

Report

小天体探査フォーラム：市民参加型惑星探査の作り方

矢野 創¹

日本の太陽系探査における小天体の位置付け

2002年末に打ち上げ予定であるMUSES-C探査機のフライトモデルの噛み合わせ試験が、先般宇宙研にて完了した。工学試験ミッションの位置付けながら、起源が明らかな小天体から表面物質を人類史上初めて地球に持ち帰ることの科学的意義の大きさは、世界中から高く評価されている。そのMUSES-Cに続く次期小天体探査は、予算と機会の制約から約10年後になると予想されるが、どんなものが期待されるのだろうか？

昨年度に宇宙研が新しく掲げた「太陽系科学探査の中長期的目標」は、(1) 太陽系の起源・進化、(2) 惑星の多様性、(3) 生命の起源、(4) 磁気圏の統一的理解の四項目である。その内の(1)-(3)は、「始原天体(小惑星、彗星、EKBOなど)」における分化・未分化状態の理解、隕石・宇宙塵試料との相関、生命前駆物質の生成・進化を探ることと密接な関わりがある。また、宇宙研固体惑星研究系の現在の二大戦略は、(1) 月・惑星の内部構造探査と、(2) 原始太陽系の化石としての始原天体探査である。従ってMUSES-C以降も小天体探査を継続・発展させていくことは、国内の太陽系探査の科学目標と戦略の両面から期待されている。

一方欧米では過去数年間、Stardust、CONTOUR、Rosetta、Deep Impactなどの彗星探査の提案が目白押しであった。しかし近年のNEARシューメーカー探査機による近地球型小天体(NEO) Erosへの訪問と、DEEP SPACE-1探査機による電気推進実験の成功、そして何よりMUSES-Cの打ち上げが間近になるにつれ、急速に小惑星探査の機運が盛り上がってきて

いる。米国の公募型惑星探査計画Discoveryだけでも、火星衛星サンプルリターンAladdin、分化した「巨大小惑星」VestaとCeresへのランデブー計画Dawn、MUSES-Cタイプのランデブーとサンプルリターンを三個のNEOに連続して行うHeraなどの構想が検討されてきた。

さらに、小天体探査が月や火星のそれと最も異なる事情は、太陽系の創世から惑星が完成するまでの様々な出来事 -例えば、原始太陽系星雲の形成、ダストの合体成長、重力不安定による惑星の誕生、衝突による原始惑星の集積・破壊、熱的分化の開始など-の何を調べるかによって、探査対象が変わる点である。当然、現在の日本に許された10年に一度の小天体探査の打ち上げ頻度では、興味ある科学目標を一度に全て網羅することはできないし、一つの科学目標の達成に何十年も費やせない。

MEFの誕生

そこで次期小天体探査計画は、同時代の国内外の状況、宇宙工学技術の進歩の速さ、10年後でも探査以外の手法では解決できない惑星科学の根本的な命題などを見極めながら、慎重に検討する必要がある。タイムスケールとしては、MUSES-Cの試料分析が終わる2000年代後半に、間断なく小天体探査機を打ち上げるには、2001-2年度にはワーキンググループ(WG)を発足させ、2-3年間の詳細検討の後に、理学委員会の評価を受けてミッションを発足し、5年計画の探査機製作を開始することになる。

そこでまず、1999年度末に「始原天体探査ロードマッ

¹ 文部科学省宇宙科学研究所・惑星研究系

プ」[1]を策定し、それに沿って、関連研究者を宇宙研に招いてブレインストーミングを数回開いた。その際に明らかになった点は、(1)研究者毎に興味の対象が異なるために探査対象が絞り込めず、直ちにはWGが発足できないことと、(2)参加者と現在探査計画を指揮しているベテラン世代との年齢的な隔たりが大きく、経験値を上げるためには惑星科学会の枠を超えて、周辺分野の研究者の新規参入を促す必要があるということだった。さらに、昨今の打ち上げ失敗や独立行政法人化などの社会状況は、宇宙開発研究にも、納税者や教育現場への十分なアカウントビリティ(説明責任)とアウトリーチ(広報普及)を従来以上に求めるようになってきた。

