

## 小天体パネルからの報告（平成 23 年 1 月 20 日）

坂本尚義・荒川政彦・渡部潤一・伊藤孝士

小天体パネルは表記した四名から構成され、各々が属する関係業界（物質分析関連業界、衝突関係業界、小天体観測関連業界、小天体力学関連業界、等々）の関係者から全体計画（月惑星探査の来る十年）についての意見聴取を行った。その上で、事務局を經由して小天体探査に関する 12 通の提案書を受け取った（他パネルに提出された提案書であっても該当すると判断されたものも含む）。小天体パネル構成員および事務局担当者との打ち合わせは電子メールおよび直接会合（平成 22 年 9 月 1 日、国立天文台三鷹）で行われ、そこで平成 22 年 9 月 10 日の公開討論会（神戸大学）に向けて中間的な意見集約が行われ、発表用資料が作成された。この公開討論会に於ける議論の後、平成 22 年 12 月 10 日に小天体パネル分科会が開催され（国立天文台三鷹）、そこで各提案書の主提案者より探査提案の趣旨説明が行われた。以下の報告はこのようない連の議論を経て作成されたものである。

小天体パネルでは事務局宛に提出された提案書からトップサイエンスを構成するに当たり、提案書の内容を二つの科学目標的な軸に沿って分類した。軸のひとつは小天体を構成する物質の始原度である。始原度という用語の定義には曖昧な部分もあるが、ここでは以下の状況を念頭に置いている。・始原度が低い天体は、天体形成後、熱変成や水質変成をうけた結果、揮発性成分が失われシリケート成分を多く含有する。・始原度が高い天体は変成・変質が少なく、揮発性成分である有機物や水を多く含有する小天体は大型惑星に比べれば一般的に始原度が高いが、その中でも相対的に始原度の低い天体としては E 型小惑星や S 型小惑星が挙げられ、逆に相対的に始原度の低い天体としては D 型小惑星や彗星核が挙げられる。提案書分類のためのもう一つの科学目標的な軸は天体の構造、すなわち天体のサイズもしくは分化している天体か未分化天体であるか、という区分けである。分化している小天体への探査と未分化小天体への探査ではその科学目標も自ずと異なるはずなので、この分類軸の導入も意味を持つ。

以上では提案書の分類として小天体パネル側が準備する二種類の科学目標的な軸について述べたが、提出された提案書はその探査手法によっても三区分に分けられることが分かった。(a) サンプルリターンやその場分析といった手法によるもの、(b) 衝突現象の実現など物理探査的な手法によるもの、(c) リモートセンシングの手法によるもの、である。こうした手法による三区分の各々に応じて上記した二種類の科学目標的な軸によるグラフを作り、各提案書の提案する探査計画がそれらの軸上でどのような位置付けになるのかを検討した（平成 22 年 12 月 10 日の小天体パネルに於けるパネルリーダーからの発表用資料を参照のこと）。しかる後に探査手法による区分け (a) (b) (c) に関する分類図を重ね合わせ、各々の提案書が提案する探査対象もしくは科学目標がどのような分布を持つのかを考察した。ここで重要なことは、異なる提案者から提案された異なる提案書が同一の科学目標分布を持つこととすれば、そこで検討されている科学目標は多くの研究業界人にとって共通に重要なものであり、故に惑星科学業界全体への波及効果も高いはずであるという事柄である。

このようにして提出された提案書の分類と科学目標分布を分類した結果、複数の提案に於いて、小天体の中でも特に始原的・未分化な天体への探査（可能であればサンプル採取）が必要であるという主張が共通であることが目に付いた。一般に、研究対象天体が始原的・未分化であればあるほどその研究結果を通して太陽系の起源に近付けることは言うまでも無い。従って、そのような始原的天体の探査から持たされる成果は太陽系の起源を議論する惑星探査以外の研究手段、例えば実験的・観測的・理論的・数値的手法などに対して大きな影響を持つと思われる。このような背景より、本稿で小天体パネルが報告する「トップサイエンス」目標のひとつとして小天体の中でも特に始原的・未分化な天体への探査の方向性を挙げたい。なお平成 22 年 12 月 10 日の小天体パネル分科会では、上記した科学目標的な分類二軸（始原度と天体構造）の他に、惑星科学関連諸分野への波及効果という評価軸も存在するはずであり、それについても考慮すべしという指摘があった。先にも述べたように小天体の中でも始原的・未分化な天体への探査は太陽系の起源に最も近付けるという意味で惑星科学関連の諸分野に対して非常に大きな波及効果を持つはずで、その意味で当該の指摘に対しては既に対応できているものと考え。

より始原的かつ未分化な天体への探査という意味ですぐに思い付くのは彗星核を調査する計画であろうが、本稿では一例として特異な小惑星 (3200) Phaethon への探査を取り上げる。これは探査提案書のひとつとして既に提出されているものである。Phaethon は Apollo 型の近地球小惑星であり、彗星活動は明確には確認されていないがその軌道は小惑星としては特異であり、離心率と軌道傾斜角がとても大きい。Phaethon の軌道要素はふたご座流星群のそれと酷似しており、同流星群の母天体であることが推定されている。更にはその力学的および光学的特性から Phaethon の分裂破片ではないかと思われる天体も既に確認・観測されて

