

特集 「さあ、小惑星に行こう!—小惑星サンプルリターン計画」

## MUSES-C計画の科学目標

藤原 顯<sup>1</sup>

### 1. はじめに

MUSES-Cは工学試験探査機ではあるが、地球以外の天体からのサンプルリターンを行うということで、アポロ計画以来の画期的なミッションであり、その科学的意義はきわめて大きく、内外から大きな関心が寄せられている。無事にサンプルが持ち還られれば日本の惑星科学研究者のみならず、世界中の研究者にとって大きなインパクトをあたえることは間違いない。

しかし、わが国の研究者にとっては、そもそも惑星探査の経験がほとんどない状況からいきなりこのような大ミッションを行うわけで、それだけにきわめて大きな飛躍が要求され、工学については川口氏によって述べられたが、理学についても数々の困難な技術的課題を解決しなければならない。また従来のわが国のミッションとは違ってこの計画ではサンプルの分析が十分に行われて科学的に完結する。したがってわが国におけるサンプルの分析体制を最高レベルのものへとレベルアップしていく必要がある。いわばこのミッションは日本の惑星科学の実験的研究のレベルを一気に世界のトップレベルに引き上げることを要求されている計画であるといえる。それだけに多くの研究者の総力を結集して取り組まなければ成功は難しい。

以下ではわれわれ惑星科学研究者がこの計画にどのように取組みつつあるかを中心に述べて、今

後多くの研究者が積極的にこの計画に参加していくための一助となることを期待している。内容の詳細までここで触れられないが、それらに関してはすでに出されている「MUSES-C計画概要」[1]を参照していただきたい。また多くの部分をこの冊子によっていることを付け加えておく。

### 2. このミッションのめざすもの

小惑星の探査の目的はなんといっても大きな惑星の探査では得られない始原的物質の研究である。これまでに太陽系の初期の進化、とくに物質的進化を探るために隕石がもっぱら使われてきた。隕石のデータは太陽系進化についての描像を作り上げるのに基本的に重要な境界条件を提供してきた。ところが隕石は、実は多くのものが小惑星から供給されていることがわかっているため、始原的物質の研究に小惑星の研究が彗星の研究とともに欠かせないものとなっている。

小惑星の研究の中で、今日もっとも重要な観測分野の一つは表面反射スペクトル観測である。分光学的観測は1980年代より盛んになり、今では1000を超す小惑星のスペクトルが調べられ、それらのスペクトルの分類が進んでいる。そしてスペクトルで表現される小惑星の表面物質が何か、またそれらがどのようなタイプの隕石に対応するものかといった議論がさかんになされている。しかし、隕石から得られる小惑星の知識と望遠鏡によ

<sup>1</sup>宇宙科学研究所惑星研究系

る地上観測から得られる小惑星の知識の間には依然として大きなギャップがある。探査機による小惑星探査、とくにサンプルリターンによって小惑星物質を隕石と同様な手法で分析することによって得られるデータは、過去に蓄積されている隕石の大量のデータと比較、検討することができる。一方でサンプルのデータや小惑星の表面状態のデータは従来からの天文的手法による地上観測データと比較することができる。すなわち隕石の知識と天文的知識の間に大きなリンクができることになる。小惑星サンプルリターンの科学的意義はまさにこの点にある。今回探査する天体はたった一つであってもスペクトル型と物質知識の間につながりができることは大きな進歩であり、単に小惑星というものを理解するために重要なベースとなるだけでなく、従来の隕石の研究に頼った太陽系の進化のシナリオをあらためて見直す契機となるであろう。

もちろん1つの小惑星を探査するだけで十分とはいえない。今後各スペクトルタイプの中から代表的な小惑星を選んで探査やサンプルリターンが今後進められることが望ましい。代表的なスペクトルの種類はそんなに多くはない。この探査が今回限りの単発的な研究として終わるのではなく、今後も長期的な展望をもって小天体の探査による研究を推進していくことが必要である。今回の探査はそのシリーズの第一歩として位置付けるべきであろう。

### 3. 小惑星ネレウス

今回探査する小惑星は残念ながら科学的な観点から選択されたものではなく、宇宙研のM-V型ロケットで工学的にアクセスしやすいもの、かつサンプルリターンが可能なものという観点から選ばれたものである。しかしながらこれまでNASA が探