インターネット上の「日本語限定」会員制Eグループ・「小天体探査フォーラム(MEF: Minor Body Exploration Forum)」のアイデアは、こうした諸問題を解決する一方策として誕生した(会員ページ, <http://www.egroups.co.jp/group/minorbody>; 一般公開ページ, <http://www.minorbody.com>)。正式発足は2000年5月25日だが、その数ヶ月前から筆者を含む若手研究者の間で議論を重ねた。特に、「惑星探査が一人の頭の中に浮かんでから宇宙に飛び出すまでの過程を、興味ある日本人全てに情報公開し、惑星探査のサポーターを増やす」「さりとして科学的目標と工学的実現性は世界第一級を確保するために、議論のレベルは妥協しない」「ネット特有の匿名性によるアナーキズムを排除し、責任ある建設的発言を積み上げる」という三点を満足させるには、どんな紳士協定を結べば良いのかに心を砕いた。

その結果、「MUSES-Cに続く約10年後の日本の次期小天体探査について、全国からアイデアを募り、科学的意義や工学的な実現可能性を検討し、宇宙研が実施できる規模の有力なミッション候補を、1年間で創り出す」という、あえて目標と期間を限定したミッションステートメントを標榜し、「(A)10年後の小天体探査を全国の仲間と創り、ミッションが実現した暁には、各自の立場で積極的に計画を支援する意欲を持つ。(B)上記の目的以外のトピック、発言者個人のものに当てた通信、個人の

中傷は投稿しない。(C)登録・投稿に際しては、ハンドルネームは使わず、本名を名乗る。(D)議論の主要言語には日本語を使う。(E)ミッション案は無人探査機を前提とする。」という5つの紳士協定を設けた。そして上記の紳士協定を遵守して頂ければ、年齢、性別、職業、所属、居住国、国籍に関わらず、どなたでもメンバーとして受け入れると宣言し、関連学会を始めとする各種メイリングリスト(ML)や個人に案内を配った。単なるMLではなくEグループとした理由は、名簿管理が自動化されていて運営側に負担が少ないこと、登録や退会をメンバー自身が行えること、掲示板・メール上で議論できるだけでなく、好きなききに議論のログを見直したり、共有ファイルや専用リンクから情報をアップ・ダウンロードしながら、文書の共同作成をしたり、電子投票で意思決定に直接参加できること、などである。

最初の一年間の流れ

当初は若手の惑星研究者に加えて、工学や周辺分野からの新規参入が同数ほどあれば成功だろうと思われていた。しかし様々な雑誌、ML、ネット掲示板などを通じて、或いは口コミで存在が知られるに連れて、研究者、大学生、エンジニアだけでなく、教師、博物館学芸員、アマチュア天文家、SF作家、ジャーナリスト、はては主婦や小学生まで、実に多様な職種からの参加が得られた。創設1周年の時点での登録メンバーは160名余りで、通信数は800通を数えている。研究者メンバーの主要分野は、惑星科学、物質分析科学、観測天文学、ロボット工学、航空宇宙工学、軌道工学、衛星工学などで、従来宇宙研のミッションに参加していなかった分野、地方、年代の発掘にも成功した。彼らの何割かは次期小天体探査WGが発足した暁にはコアメンバーとして活躍することが期待できる。このことだけでも、日本の惑星探査の基盤強化に少なからず貢献できたと思う。大学教官のメンバーの中には、MEFの議論を学部の授業や院生の研究テーマに活用している方もおられる。さらに議論の過程で、黄道面

脱出ミッション計画の立案や、すばる望遠鏡を使ったCAT天体の観測プロポーザルの作成など、新たな研究協力が生まれる場としての機能も果たす様になった。その結果、国内外の学術会議でのMEF関連の発表も、年間10篇程度出された。

