



相模原キャンパスの桜と屋外展示 (M-Vロケット実機) 撮影：大川拓也

## 宇宙科学最前線

# Delta-DOR 技術による 深宇宙軌道決定の高精度化

宇宙機応用工学研究系 助教

竹内 央

小惑星探査機「はやぶさ2」の打上げから約1ヶ月後、JAXAの臼田局とNASAの地上局（アメリカ、オーストラリア、スペイン）を使用して「はやぶさ2」の精密軌道決定キャンペーンを実施しました。計測の結果得られた位置精度は15m ( $1\sigma$ )<sup>\*1</sup>で、東京スカイツリーから富士山頂にいるダニ（体長0.14mm）をのぞき込む角度に相当する角度分解能（1.3ナノラジアン）が得られたこととなります（図1）。これは、NASAの火星探査機で実現されていた過去の記録に肩を並べる高い精度です。

本稿では、このキャンペーンで使用された、深宇宙の軌道決定精度を飛躍的に向上させる手法であるDelta-DOR技術についてご紹介します。

### 軌道決定とは

ボールを斜めに投げ上げると、放物線の軌道を描きます。手から離れる瞬間の速度と位置が正確に分かれれば、描く放物線の軌道は一意に決まり、時々刻々と変わるボールの位置と速度も正確に知ることができます。

宇宙機の場合も同様で、ある日時における宇宙機の3次元位置 ( $x, y, z$ ) と3次元速度 ( $V_x, V_y, V_z$ )、計6つの量（軌道6要素）を知ることができれば、宇宙機が描く「軌道」を「決める」ことができ、その後の日時における宇宙機の位置と速度を予測できます。これを宇宙機の「軌道決定」と呼びます。軌道決定の結果、宇宙機が予定のコースから外れていることが分かれば、エンジンの噴射によってターゲットに正しく向かうように修正できます。深宇宙探査機の従来の軌道決定手法であるレンジン

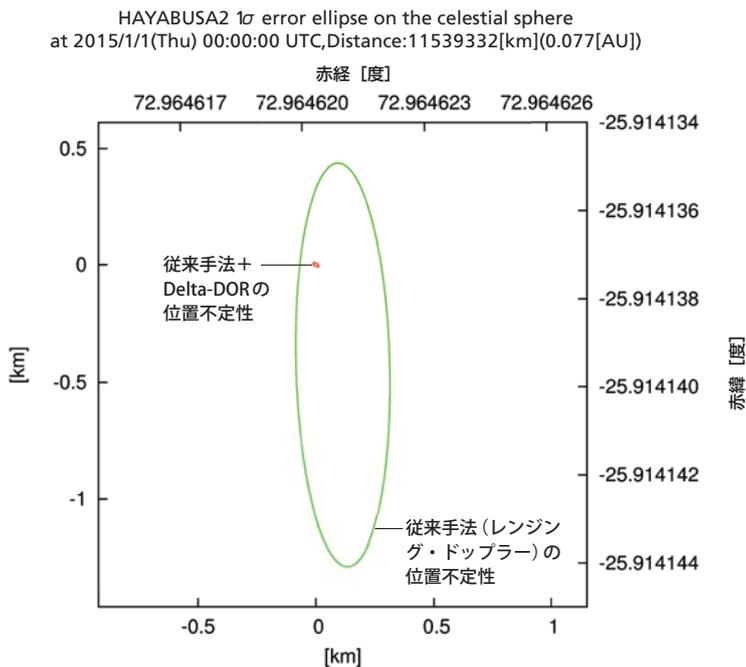
グ・ドップラー計測の原理については「今月のキーワード」で解説しているので、ご参照ください。

## Delta-DOR技術とは

ドップラー計測では数日間かけて間接的に天球面上の位置を求めるのに対し、電波干渉計の技術を用いて瞬時瞬時(10~20分ごと)に探査機の赤経・赤緯を直接計測する手法がDelta-DOR(DDOR)計測です。Delta-DOR計測では、遠く離れた地球局で電波を同時に受信し、2局の間で信号伝搬時間の差DOR(Differential One-way Range)を計測します。各地球局で受信した電波はインターネット伝送で1局に集められ、相関を取ること(相関処理)によってDORが計測されます。