査した小惑星とはスペクトルタイプも異なり、そのサンプルが地球に持ち還られるということを考えれば、十分に探査の価値がある天体である。

さて探査対象となっているネレウス(4660 Nereus)は近地球型小惑星の一つで、1982年にHelinによって発見され、1990年に軌道が確定した。軌道長半径1.4895032AU、離心率0.3603283、軌道傾斜角 $1.42520^\circ$ 、公転周期1.82年である。近日点は0.953AUと地球軌道のすぐ内側にあり、遠日点は2.026AUと火星軌道より外にある(本号川口氏の稿の図参照)。

軌道以外のデータは乏しく、ハワイ大学のTholenによって観測された6色のスペクトルデータが発表されているのみである。図1に示すように全体に平坦なスペクトルを持ち、いわゆるスペクトルタイプの分類ではE, M, P, Cタイプの可能性がある。今のところアルベドがわからないこと、短波長でのスペクトル形状が不明瞭であること、近赤外領域のスペクトルデータがないことなどのため、これらのうちのどのスペクトルタイプであるかの決め手を欠いている。大きさは、スペクトルがこれらの内のどのタイプであるかによるが、約1km前後であろう。自転周期、自転軸の方向もわかっていない。

興味あることとしてネレウスの軌道に近い軌道をもつ流星がいくつか発見されたとの報告がある。

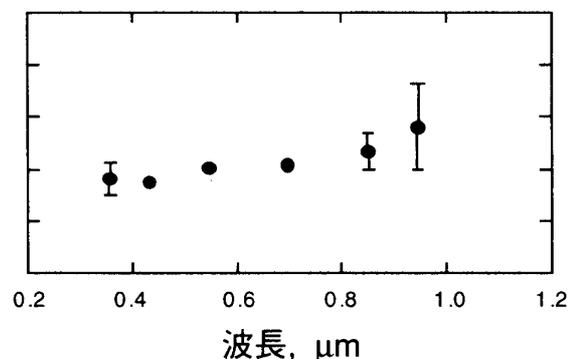


図1. 波長 0.57  $\mu\text{m}$  で規格化された Nereus のスペクトル。縦軸の目盛は 0.2 等級間隔 ([2]を改変)。

一般には流星を伴っているものは、かつて彗星であったものが不活発になってしまったと考えられがちであるが、小惑星であっても表面に隕石などが衝突して出た破片を伴っているものもある。このため、流星があるからといって一概には彗星起源とはいえない。ただ上に述べたスペクトルタイプも含めて考えれば、かつて彗星であった可能性も残されている。

#### 4. 搭載科学機器

今回の探査ではサンプルリターンという言葉で代表されるように小惑星からサンプルを採取し、小惑星の物質に関する情報を得ることを中心的テーマとする。またサンプルから得られるであろう物質データをより深く理解するために必要となる小惑星の物理的情報をできるだけ多く得ることが試みられる。サンプル採取は小惑星上の異なる三点で行われる。探査機に搭載されるサンプラー(試料採取装置)以外の科学機器はサンプリング場所の選定、サンプリング場所の記載、および三箇所からのサンプリングでは得られない広い地域にわたる物質情報の取得に役立てられる。このような科学的な基本路線とさまざまな現実的制約にしたがって搭載機器が選定された。

搭載される科学用機器として最初から予定されていたものはサンプラー、カメラ、およびライダーである。このうちカメラとライダーはもともと探査機がネレウスへ向けて航行、接近するために必要な工学機器であるが、科学の目的のためにも重要な機器であり、カメラには科学目的のために多色フィルターを付けて用いられる。カメラによって表面の地形情報、小惑星の形状、自転、衛星の有無、などに関する情報が得られる。ライダーでは表面の高度や表面状態に関する情報を得るほか、ネレウスへの降下、またはネレウスからの上

昇時に重力計測をするのに用いられる。これによって小惑星の質量が、また形状データと併せて小惑星の密度が得られる。

カメラ、ライダー以外の科学観測用機器として当初多くの提案がなされたが、結局、上に述べた観点から近赤外線分光器、蛍光X線検出器が選択された。前者は波長域約1~2 $\mu\text{m}$ で分光し、可視で得られるスペクトルとともに鉱物組成の推定に利用される。後者はCCD検出器を用いて表面からの蛍光X線を0.7-10keV域で測定し、Mg, Al, Si他の主要元素の分布を調べる。これらの観測機器からのデータは総合してサンプリング地点決定のための材料となる。各機器の重量はサンプラー5kg、それ以外はカメラの本体以外のサイエンス目的のためのフィルターと、ライダーのサイエンス利用オプション部分、赤外分光器、蛍光X線スペクトロメーターを合わせて約6kgである。