MEFは1年間の期間限定で、次期小天体探査計画WGの議論のたたき台になる、探査案のレポートを作成することを目標としてきた。しかし、その後も惑星探査のサポーターが集えるフォーラムとして存続して欲しいという希望が多く寄せられた。そこで惑星探査に興味のある層に向けて、会員ページで蓄積された情報や議論や独自の企画を公開する「一般公開ページ」も、2000年のクリスマスから開設した。開設後約6ヶ月で8000ヒットを超えるようになり、いくつかの本や雑誌にも紹介された。果ては、会員ページでの小惑星Erosの地形に関する実際の議論が、メンバーの作家によってSF小説にまで登場した[2]。

このように、当初の予想を大きく超えたMEFの急成

長ぶりから筆者は、いかに多くの方が、日本語で語られる惑星探査の情報を、あるいは自ら宇宙を探検する面白さを共有したか、改めて気づかされた。そこで、現在大詰めを迎えているレポート製作が完了する2年目以降も、引き続き継続・発展していくことにした。

ポストMUSES-C探査案の検討

次に、実際の探査案がどのように作られていったか、簡単にご紹介しよう。MEFでは当初、各メンバーの興味ある天体とそこで何をどこまで測りたいのかを挙げてもらい、それぞれについて科学的意義や工学的可能性を議論した。それらがある程度収斂した昨夏にはフォーマットを決めて、簡単な探査機や軌道計画を含めた探査案にまとめてもらったところ、7つの提案が出された(表1)。それらは結果として始原天体ロードマップに沿ったものだった。その後、欧米で発表され

MEF提案 (探査天体例)	主な探査目的	海外の競合探査案	評価A	評価B	評価C
ファミリーミッション(コロニス族小惑星[イダ,パイコンール,ミモーサ,モルトナ])	メインベルト小惑星族マルチフライバイ&サンプルリターン。母天体である原始惑星の衝突履歴・内部構造の解明・小惑星起源微粒子の組成計測。	None	1	1	2
スペクトル既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン(ネレウス, オルフエウス, 1982XBなど)	二つ以上の異なるスペクトル型の近地球型小惑星へのランデブー&サンプルリターン。MUSES-C, HERA等と協力して小惑星博物学の決着を目指す。	Hera (NASA-D)	2	1	3
CAT(彗星・小惑星遷移)天体ミッション(ウィルソン・ハリントン彗星)	CAT天体へのランデブー&着陸探査。彗星から小惑星への変遷過程の解明。	DS-1 (JPL/NASA) CNSR (JPL/NASA) Stardust (NASA-D) CONTOUR (NASA-D) Deep Impact (NASA-D) Rosetta (ESA)	3	5	1
フォボス・ダイモス着陸探査ミッション(フォボス&ダイモス)	火星衛星の内部構造探査。巨大クレータを持つ小天体内の空隙の起源解明。	Phobos 1 & 2 (Russia) Deep Interior (NASA-D)	3	4	3
ベスタランデブー(ベスタ)	V型小惑星ランデブー。巨大クレータを通じた、分化天体の「内部構造」観察。HED隕石の起源解明。	Dawn (NASA-D) New World Explorer (NASA-D) MASTER (ESA)	5	3	6
近地球型小惑星マルチフライバイ&火星衛星サンプルリターン(NEO[TBD]&フォボス)	複数機の編隊飛行による小惑星のフライバイ全球撮像。火星衛星表面サンプルリターン。	Aladdin (NASA-D) Phobos SR (CNES)	6	7	5
Mタイプ小惑星ミッション(1986DA)	M型小惑星ランデブー&着陸。隕鉄の起源解明。分化天体の中心核探査。	None	7	6	6

表1:MEFで提案されたポストMUSES-C小天体探査7案 評価順位:A=専門家委託,B=提案者相互(自己抜き),C=MEFメンバー投票。NASA-D=米ディスカバリーミッション提案。