DOR計測では惑星間プラズマや探査機搭載の通信機の遅延が2局の差分でキャンセルされる一方で、局ごとに独立な地上局の伝送路遅延や大気・電離層遅延、時刻バイアスなどは誤差として残るため、電波星を校正電波源として利用します。天球面上で探査機の近傍にあり位置(方向)がよく分かっている電波星と探査機を交互に観測し、電波星と探査機の遅延量(DOR)同士の差(Delta)を取ることにより、電波星を基準とする探査機の相対的な天球面上の位置(Delta-DOR観測量)が精密に計測できます(図2)。軌道6要素の残り2成分、すなわち天球面上の速度成分は、1日程度の間隔を空けて数回Delta-DOR計測を実施して赤経・赤緯の変化量を測ることにより求められます。

図1 「はやぶさ2」精密軌道決定キャンペーンの結果  
緑色の誤差楕円は従来手法の精度、赤色の誤差楕円はDelta-DORを加えたときの精度を示す。



	位置精度 (1 $\sigma$ )	速度精度 (1 $\sigma$ )
従来手法(レンジング・ドップラー)による決定精度	880[m]	2.4[mm/s]
従来手法+ Delta-DORによる決定精度	15[m]	0.076[mm/s]

## JAXAにおけるDelta-DOR技術の開発

Delta-DOR技術は、古くはNASAの宇宙探査機ボイジャーの時代から用いられていましたが、この10年ほどの間にさまざまな技術が向上し、得られる精度が急速に高まりました。

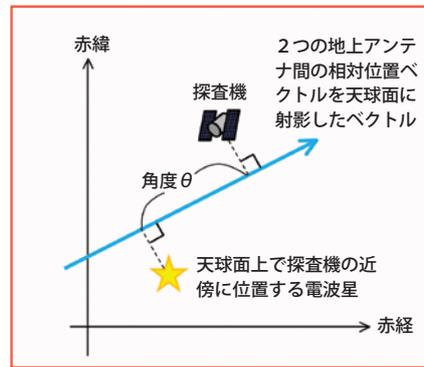
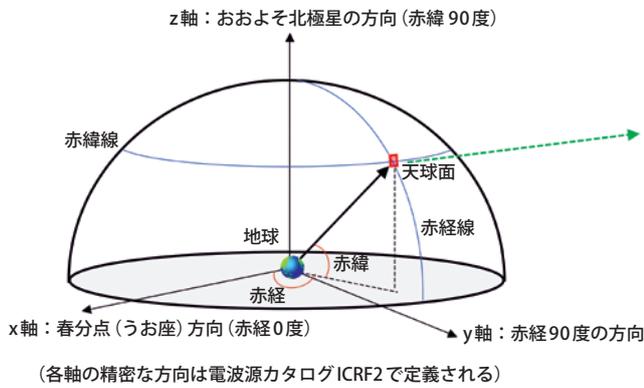
2000年代に入り、テレビ放送デジタル化に伴い、高速AD変換<sup>\*2</sup>や高速FPGA<sup>\*3</sup>技術が急速に発達し、素子を廉価に入手できるようになりました。従来、深宇宙探査用地上局の電波の信号はアナログ系で狭帯域チャンネルに切り出してから処理していましたが、筆者らは世界に先駆けて広帯域のままデジタル処理するシステムを開発しました。これにより受信信号を高い位相安定度で処理できるようになり、高精度のDelta-DORを実現できるようになりました。その後世界の各機関でも同様のシステムが開発されましたが、日本がいち早く技術革新の機を活かすことにより、NASAに数十年遅れていた分野において迅速にcatch upすることができたといえます。

2012年にはアメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT) Haystack観測所にて、世界で開発されている同様のシステムの間で性能比較を行うコンテストが実施されました。日本(JAXA/NICT [情報通信研究機構])、アメリカ(MIT)、ヨーロッパ(マックスプランク電波天文学研究所)、中国(上海天文台)の4つのシステムを会場に持ち込み性能比較を行ったところ、日本のシステムが最も高い性能を有していることが示されました。