おり、Phaethon は近過去の分裂・破壊の痕跡を未だに保持している可能性がある（その分裂・破壊がふたご座流星群の発生原因であるとも想像される）。Phaethon のスペクトル型は青い B 型だが、表面の一部には B 型よりも赤い C 型のスペクトルを示す部分も存在する。また、ふたご座流星群では顕著なナトリウム枯渇が観測されており、これは母天体である Phaethon の化学的性質を反映しているとも考えられる。このように Phaethon は他の小天体には見られない様々な特徴を持ち、以下の三つの観点で興味深く、その探査は関連諸分野への波及効果が高い。(1) 太陽系最初期の物質分化、特に熔融の影響、(2) 彗星から小惑星への遷移状態にある天体の状態（これは始原的隕石から分化した隕石への遷移状態を知ることにも通じる）、(3) 分化過程に伴う揮発性元素（例えばナトリウム）の挙動。Phaethon のような特異な天体に対して探査機を送り込めば、上記のような複数の科学目標の同時達成が期待できる。これは他の天体では不可能で、Phaethon という特異な天体だからこそ実現できるものであり、Phaethon 探査の科学的な効率の高さを示すものと言えよう。なお Phaethon は軌道傾斜角が約 22 度と大きく、探査機を近づけることが工学技術的に難しいという問題がある（打ち上げロケットの能力等の制限）。そのためにサンプルリターンの実現は困難かもしれないが、仮に片道での探査計画となりランデブーあるいはフライバイのみの実行となっても、Phaethon が持つ多様な側面は多くの科学的知見を持たらしてくれるだろう。また、Phaethon への探査機投入が工学技術的に難しいという事実は逆に、探査の立案・実行が技術的にも新たな挑戦を生み、理学的関心のみならず工学的な観点でも当該分野に対して大きな波及効果を持つ計画になり得る。このように (3200) Phaethon の探査は様々な面で大きな意味を持つ。

さて小天体パネル内で議論され、本稿で報告する「トップサイエンス」の今ひとつの方向性を以下に述べる。それは、同一天体を複数回訪れる「再訪」的探査が大きな意義を持つと言うことである。どの天体についても探査機が一度目に訪れれば、そこでは幾つもの新発見がある。けれども当然ながら、こうした新発見からは新たな謎と疑問が幾つも発生する。そのような謎と疑問を解決し、当該天体に関する更に深い理解に至るには、同一天体への複数回の探査実行が必要となる。この理由のために大型惑星や月といった大きな天体への探査は何度も繰り返して行われるのが通例である。だがこれまで、小天体への探査は各天体につき一度ずつしか実行されていない。これは主に小天体への探査が新発見をもたらす事を極めて重視しているからと思われる。だが、単なる発見段階から更に深い理解段階へ進むという道筋は探査対象が大型の天体であろうと小天体であろうと変わるものではない。すなわち、新発見された物事の科学的な価値が普遍性を持つのであれば、同一天体を再訪することには大きな意義があるはずである。また、過去に一度訪れている天体であれば二度目以降の探査では事前情報が豊富に手に入っているはずだから、サンプルリターンなどは遙かに実行し易くなるであろう。そうした意味で本パネルでは同一小天体への再探査の意義を重視し、それを提唱する探査計画が提案されれば是非とも実現を推奨したい。一例として過日のはやぶさ計画の対象であった小惑星 (25143) Itokawa への再探査が提案されているので、ここで取り上げる。宇宙衝突実験とは、地上での室内衝突実験で得られた科学的知見を拡張し、衝突破壊現象とクレーター形成のスケーリング則、サイズと非均質性、レゴリス集積への重力効果などについて一層深い知見を得ることを目的とする。これらはいずれも地上での室内実験ではその知見獲得に制約のあるものを宇宙空間で実現し、その制約を破ろうとするものである。宇宙空間に存在する天然の天体で衝突実験を行おうとすれば、探査機による情報が過去の探査により既に持たられされており、私達がその「地図」を手に入れている Itokawa が宇宙衝突実験場として適切である。Itokawa を宇宙衝突実験場として活用することで、微小なラブル・パイル天体を徹底的に深く理解する大きな助けになるはずである。このことは微惑星の物理モデルを従来以上に具体化し（表層と内部構造、宇宙風化、微小重力下でのダイナミクス、等）、なおかつ Itokawa のような小天体の衝突母天体の衝突進化過程を解明する上で本質的に重要な情報を持たらすと考えられる（母天体の熱史と衝突史、地球型惑星への集積過程の応用、等）。ただし、Itokawa が宇宙衝突実験の『最適』プラットフォームであるかどうかはもう少し定量的に検討する必要があるかもしれない。

改めてまとめると、本稿では小天体パネルが報告するトップサイエンスの方向性として以下の二つを述べた。

1. 太陽系起源に近づくためのより始原的・より未分化な天体への段階的な探査
  2. 発見段階から理解段階へ進むための同一小天体の再探査とそのための最適天体の検討
- 上記の 1. については、代表的なものとして特異小惑星 (3200) Phaethon への探査（サンプルリターンまたは片道のランデブーもしくはフライバイ）が提案されているので、その重要性について述べた。上記の 2. については、はやぶさ計画の対象であった (25143) Itokawa を再探査することによる宇宙衝突実験の実現可能性についての提案が行われているので、その意義について述べた。