た各種の小天体探査案もほぼ全てMEF7案をなぞっており、本フォーラムでの議論の確かさを改めて裏付けた。

その後各案について、理学系(探査手法、搭載機器など)と工学系(軌道計画、輸送系、衛星設計、通信系、熱設計)などを具体的に検討し、10月に各最終案を、(1)MEFメンバーによる投票、(2)提案者同士の相互評価(自己採点は除外)、そして(3)宇宙研ミッションに実際関わっているベテランの教授クラスの専門家4名への独自評価の依頼、という計3種類の評価を行った。(1)では、「科学的に最も重要な提案はどれか?」「技術的に最も実現性の高い提案はどれか?」「科学、技術の両分野で独創性が高い、もしくは現状の日本の独創性を継承・発展可能な提案はどれか?」の三つの設問を、ネット上の投票機能を使ってたずねた。(2)(3)は共に、システム工学的なトレードオフを、6カテゴリー(「ミッション目的・目標の明確さ」、「研究手法の妥当性」、「科学的的重要性」、「技術的実現性」、「ミッションプランの明確さ」、「独創性」)、48細目の評価事項に分けた評価表を配布して実施した。その結果は、11月に各案のポスター発表と共に、招待講演として2000年度日本惑星科学会秋季講演会で発表された[3]。

上記の3種類の評価方法は独立して行われたにも関わらず、大筋で同じトレンドを示し、7つの案が上位(ファミリー、スペクトル既知NEO)、中位(フォボス、CAT、ベスタ)、下位((NEO+火星衛星)、M型)の3グループに分かれた。上位2ミッションに共通しているのは、「小惑星への複数訪問」と「サンプルリターン物質分析」であった。「サンプルリターン」は、その場計測に比べて重たい物質分析装置を多数搭載しなくてよいので、宇宙研のような小型探査機には有利である。一方、運用期間は片道探査に比べると長くなり、トータルリスクも高くなる。しかし、探査機設計時代の分析技術に制限されず、試料回収時の最先端の分析施設を利用でき、また試料を保管・管理することで、将来にわたって研究対象と機会を確保できるという利点は、そうしたリスクを補って余りある。搭載機器の開発に参加しなくて

も、サンプルさえ入手できれば、誰でも独自データを産出できるため、幅広い研究者の協力が期待できるのも利点である。MUSES-Cで創設するキュレーション施設や、養成する分析科学者のテクニックが継続して生かせることも価値が高い。

そこで上位2案を軸に、他案と共通する科学目的をできるだけ統合したものが、次項で述べるミッション案である。これらの検討結果を、2001年1月の第一回宇宙科学シンポジウムにて、惑星科学以外の理工学の専門家諸氏に報告した。なお、その他の案も、近い将来に実現させる価値のあるミッションばかりである。仮に日本で機会がなくても、海外ミッションで実現する可能性は十分にある[4]。これからの日本の惑星科学者は、それらへの参加・統合も積極的に模索すべきだろう。なおポストMUSES-Cのカテゴリーには入らないが、2010年以降の課題としてMEFで議論された探査案には、「黄道面脱出」と「EKBOダスト採集・EKBO&ケンタウルス天体フライバイまたはランデブー」も含まれていた。特に前者は、その後MEFから独立して、積極的に検討が進められている[5]。

統合ミッション2案

上記のような検討から、21世紀初頭の日本の小天体探査における最重要科学目標は、以下の二つに集約された。

- (1)小惑星博物学の早期決着(地上分光観測と隕石・宇宙塵データベースの統計的相関の橋渡し)。
 - (2)分化・未分化小惑星の表面・内部構造探査(母天体の衝突履歴・熱的進化の履歴解明に向けて)。
- (1)では、MUSES-Cで培った技術を最大限利用しながら、短期間のサンプルリターンで、複数の小惑星訪問を実現できる軌道計画や国際協力が重要になる。
- (2)では、母天体の内部構造を理解するため、同一族中でも特にスペクトル型や大きさ、自転周期、自転軸、軌道要素などが異なる複数小惑星からのサンプルリターンや、Vestaの巨大クレータを踏破して露岩に分