またこの時期には、世界中にGPS観測網が整備され、地球対流圏や電離層による遅延モデルの精度が向上しました。臼田にもGPS観測点が設置されているため、観測点で得られるデータを迅速に国際的な解析ネットワークに配信し、高精度な大気遅延補正データが得られるよう体制を整えました。

Delta-DORにおいて位置の基準となる電波星自体の位置の精度も向上しています。2010年になり最新の電波源カタログICRF2が発行され、従来に比べ5~6倍の精度の座標系が定義されました。ICRF2の精度向上は、カタログで定義されている電波星との相対位置計測を行うDelta-DORにおいて直接的に精度向上の効果をもたらしました。

上述したさまざまな技術向上の恩恵を受けて、JAXAのシステムを用いて数十ピコ秒の精度のDelta-DOR観測量が得られることを、2010年の小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSの実験を通じて実証することができました(『ISAS ニュース』2016年3月号 別冊参照)。しかしこの時点では、



**図2 Delta-DOR観測量の幾何学的意味**

Delta-DOR演算により図に示した角度 $\theta$ が精密に求まる。地上局として南北の2局を使った場合は赤緯方向に感度を持ち、東西の2局を使用した場合は赤経方向に感度を持つ。

高精度の観測が得られても、軌道決定に活かすことはできませんでした。従来の深宇宙の軌道決定ソフトウェアでは1ナノ秒程度の観測モデルで十分で、Delta-DORが持つ高い精度に耐え得る精度の観測モデルが実装されていなかったためです。

そこで、JAXAの深宇宙軌道決定システムに対して、「最新の地球自転モデルの採用」「対流圏・電離層伝搬遅延モデルの高精度化」「一般相対論効果の厳密な適用」「震災後の臼田局局位置変動モデル化」などの改良を施し、システムで使用される各種モデルを最新の知見に基づく最高精度のものに更新しました。2014年までにこれらの改修を完了し、冒頭で述べたようにDelta-DORによる高精度の軌道決定を「はやぶさ2」で初めて実証することができました。

### Delta-DOR技術のさらなる高精度化

現状の技術では1ナノラジアン程度の角度分解能がDelta-DORの精度限界とされていますが、その限界を打ち破るべく、さまざまな手法を用いて誤差低減のための技術開発が進められています。

Delta-DORにおいて最も支配的な誤差原因である電波星の熱雑音は、受信信号の帯域幅を増加させることにより減少させることが原理的に可能であり、近年、受信機の広帯域化によって精度が改善してきています。電離層や太陽プラズマに起因する誤差の影響は、高周波帯において減衰するため、将来X帯からKa帯に移行すれば1/15程度に減らせることが見込まれます。Ka帯Delta-DORは過去にNASAの火星探査機MROで限定的なデモ観測が行われたのですが、「はやぶさ2」では世界で初めて本格的に運用に利用する予定です(『ISASニュース』2014年12月号参照)。

残される主要な誤差要因の一つが、受信局伝送路内の位相特性の不均一性に起因する誤差(地上局位相リップル)です。電波星からの信号は連続波スペクトラムを取るため位相誤差の影響は受信帯域内で平均化されるのに対し、探査機からの信号は複数のトーン信号で構成されるため、受信周波数の近傍の位相リップルが位相誤差として印

加されます。その結果、両者の信号形態の違いに起因して、電波星のDORと探査機DORとの間の「Delta」演算によって消すことができない系統誤差が生じてしまいます。

そこで、探査機で生成されるトーン信号の周波数を、電波星の観測時と同じ連続波帯域内でスイープさせて、電波星の観測時と探査機観測時の実効周波数帯域を一致させることにより両計測の差分時に系統誤差をキャンセルさせる、まったく新しい手法の信号発信器(チャープDORトーン生成器)を筆者が考案しました。この発信器は、宇宙研の通信系メンバー(小林・富木)の貢献により短期間で迅速に開発され、超小型深宇宙探査機PROCYONに搭載されました。本装置を用いて臼田局とNASAキャンベラ局との間で多数回の実験が行われ、地上局受信系の位相特性の不均一性に起因する系統誤差の存在が実際に確認されました。PROCYONではそのほかにも、過去最大の86MHz間隔のトーン信号ペアを利用した世界最高の時間分解能のDelta-DOR計測(これまではNASAの76MHzが最高)に成功し、また、深宇宙を航行する宇宙機としては初となるPROCYON「はやぶさ2」の同一視野Delta-DOR計測を実施するなど、Delta-DORのさらなる高精度化に向けてさまざまな先駆的な実験が行われました。これらの実験データは現在NASAと協同で解析中ですので、またの機会に詳しくご紹介したいと思います。

