998 年東京大学大学院地球惑星物理学専攻博士課程修了。宇宙科学研究所助手を経て、2002 年より宇宙科学研究所惑星研究系助教授。専門は惑星大気科学。火星探査機「のぞみ」において電波による大気計測を担当する傍ら、進行中の金星探査計画 PLANET-C では計画立案や光学機器開発に携わっている。