化した地層を採すローバ、あるいは現天体の内部構造を調べるための弾性波、レーダーサウンダなどの小惑星への応用など、比較的新しい技術が求められる。

MEFレポートでは、(1)には「スペクトル既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン(できればM型とCAT天体候補含む)+着陸機(又はローバ)+Heraミッションとの国際連携」を、(2)には「複数スペクトル型小惑星族マルチフライバイ&サンプルリターン+編隊飛行技術」をレファレンスミッション案として取り上げた。なお、スペクトル既知NEOサンプルリターンの候補天体については、厳密にはMUSES-C同様のタッチ&ゴー型インパクト式サンプルリターンの条件を満たす必要があるが、今回の検討では主に小惑星の持つ科学的価値と軌道条件から求めた。それぞれの詳細は参考文献[6][7][8]と、近く発行されるMEFレポートに譲る(ホームページで公開予定)。

「ファミリー」ミッション

似た軌道要素を持つ小惑星帯天体の一群「族(ファミリー)」は、原始惑星が衝突破壊してできたと考える説が有力である。そこで本案では、同一のファミリー内の異なるサイズ、軌道要素、分光特性を持つ複数の天体を訪問することで、(1)母天体の熱的分化を探る内部構造の直接探査、(2)惑星系の進化過程に普遍的現象である衝突破壊・再凝集の履歴と、その物理・化学的素過程の解明、(3)「小惑星の地上観測」と「隕石・宇宙塵試料の物質分析」の橋渡しを目的とする。

第一次案では、100 kg以上の科学機器を搭載した探査機は、2010年頃に打ち上げられ、3-6年間にKoronis族のS型小惑星3-4個(過去に探査機が訪問した唯一の族小惑星Ida-Dactyl系を含む)、あるいは3年間でNysa-Polana族の異なるスペクトル型の小惑星2個へ接近し、撮像、分光、重力測定などを行う。その後フライバイ中に、各天体表面へ自律航行機能を持つ「弾丸」用子機を親機と編隊飛行させて、撮像観測しながら衝突させる。それにより、地下数mの深さか

ら放出する試料を非破壊捕集物質で採集し、MUSES-C同様のカプセルで地球に回収する(図1, 2)。

Koronis族は3大ファミリーの一つであり、軌道の観点から最も行きやすいファミリーである。軌道要素と対応した分光特性の違いによって、S型からより細分化されている。さらに軌道上に独自のダストバンドも観測されており、宇宙塵研究の観点からも興味深い。一方のNysa-Polana族は、同一族にありながらE, M, S, F型と多様なスペクトル型を持つ。S型とC/F型、二つの原始惑星が比較的最近に衝突破壊した現場ではないかと言われている。