### おわりに

近年、深宇宙探査ミッションの高度化に伴い、年々高い軌道決定精度が要求されるようになってきています。火星着陸ミッションではピンポイント着陸精度の要求が厳しくなっており、そのほかの深宇宙ミッションでも、航行中の惑星スイングバイや、ターゲット天体の精密科学観測(軌道暦・重力場・自転計測)の観点から、高い軌道決定精度が求められています。今後さまざまな深宇宙ミッションで国際的なDelta-DOR協同計測が進められる見込みですので、JAXAも積極的に貢献していきたいと考えています。(たけうち・ひろし)

- ※1 15m (1 $\sigma$ ):  $\sigma$ は誤差楕円球長軸の標準偏差であり、位置精度が標準偏差15mでばらついていることを意味する。
- ※2 AD変換: アナログ(A)信号からデジタル(D)信号への変換
- ※3 FPGA: Field Programmable Gate Arrayの略。構成を何度でも書き換え可能な集積回路。

→5ページ  
「今月のキーワード」  
もご覧ください。

## 「あけぼの」プロジェクト終了

磁気圏観測衛星「あけぼの」は、1989年の打上げ以降26年にわたり、地球を取り巻くプラズマ環境を観測し続けた。『ISASニュース』2015年6月号で紹介したように、軌道が経年変化し、また衛星機能が劣化したことから運用の停止を決定し、2015年4月23日に停波運用を実施した。その後、12月に宇宙理学委員会による終了審査、今年2月に所内の終了審査を終え、2015年度末をもって「あけぼの」プロジェクトを終了した。終了審査に向けて資料を作成するに当たり、宇宙理学委員会審査委員会の海老沢研委員長をはじめさまざまな方に有益なご示唆を頂いたことに、深く感謝している。

終了審査の準備に並行し、26年間の運用記録の整理を進めた。「あけぼの」の運用は1週間を単位として行い、毎バスの運用手順書とは別に、週末にその週の運用で起きた問題や特記事項を「引き継ぎ書」としてまとめてきた。打上げ後間もない時期の引き継ぎ書は、「あけぼの」衛星運用の古典的バイブルである。10年ぶり20年ぶりに起きた問題の対処方法を初期の引き継ぎ書から見つけ出す、というようなこと



26年間の「あけぼの」衛星運用引き継ぎ書

もあった。しかしこの引き継ぎ書は、打上げ後10年間は手書きであったし、その後もワープロ打ちはされていても電子的には記録が残っていない場合が多かった。すべてが電子ファイルとして保存されているのは2006年以降である。

このたび運用記録の整理作業の一環として、紙の形でしか残っていない引き継ぎ書をスキャンし、さらに本文

はあらためてワープロ入力して電子化した。四半世紀以上前につくられた衛星であるから、この運用記録が今後の衛星の運用に技術的な面で直接的に役に立つとは思わない。一方で運用記録の電子化には、データ取得の背景を明確にし、研究結果に運用条件が与える影響(バイアス)を評価できるようにしておくという重要性もある。

26年もの間連続して磁気圏を観測する衛星は容易には出現せず、長期間の観測を必要とする研究は今後も「あけぼの」のデータによって進展するであろう。プロジェクトが終了しても、データや資料整理の残作業はまだしばらく続きそうである。(松岡彩子)

## 研究成果を最大化するための組織改編

宇宙研では、これまでも多くの関係者の尽力でプロジェクトを実行し、数多くの研究成果を挙げてきましたが、よりいっそうの成果を挙げるために、研究所としていくつかの取り組みを行っています。その一つである組織の見直しの状況をご紹介します。