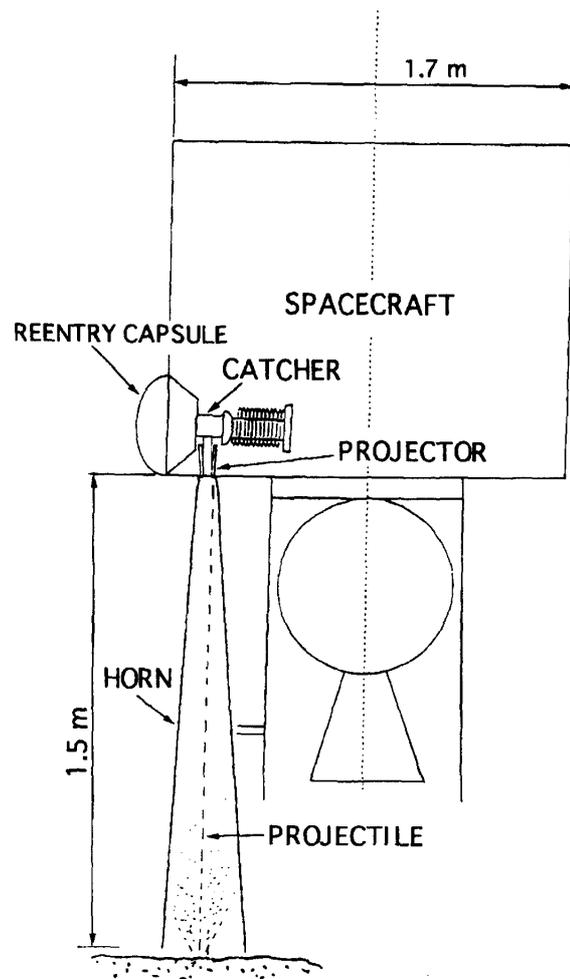
これらの探査機からの観測機器に加えて、JPLが担当するSSV (Small Science Vehicle) に可視、近赤外カメラを搭載したものを小惑星表面に投下することが予定されている。これは、もともと探査機がネレウス表面に接近するのに、人工的な目標物体をネレウス表面に投下することが予定されていたが、この中に、カメラ(可視、近赤外波長域)を搭載したマイクロローバーを搭載しようとするものである。小惑星に到達後、ローバーは表面上を移動して表面のマイクロスケールでの観察を行う。マイクロローバーはサンプル採取のためにあけられた穴の中に入り込んでフレッシュな(スペースウエザリングされていない)面の観察を行うことも検討されている。機器は全体で1kgという超軽量なものが予定されている。探査機本体に積まれた機器による小惑星の広領域にわたる可視、近赤域でのスペクトル観測や地形観測や元素組成データ、実際に地球に持って還られるサンプルから得られるデータ、そしてSSVから得られるマイクロスケール

での表面物質の観測データ、重力計測による密度のデータ、さらには地球からの望遠鏡による表面スペクトル観測データを相互に比較、検討することによって表面物質の空間的に異なったスケールでの物質同定と物質分布が得られ、このような分布を生むに至った小惑星の物質的進化のシナリオが現実味をもって考えられるようになるだろう。サンプラーを除くこれらの各機器については本号でそれぞれ詳しく述べられているのでそちらにゆずり、次節ではサンプラーについてやや詳しく紹介しておこう。

## 5. サンプラー(試料採取装置)

サンプラーはこのミッションにおいて中心的な科学機器である。まず小惑星表面からの試料採取方法を考えるにあたって重要なことは、小惑星表面の物質や存在状態としてどのようなものが期待されるかである。しかし、現在の段階では物質種、レゴリスの有無、物質強度などに関して不明の部分が多い。前述のようにネレウスの表面スペクトルの観測からは物質種が特定できるほどに至っていない。またこの天体表面からの脱出速度は約60 cm/s程度であり、このような低脱出速度のもとでレゴリスが十分な厚さで存在できるとは考えにくい。また部分的には表面に岩盤が露出している可能性もある。しかし、岩盤も度重なる外部からの衝撃によって、内部に多くのクラックを持ったものである可能性もある。このようなことを考えると現在ではいろいろな可能性を考えて対応せざるをえない。一方では探査機の重量などの制約からきわめて軽量かつ単純なものにする必要がある。このような状況の中で、各大学の理学系、工学系の研究者が一緒になってサンプラーの開発を進めている。