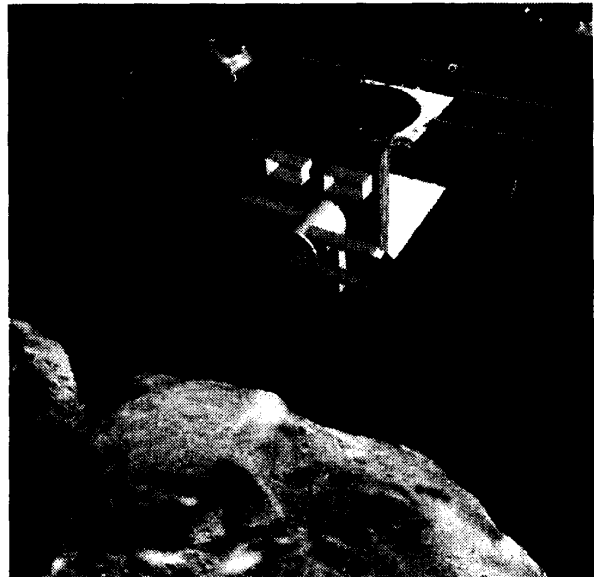


図1:ファミリーミッション概念図

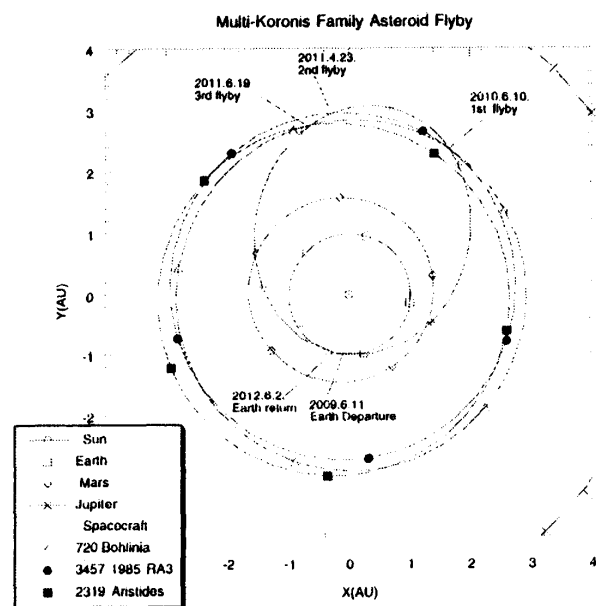


図2:3年3個のKoronis族フライバイ・サンプルリターン軌道の一例

スペクトル既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン

太陽系に広く分布する小惑星は、地上分光観測から、1ダース程の主要スペクトル型に分けられ、各存在頻度は太陽からの距離によって異なる。小惑星帯の一番内側にはS型やE型、その外側にはM型、次にC型、さらに外側にはP,D型がそれぞれ多い割合で分布している。ここから、小惑星帯内では原始太陽系の形成後も、日心距離方向には構成物質が均質に混ぜられなかったと予想される。現在何らかのスペクトル型が判明している小惑星は、軌道が確定しているものの約1割に当たる1200個程度であり、その絶対数はS型とC型が多く、M型がそれらに続く。

一方、地球上で発見される隕石や宇宙塵の多くは、小惑星帯および地球の軌道と交差するNEOの双方からもたらされると予想される。両者とも、1万を越す豊富な岩石学や鉱物学的なデータベースから、様々な種別に分類されている。なおNEOの力学的寿命は、100万～1000万年程度であり、それを補うために現在も小惑星帯から供給され続けていると考えられる。またその中には、短周期彗星核が枯渇した、彗星・小惑星遷移天体(CAT天体)も含まれているだろう。

そこで、2000年代後半あるいは2010年初頭に、1～2機の探査機を、複数個のスペクトル型既知NEOにランデブーさせ[9]、軌道上グローバルマッピング、および着陸機または微小重力ローバによる表層・内部構造のその場計測をした後、表面物質を地球に持ち帰る(図3, 4)。探査対象は、MUSES-CやHeraミッション[10]などと調整して、それぞれ異なるスペクトル型を選び、全体として多種のスペクトル型小惑星のサンプルリターンを短期間で可能にする。またMUSES-Cで開発した技術の継承、発展による開発期間の短縮、低価格化も目指す。

本案最大の課題は、地球帰還までに長いケースで14年もかかる点である。そこで今後、スペクトル型未知のNEOについても独自の地上物理観測を推進して探

査候補天体を増やし、より短い運用期間のミッション案と探査機重量マージンを確保することが重要である。

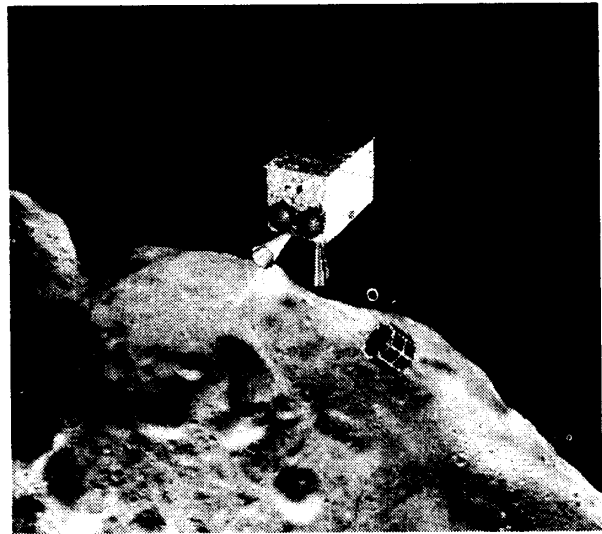


図3：スペクトル既知NEOミッション概念図

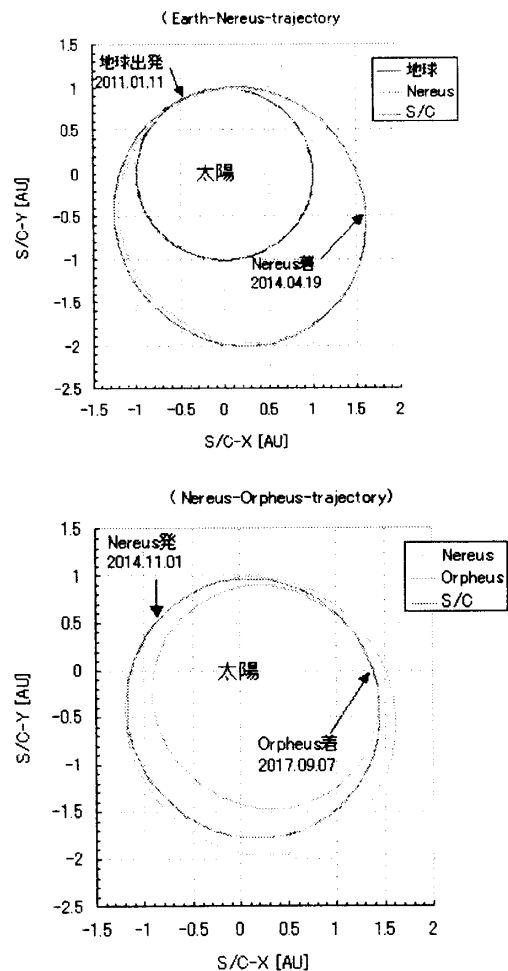


図4：地球—ネレウス—オルフェウス—地球のランデブーサンプルリターン軌道の一例

アウトリーチ・教育/広報活動

前述のように、研究者以外のMEFメンバーの職種は、実に多岐にわたっている。今回のポストMUSES-C案の検討への参加を通じて、彼らは将来「惑星探査のサポーター」として、次期小天体探査計画をそれぞれの立場で支援することが期待されている。また、次世代の惑星探査者の裾野を増やすためには、ミッションの科学目標や工学的可能性をシビアに検討することの重要性に劣らず、優れたアウトリーチ活動を実施して教育現場や一般社会における惑星探査のプレゼンスを上げていくことの大切さをMEFは教えてくれた。

従来の宇宙研では、個々のミッションが独立したアウトリーチ活動をできるような計画立案・予算申請を行ってこなかった。しかし所全体の窓口としての対外協力室だけでなく、ミッションの現場に携わる者が生の声で、その研究の意義や自らの熱意を積極的に発信することが大切である。例えばNASAのDiscoveryミッションでは、担当科学者やエンジニアへのインタビューを通じて、惑星探査の意義や楽しさを分かりやすく紹介している。そもそもNASAのディスカバリー計画では、ミッション提案の段階でアウトリーチ活動案も評価項目に入っており、全予算の約2%をその活動に計上しないと選抜されない。その手法もミッション毎に趣向を凝らしている。NEARミッションでは、クルージングフェーズにはその日の探査機の位置を、ランデブー後は探査機画像を、毎日ホームページ上にアップデートしていたし、Stardust探査機に至っては、打ち上げだけでなく、射場でのフライトモデルの組み立て作業まで、ウェブキャストで24時間放映されていた。勿論、NASAはこうしたアウトリーチ活動を単に社会還元としてのみ行っているのではなく、議会や納税者に惑星探査の意義を認識してもらい、最終的には自らの研究機会や予算を増大させるための、確固とした戦術として実施している。長引く不況下の中で、研究環境が徐々に独立行政法人化していく日本の宇宙活動にとっても、そうした視点は早晚他人事ではなくなるだろう。