一つ目は、他部門との連携の強化です。ISS(国際宇宙ステーション)科学組織を有人宇宙技術部門と、専門技術組織を研究開発部門と、それぞれ融合を図って組織を一体化させ、宇宙科学をJAXA全体で実行する体制としました。それにより、職員が宇宙科学にとどまらない幅広い知見を身に付けるとともに、今までより多くの職員が宇宙科学の実行に参加することになりました。その結果、プロジェクトの企画や実行をより進めやすくなりました。

もう一つは、研究所内の役割分担の明確化と宇宙科学プロジェクト企画実行体制の強化です。具体的には、研究総主幹は、研究主幹と共に研究系の学術研究の先導、人材育成などの役割を担い、また宇宙理学・工学委員会と共に新たなプロジェクト企画に携わって先導的な研究を担うことを、明確化しました。宇宙科学プログラムディレクターは、プロジェクトの準備から終了ま

で責任を負う役割とします。宇宙科学プログラム室は、プロジェクト支援業務とシステムズエンジニアリング業務を一体化して強化し、プロジェクト準備の役割も担い、宇宙科学プログラムディレクターを支えます。

さらに研究基盤・技術統括は、小型飛翔体や施設設備による実験機会の提供、衛星運用・研究データの提供を行うなど、研究基盤を充実させる活動に責任を持つことを明確化しました。また、プロジェクトチーム以外の組織を研究基盤・技術統括のもとに集約した上で、研究基盤のいっそうの充実を図るため、探査データの hoch 処理、深宇宙に係る追跡基盤技術、精密機械加工、精密測定技術などをそれぞれ行う組織を新たに設けました。

科学推進部については、研究・プロジェクトを効率的かつ柔軟に支えるために大学共同利用課を廃止し、大学と大学以外との業務縦割りを排除して、部全体で大学共同利用システムを支える体制としました。

以上のように、2016年度からは、研究所内外で宇宙科学の研究成果を挙げられる体制を敷き、国民の皆さんの期待に応えていきたいと考えています。(佐々木 宏)

## 第8回「宇宙科学奨励賞」、山口弘悦氏に授与

公益財団法人宇宙科学振興会では、毎年、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者に「宇宙科学奨励賞」を授与しています。2008年の創設から8回目となる2015年度は、NASAゴダードスペースフライトセンター研究員でメリーランド大学カレッジパーク校 助教(兼任)の山口弘悦(やまぐち・ひろや)氏に授与されました。授賞の対象となった研究業績は、『すざく』衛星を用いたIa型超新星の起源解明と、宇宙における非平衡プラズマ物理学の開拓です。表彰式は、3月10日に霞が関ビル内東海大学校友会館で、ご来賓、関係者列席のもと開催されました。

我が国5機目のX線天文衛星「すざく」は、2005年の打上げ以来、さまざまな観測成果を挙げてきました。山口氏は、「すざく」搭載のX線CCD検出器について、打上げ前の



左より、奥村直樹 JAXA 理事長、山口弘悦氏、西田篤弘 元宇宙研所長、松尾弘毅 元宇宙研所長。

検出器開発、地上較正試験、軌道上性能評価・観測運用に一貫して関わり、その性能を極限まで高める努力を続けてこられました。そして、その性能を最大限に生かしたデータ解析を行い、インパクトが大きく世界的にも注目度の高い成果を数多く挙げてこられました。山口氏の貢献は、「すざく」の国際的な評価を大いに高めたと同時に、宇宙科学だけでなく基礎

物理学全般に対して大きな進展をもたらしたといえます。

当振興会は今回受賞された山口氏に心からお祝い申し上げますとともに、X線天文学のさらなる発展の中で山口氏のいっそうのご活躍を期待しております。

なお、山口氏は表彰式において受賞記念講演を行いました。授賞の対象となった研究についてはいずれ『ISAS ニュース』で紹介いただく予定とのことです。ご期待ください。

(公益財団法人宇宙科学振興会 事務局 補佐 佐々木 進)

