

「将来の月惑星科学・探査において最も重要になるであろう、第一級の科学」報告書

月惑星探査の来たる 10 年 地球型惑星固体探査パネル

地球型惑星固体探査に関する第一級の科学について、20 件を超える公募提案ならびに討論会における議論を踏まえて検討を行った結果を報告する。本パネル名に示す地球型惑星は広い意味で用いており、月や他の惑星の衛星を包含することはもちろん、太陽系小天体も視野に入る。同様に「固体探査」には、大気進化や生命活動など惑星表層環境の形成と進化に関連するテーマも内包されていることに留意されたい。今回は対象に応じて幾つかのパネルに分業して第一級の科学の検討作業が行なわれたが、それらは互いに排他的なものではなく、今後、横断的な科学検討を行うことも重要である。また、今回の公募提案に含まれないが基本的に重要な課題については、パネルとして重要性を指摘した。

惑星科学における地球型固体惑星の最大の重要性は、これらが太陽系において我々の暮らす地球にもっとも性質の似た天体であり、その科学的理解が地球の起源と進化の理解に直接的につながることにある。言い換えれば、各惑星の構造、そこに生起する諸現象、ならびに誕生から現在までの歴史を詳らかにし、それらに基づいて惑星の形成と進化の過程を解明すること、また、地球や他の天体がそれぞれ個性を持った天体へと分岐した条件を明らかにすることが重要である。さらに、月などの初期に地質活動を終えた天体は、太陽系全体の歴史の良好な記録媒体としても位置付けられ、その解読は、惑星進化に影響するさまざまな外的諸要因がどのような変遷や進化を経てきたのかを解明するための貴重な手掛かりとなる。

その一方、地球科学が多様な分野からなることから分かるとおり、地球型固体惑星の科学にも様々な切り口があり、実際に本パネルに寄せられた公募提案もその対象天体と内容は多岐にわたる。本パネルでは、どのような科学テーマが最も重要と考えられるのか、その波及性ならびに独自性の観点から検討し、その整理抽出を試みた。

その結果、今後約 10 年の地球型惑星固体探査の第一級の科学としてここに提案するものは、1. 月惑星内部構造の解明、2. 年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明、3. 固体部分と結合した表層環境の変動性の解明の 3 項目である。それぞれの項目の内容について以下に具体的に述べる。

1. 月惑星内部構造の解明

内部構造は、それぞれの天体の構成物質や分化状態を直接的に表す。したがってその決定

は、各天体の起源と進化を解明する上でもっとも基礎的な情報となるが、これまでもっとも充実した内部構造探査の行われている月についても、基本的な量である地殻厚やコア半径についてさえ極めて大きな不定性があり、きちんと求まっていない状態にある。さらに月以外の天体については、全球重力場や章動・秤動の計測から平均密度や慣性能率が推定されているのみである。

我が国は中止にはなったが Lunar-A 計画による月内部探査の知見技術の蓄積があり、地震波計測を中心とした内部構造探査技術の開発で世界の先頭に立っている。同時にこれを支える理論研究の展開により、広帯域データの取得によって月内部構造を段階的に解像し、月の起源と進化の理解を進める道筋が明らかにされている。地震波計測は固体天体内部をもっとも高い分解能で解像できる手段であり、3 次元的不均質性、破壊（発震）機構、流動特性（減衰・レオロジー・固相対流）、水の存在度など惑星内部の多様な特性についても明らかにすることが期待できる。そのためには地震波トモグラフィ、震源機構研究など地球における地震学的研究方法と成果の積極的活用が強く求められる。

これと並行して、大気をもつ惑星では大気励起自由振動が存在し、仮に地震活動がなくとも自由振動計測によって地震波速度構造および弾性波減衰率の決定が可能なことも理論的に示されており、これは火星内部を探る我が国発の科学として期待できる。ここから地殻厚やコア半径・相状態、マンツルの非弾性などが明らかになれば、火星の構成物質・熱的状态・揮発性物質分布・火成活動の総フラックスなどが制約され、表層環境の進化の解明にもつながる。

内部構造の決定には、地震計測に加えて重力場、地形、自転、電磁感応、地殻熱流量についてのデータが有用である。それと同時に、地殻やマンツルを代表する参照物質を見出し、その組成を求めることも重要である。

金星や水星、ガリレオ衛星、小天体等もむろん重要な対象であるが、過酷な熱環境など、内部構造を直接的に決定する上での技術的困難を乗り越えるための有望なアイデアが今のところない。しかし、特に金星については地球の双子星とも呼ばれ、地球との比較対象として、特に液体の水の有無に代表される惑星表面条件の違いが内部構造にどう影響しているのかを知る意味で重要であることに留意しておきたい。さらに 4 つの惑星に加えセレスやベスタなど大型の小惑星について内部構造を明らかにすることにより、相互の比較だけでなく、内部太陽系における固体物質の組成分布、特に鉄の酸化還元度と揮発性物質存在度について情報が得られ、それらは惑星材料物質の多様化をもたらした過程を解明するための手掛かりとなる。

2. 年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明

火星と月はその地表に多数の衝突クレータを保存しており、地球ではその大部分が失われた惑星誕生直後の初期の地質記録を今なお豊富に蓄えている天体である。その解読は各惑星のみならず、大気海洋の形成や地殻の分化、ひいては生命の起源など地球の初期進化過程の理解につながる。

これらの天体の進化の解明を主眼とする表層探査は各国によってこれまでも活発に展開されてきた。その結果、表面の相対地質年代分布が明らかにされ、小天体衝突頻度、地殻の分化と火山活動史、火星においてはさらに気候の変遷について大まかな描像が得られるに至っている。しかしながらこれらの描像は、リモートセンシングによる全球マッピングデータに強く依拠しており、以下に述べる大きな不定性が潜んでいる。これらの不定性をなくし初期進化の描像をより具体化することが、今後の重要な科学目標と考えられる。

不定性の第一は、地質年代の決定精度である。固体天体の地質年代の推定は、クレータ年代学に依拠している。これは月面の各領域におけるクレータ密度と基盤岩の結晶化年代間の関係に基づいているが、データ取得点が粗く不定性が大きい。これは原始地球に降り注いだ小天体のフラックスにも大きな不定性があることを意味する。さらに火星など他の天体になると、月で得た関係から外挿しているに過ぎず、同じクレータ密度の地域でも研究者によって十数億年も年代の見積もりが異なる。

近年、海王星以遠天体の軌道要素の統計分布から、初期太陽系において木星およびそれ以遠の惑星は、惑星同士と残存微惑星集団との重力相互作用によって、それぞれの軌道半径を大幅に変えたと推定されている。この「惑星大移動」に伴い、外部太陽系だけでなく地球型惑星領域へも多数の小天体が散乱されたはずであり、これが月や火星に残る高密度クレータ地域を形成したと考えられる。地質年代の決定精度を高め、小天体のフラックスの進化を解読することで、惑星大移動のタイミングと、それによる固体惑星への小天体フラックスの変遷について明らかにすることができる。

不定性の第二は、表層物質の組成である。現状の周回探査や着陸機による分析では、地表物質の組成を大まかには決定できるが、詳細に求めるまでに至っていない。特に周回探査では空間分解能にも限界がある。物質組成の詳細な決定からは、その物質の生成環境と変質の歴史について多くの情報を引き出すことができる。実際に月や火星、一部の小惑星についてはそれぞれの天体に由来すると考えられる隕石が見いだされおり、それらの分析から種々の情報が得られている。しかしこれらの分析から導かれる推論にも限界がある。それは、もともとこれらの物質が各天体上のどの地点にあったのか不明であり、層序や地質構

造と関連づけた解釈ができないためである。火星など大気をもつ天体については、大気同位体組成を精密に決めることも残された重要課題である。特に希ガス同位体組成、D/H比、大気主要元素の同位体組成は、固体リザーバーとの交換および大気散逸の規模とタイミングを制約するうえで極めて基礎的なデータである。

これらを具体的に推進する手段として、サンプルリターンやその場分析などが提案されているが、手段と科学の両面からさらなる具体化の検討を行うことが重要である。探査の技術的困難さゆえに、今回の応募提案には金星や水星に関するものはなかったが、これらの天体についても上記の観点でこれらの天体の研究を行うことは、疑いなく第一級の科学課題である。

3. 固体惑星と結合した表層環境の変動性の解明

地球をはじめ大気を有する固体天体には気候システムが存在し、固体惑星（ここでは惑星の地表および内部を固体惑星と呼ぶ）と物質的・力学的に相互作用している。その特徴的な時定数は、その惑星の歴史にまたがるものから、日々変動ないしは突発的な気候現象にいたるまで多岐にわたる。

時定数の短い相互作用は、それを積分した効果として表層環境と固体惑星に長期的な変動をもたらす惑星進化の素過程と位置付けることができ、現象の発見解明にとどまらない重要性を持つ。しかし、探査データに立脚した定量的な解明は現時点ではほとんどなされていない状態にある。これを解明する対象天体として最初に考えられるのは火星である。火星を対象とする利点は、極冠の消長など、明らかに大気と地表間で物質交換が起こっていることに加え、内部構造解明のための観測手段が、火星気候システムと固体火星の力学的・物質科学的相互作用を定量的にモニタリングする手段にもなることである。また火星の場合は、大気が比較的薄く軌道船からの撮像などリモート観測により大気下層から上層までカバーする気象学的データの取得が可能である。これらの探査と共同することによって、大気科学と惑星内部物理学の境界領域の開拓が期待できる。

地球に近いサイズを持つ金星は、現在も地質学的に活動的である可能性があり、その気候システムと固体惑星の相互作用の解明には、詳細観測の技術的困難性を除けば、火星以上に科学的重要性があるといえる。活火山や噴気活動の探索、風化地形や風化物質のマッピングなど、大気探査と相補的に進めることのできるテーマを考察することが重要である。

惑星史を通じた長期的な変動過程の解明においては、固体惑星との揮発性物質の交換過程

の制約、表層環境史の復元、大気形成過程と大気散逸過程の解明が必要となる。それにはすでに述べた惑星大気組成の決定に加えて、地表に固定されている揮発性物質のリザーバーサイズならびにその組成の推定、地質学・岩石学による表層環境史の制約、火成岩の分析による脱ガス気体成分の推定、初期の惑星上での衝突過程の物理化学プロセスの解明と小天体フラックスの制約、さらに惑星超高層大気のダイナミクスの解明を並行して進めることが重要である。

前項にも関連するが、これらの解明において大気を持たない固体天体表面を覆うレゴリスの物質科学的研究も重要な意味を持つ。レゴリスの形成年代・変質過程・打ち込まれた高エネルギー粒子等を調べることにより、隕石重爆撃、太陽風組成、太陽活動などの履歴について記録を引き出すことができる。