MEF公開ページのコンテンツも、そうした次世代の発掘・育成のための情報公開に力を入れている。例えば、2001年2月に開催されたEros地形画像のネット討論会や、惑星研究者の日常をつづった「MEF日記」、最近では日本全国の惑星科学や惑星探査工学に関わっている研究室にアンケートを依頼して作成した「惑星科学・惑星探査が学べる大学・大学院案内」などの企画が好評である。「大学院案内」は天文学や宇宙工学の分野では数年前から確立しており、優秀な学生を惹きつける強力なツールとして機能している。

ただし、こうしたアウトリーチ活動のために／現場の研究者やエンジニアが本来業務に傾けるべき時間が大きく奪われては、本末転倒である。そこで期限付きでも良いので、情報科学や宇宙教育の専門家を、ミッション毎にアウトリーチ担当として雇い入れることが理想であろう。それが予算や組織上無理な場合は、MEFのような「勝手連」的サポーターを宇宙機関の外で大きく育てて、彼らに納税者や教育現場とミッションを橋渡ししてもらうのも一策である。来年打ち上げのMUSES-Cでできることはもはや限られているが、10年後のポストMUSES-Cでは、計画立案の段階からアウトリーチ活動にリソースを配分し、多くの市民に「自分達の探査機」と思ってもらえるようになれば、素晴らしい。

創設2年目以降の現在も、MEF会員ページは引き続き新会員登録を受けつけている。MEFレポートの完成後も、新しい惑星探査案のプール、そしてそれらをボトムアップで創り上げるインキュベータとして機能していく予定である。ここから第2、第3のMEFミッション、あるいは小天体以外の天体に関する同様なフォーラムが誕生し、次々に宇宙へ飛び立つ日が遠からず来ることを期待したい。

謝辞

本稿をまとめるに当たっては、多くのMEFメンバー諸氏から貴重なコメント、アドバイスを頂きました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 秋山演亮他, 2000: 小惑星レゴリスの科学と探査手法, 遊・星・人, 9, No.4, 216-226.
- [2] 野尻抱介, 2001: 轍の先にあるもの, S-Fマガジン, 42, No.5, 60-81.
- [3] 矢野創, 小天体探査フォーラム, 2000: MEF: 開かれたポストMUSES-C時代の小天体探査ミッションの検討, 日本惑星科学会秋季講演会予稿集, 82.
- [4] 矢野創, 1999: 有人月着陸30年後のJSCとLPSC -太陽系探査の過去・現在・未来-, 遊・星・人, 8, No.2, 116-124.
- [5] 長谷川直, 矢野創, 秋岡真樹 (編集), 2000: 第一回黄道面脱出ミッション勉強会講演集, 文部省宇宙科学研究所・郵政省通信総合研究所.
- [6] 矢野創他, 2001: ポストMUSES-C時代の小天体探査計画の検討, 第一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, 153-160.
- [7] H. Yano, et al., 2001: A mission to a lost planetesimal: Scientific goals and engineering feasibility of multiple fly-bys and sample return mission to an asteroid family, 第22回太陽系科学シンポジウム講演集, 文部科学省宇宙科学研究所, 68-71.
- [8] 安部正真他, 2000: スペクトル既知近地球型小惑星の複数サンプルリターンミッション, 日本惑星科学会秋季講演会予稿集, 71.
- [9] 森本睦子他, 2001: スペクトル既知近地球型小天体マルチランデブー&サンプルリターンの軌道計画, 第22回太陽系科学シンポジウム講演集, 文部科学省宇宙科学研究所, 64-67.
- [10] D.W.G. Sears, et al., 2001: Near-Earth asteroid sample return missions, Abst. XXXII Lunar & Planet. Sci. Conf., on CD-ROM.