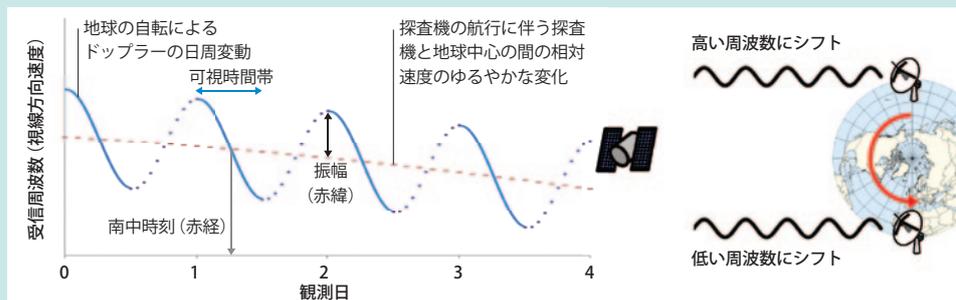
### 今月のキーワード

## レンジング・ドップラー計測 (Range And Range Rate)

宇宙機の軌道を決めるためには、ある時刻における3次元位置と3次元速度、計6つの量(軌道6要素)を知る必要があります。深宇宙探査機の場合は、地上局から探査機までの直線距離を電波の往復時間によって計測します(これをレンジングと呼ぶ)。探査機の速度は、電波の周波数がドップラー効果で変化するのを利用して計測します(これをドップラーあるいはレンジレートと呼ぶ)。遠方を飛行する深宇宙探査機の場合は、地球上のどの局から見ても探査機がほとんど同じ方向に見えるため、軌道6要素のうち地球―探査機方向(視線方向)の位置・速度の2成分のみがレンジングとドップラー計測により高精度で測定できるものの、残りの4成分(視線方向と垂直な天球面上の位置・速度)は直接的に計測するこ

とができません。これらの4成分を求める方法を図に示します。

この図は、地球の自転によるドップラー周波数の日周変動を数日間にとり連続して計測することにより天球面上の探査機位置(赤経・赤緯)が間接的に求まることを示しています。この方法は地球の自転を利用するため、地上局の位置、地球回転軸の変化、地球自転速度の揺らぎなどを正確にモデル化する必要があります。これらのモデルに強く依存した計測手法であるため、視線方向の位置は数m、速度は毎秒0.01mm程度の高い精度で計測できるのに対して、一般的な条件下における天球面上の位置の精度は1000ナノラジアン程度(1億kmの距離では100km)、速度精度は毎秒数cm程度に限られます。(竹内 央)

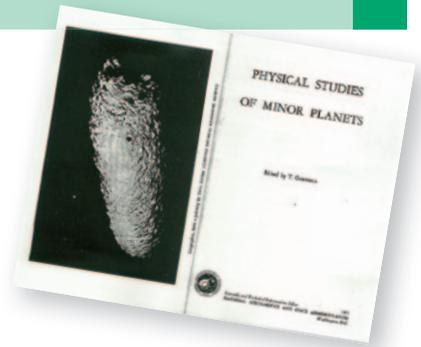


ドップラー観測による赤経・赤緯計測の概念図 (CQ出版社『RFワールド』No.20、「IKAROSを利用したVLBI実験」より抜粋)



# 京都からのたより

藤原 顕



1971年出版の小惑星の研究会報告集の見返しに掲載された当時の小惑星の想像図。これを引き継いで、『Asteroids』というレビュー単行本シリーズが発刊されるようになり、現在第4巻目を数える。この年に火星探査機「マリナー9号」が初めて丸くない天体(フォボス)の像を捉えた。

ご無沙汰しています。宇宙研を離れて10年がたちました。現役中はずっと単身赴任でしたが、2006年に辞めてからは京都市内の我が家に戻りました。しばらくは年に数回、宇宙研に出掛けていましたが、最近は何もなく、宇宙関連の情報にも疎くなり、折に触れ耳に入ってくる皆さんの活躍にひそかにエールを送っています。

退職後は、関西大学の非常勤で週2回程度、物理系の学生相手に宇宙関連の授業やセミナーなどを楽しく行っています。また、ボランティア活動として、NPO科学カフェ京都という会に引き込まれ、いつの間にか中心にお世話をしています。これは、サイエンスカフェとしては日本で最も早く始められたものだそうです。京都大学に会場を借りて市民50人前後を対象として、月に1回、土曜日の昼下がり、科学のあらゆる分野の研究者に話をしてもらいます。講演料・受講料無料で、2016年3月現在127回になりました。このごろどこでもそうですが、受講者は中高年の方が多く、活発な質問が出ます。また、年に何回か、京都府下の小学校へ出掛け、小・中学生を相手に出前授業として宇宙の話をしています。