採取は、小惑星表面に接地の瞬間に小弾丸を発射し、小惑星表面から跳ね上がる破片を捕集するという方式で行われる(図2)。射出装置(プロジェクター)は5gの物体を約300m/sで打ち出す能力を持つもので、全長10 cm以下、重量100g程度の小型、軽量のものが開発されている。破片の捕集の方法はいろいろな方式が考えられたが結局、破片の上から筒状のもの(ホーン)で覆い捕獲する。筒の広い方の開口部を小惑星表面に向け、この口から入った破片はホーンの内部を上昇し、ホーンの細い方の口へと向かう。この口の先には小さなサンプルキャッチャーがありサンプルはこの中に入る。サンプルキャッチャーはリエントリーカプセル内



に引き込まれ、しっかりとシールされた上収納される。地球への帰還時にはリエントリーカプセルは探査機本体から分離されて大気中に投入され地上に回収される。採取が予想される試料は1gから5g程度と考えている。ホーン式サンプラーの利点は、(1)広い開口部を小惑星表面に向けることができ、小惑星の広い範囲から出た破片を逃さずホーン内に捕捉することができる。(2)それにもかかわらず最終的には破片をホーンの細い方の開口部に導き、きわめて容積の小さいキャッチャーに収納することができる。(3)ホーンの少々の変形などはサンプリングに決定的な打撃にはならないし、ホーンが小惑星表面に(平行, 垂直)相対速度を持って接触しても、また小惑星表面の凹凸に対しても比較的簡単な方法で(例えばホーンの下部を多少フレキシブルにするなどして)適応できる形にできるなど、いわばファジイなシステムであること、である。

このアイデアを試すために、ホーンを横置きにして、広い側の開口に小惑星表面に見立てた岩石ターゲットを置き、弾丸を水平方向から打ち込んでテストを行った結果では、破片の総量の約40%以上がキャッチャー部に入ることがわかった。これは地球の1Gの重力下で行ったものであるが、ネレウスのようにほとんど無重力に近い状態(10<sup>-4</sup>Gのオーダー)ではさらに収率が増すことが期待される。ホーンは薄くて軽量でなくてはならないが、跳ね返った弾丸がホーンを突き破って探査機本体に損傷を与えないだけの強度が要求される。

さて採取する試料が汚染を受けないように細心の注意を払う必要がある。汚染を受ける機会は、打ち上げ前の地上物質の付着と混入、サンプラー構成材料からの混入、サンプリング時に発射装置からの火薬ガスの混入、小惑星近傍でのエンジンスラスタのガス、リエントリーカプセルの地球大気への突入以降に地球物質の混入、などの可能性

があり、それぞれについて検討を進めている。これに関して少し例を述べておく。

弾丸発射は火薬を用いるので火薬燃焼ガスが銃口から漏れ出て試料を汚染することがないように、工夫がなされている。すなわち、サボ(銃身の口径と同径の円柱飛しょう体)は銃口で停止し、サボに乗せてあった弾丸のみが射出される方式(サボ方式)と、サボがあらかじめ銃口に置かれてあった弾丸をはじき出し、サボ自身は銃口で停止する方式(打ち出し方式)が検討されている。いずれの場合もサボは外には出ないため、火薬ガスは銃身内に閉じ込められたままとなる。現実にはサボと銃身の内壁の間から少量のガスがリークするので、この量と元素組成がどのようなものかを調べている。

地球の大気突入以降は地球大気などによる汚染がないようにサンプルケースの厳重なシールが必要である。現在シール方法としてはバイトンO-リングによるシールが検討されている。

またリエントリーカプセルが大気に突入して以降は大気との摩擦により温度が上昇し、温度のピークは地球着陸後にあると考えられる。いまのところ最高温度はセツ氏100度くらいに抑えたいと考えている。

## 6. 地上観測計画

探査対象となってる小惑星ネレウスはこれまでに軌道データ以外の地上観測データが少なく、今後表面反射スペクトル、アルベド、自転に関するデータをとることが必要である。天体の大きさや自転に関するデータは科学の立場からだけでなく、探査機が安全に探査を遂行する上でも重要である。ネレウスの地上観測の好機は2年毎にやってくる。表1に観測好期と観測条件を示してある。これからわかるように2001年には明るさが16等程度になるが、それ以外はいずれも20等ぐらいと大変暗い。

しかし観測結果を探査機や観測機器の設計に反映できる観測チャンスとしては今年の観測が最後となる。その意味で今年の夏の観測は大変重要であり、いくつかの観測の計画が立てられている。現在、観測予定が確定しているのは、われわれ日本のグループがESOの2.2mの望遠鏡による自転周期の観測を、MITのBinzelがKeck 10m望遠鏡を使って分光観測を、またTholen, DiMartinoらがHawaii, Argentineなどの有力な望遠鏡を用いての観測を予定あるいは応募している。2001年には観測条件が良くなるが、この時点での観測の結果は機器の設計にはもはや役立たない。しかし探査機および搭載科学機器の運用にはいろいろと役立てることができるだろう。また小惑星に到着して得られるデータと比較、検討できるデータをとるという意味で科学的に重要なデータとなることはもちろんである。このときにはレーダーによる観測によって形状に関する情報も得られる可能性がある。

## 7. タイムスケジュール

計画は1996年度より正式に発足しプロトモデル

製作期間 (FM) 3年、フライトモデル製作期間 (PM) 2年よりなり、2002年1月に打ち上げられる予定となっている。1997年度はPMの2年目にあたる。プロジェクト全体の進捗状況は隔月に行われる設計会議で報告され、互いの間の情報交換がなされるが、この会議のもとに各パートのサブシステム会議があり、実質的な議論はこの場でなされる。サイエンスに関するものとしてはサイエンスサブシステム会議、サンプラーサブシステム会議が主要なものであるが、必要に応じて、リエントリーカプセル、航法、データ処理などのサブシステム会議に関与している。このうち理学研究者にとって最も重要なものはサイエンスサブシステム会議であり、各観測機器の進行状況、地上観測、サンプルの分析等に関する科学に関するすべての情報や意見の交換、意見のとりまとめをおこなっている。今後も関心ある研究者の積極的な参加が望まれている。特にミッション遂行、サンプルの帰還、サンプルの分析準備と遂行まで入れると計画はきわめて長期にわたるので、若い研究者が参加して、将来に繋げていくことが必要である。

表1. Nereus の観測好機

観測時期	条件	明るさ	地心距離 (天文単位)	日心距離 (天文単位)	視赤緯
1995初夏	衝	~20	~1	~2	-25°
1997夏	衝	~20	~1	~2	-20°
1999夏	衝	~20	~0.9	~1.3	-10°
2000春	近日点	~20	~1	~1	+20°
2001秋	衝	~16	~0.2	~1.2	+15°
2001冬	近日点	~16	~0.1	~1	+10°

## 8. おわりに – サンプル処理体制

このミッションで持って還って来られる小惑星のサンプルの処理の体制と施設の確立が、惑星科学者にとって重要な問題である。国内の分析研究者は大学や研究所などに広く分布しているが、十分に分析できる能力と設備を備えたところは、まだそれほど多くないようにみうけられる。しかし、将来有力な分析の拠点となりそうな研究室もいくつかあるのも事実である。今後十分分析ができるように技術を向上させ、人材を育成し、いろいろの分野に分散している研究者を組織し、体制を整えていく必要がある。地球に帰還したサンプルを受け入れ、保管、記載、分配、基本分析を行ういわゆる一次処理施設と、それに必要な技術の開発と人材の確保は是非とも必要なものであり、今後緊急に取り組まなければならない重要な課題である。これらについてはこれまで数回、分析研究者を含む有志で勉強会をもったが、さらに本格的にサンプル分析研究者自らが中心となって青写真を作っていかなければならないだろう。

サンプル処理、分析に関しては、このミッションだけではなく、月や火星からのサンプルの話も出つつあり、今後のいろいろな惑星探査において重要なものとなってくるのは間違いない。広い分野の研究者が参加して、長期的な見通しの中で日本の宇宙サンプル分析体制をどうするかを真剣に議論していく時期にきている。とくに、人材育成はもっとも重要であると考えられるが、一朝一夕でできるものではない。このことを考えると、緊急にその可能な諸環境を整えていかなければならない。現在、惑星科学会で「宇宙惑星物質分析センター」の構想が練られているが、さらに一層議論を深めぜひとも実現したいものである。

## 参考文献

- [1] 宇宙科学研究所, 1996: 「MUSES-C 計画概要」, 464 pp.
- [2] Tholen, D. J. and Senay, M. C., 1993: Colorimetry of Asteroids Near and Far: New Results for Apollo Asteroid (4660) Nereus and the Trans-Saturnian Object 1993HA2. *Bull. Amer. Astron. Soc.* **25**, 1126