これを通して小学生から高齢者までの方々と接しています。小学生は我勝ちに質問の手が挙がりますが、中学生になると自意識が出てくるせいか、ぐっと少なくなります。中高年齢層になると、また質問が多くなります。それぞれの年代での理解の仕方も面白いです。子どもたちは、まだ理科を理解するための理屈を学んだわけではないので、これまでの日常体験とどこかで接点を持つもの、あるいはその延長線上で捉えられることで理解したと感ずるのでしょう。高校生は将来の進路選択という

意味で重要な位置にいると思うのですが、一般に講演への参加は少ないのが少し残念です。前述サイエンスカフェの聴衆は、それぞれの道の科学のプロの方からまったく関係ない方まで広く分布しています。当然ですが、それぞれの知識や人生経験に基づき引き出しがいろいろあるという感じがします。

このような活動を通して、今まで行ってきた研究分野も一歩離れて外から見ようになりました。サイエンスカフェのこともあって、あらゆる分野の科学と接する機会が増え、私個人もまったく違った分野にも興味を持つようになりました。しかし、こういう立場に立ってみても、宇宙科学というのは一般の人たちにとっても大きな関心の対象であると思います。特に子どもたちには惑星探査の話は分かりやすく、好奇心や冒険心を引くのでしょう。小惑星探査機「はやぶさ」の帰還直後は、その話題になると目を輝かせて聴いていました。そして、「はやぶさ2」にも大きな期待がかかっていることは、身をもって感じています。4年後の帰還では、オリンピックを吹き飛ばすほどの大きな成果をもたらしてくれることを期待しています。

さて、現役時代に関わってきた小天体関連の私の思いを少しばかり書いておきます。私が大学院を終えた1970年ごろは、小惑星全体でも発見数が2000個に届かない状況でした。それが今や、近地球型小惑星の発見数だけでも1万個とか。「はやぶさ」計画立案時に言っていたのは、少数の探査で全体を理解するためには代表的な表面反射スペクトル型の小惑星から試料を持ち帰り、スペクトル型と物質との対応付けを行う必要があるということ

でした。「はやぶさ」の対象天体はS型、続く「はやぶさ2」は有機物に富むと思われるC型ということで、結果が楽しみです。試料の受け入れ管理と分析も、関係の方々の大変なご苦労により発展的に進められているようで、心強いです。

残されている重要なスペクトル型としては、D型やM型ということになるかもしれませんがね。今後のミッションとして火星の衛星フォボスからのサンプルリターンが計画されているようですが、この天体がD型に近いといわれています。私が衝突実験を始めた当時、直接撮像された小天体はフォボスだけでしたので、この天体には特別な思いがあります。今となってはつたないものですが、1977年と1983年にフォボスについて論文を書きました。

初めの論文から38年。小天体の科学の進展には目を見張るばかりです。そして、系外惑星や宇宙生物学といった隣接領域へと関連を持つようになってきました。科学の進展度の加速化ということもありますが、人間の長寿化によって、科学の進歩を身をもって実感できる時代に生きています。惑星探査も長寿化と長期運用ができるような工夫によって、より遠方へのミッションが求められていくのでしょうか。今後の発展をわくわくしながら、しかし気長に見守っています。(ふじわら・あきら)

ISAS ニュース No.421 2016.4 ISSN 0285-2861

発行/国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
発行責任者/宇宙科学広報・普及主幹 稲谷芳文  
編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 山村一誠

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008  
本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧になれます。  
デザイン/株式会社デザインコンピビア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

### 編集後記

「宇宙科学最前線」の軌道決定の話、いかがでしたか。私も専門外なので、結構難しい、読み応えのある話でした。軌道決定の精度を上げるために実にさまざまなことを考慮に入れていることに感服しました。(石川毅彦)

\*本誌は再生紙(古紙100%)、植物油インキを使用しています。

R100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています

