JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2021 5

No.482

Heraの概念図

Heraは、主探査機と2機のキューブサットを使用して、S型小惑星ディディモスと衛星ディモルフォスの二重小惑星の探査を実施する、ESA主導の国際共同プラネタリーディフェンス計画です。
日本の熱赤外カメラも搭載され、表層物質の熱物性や組成が調査されます。
NASAの探査機DARTがディモルフォスに衝突した際に形成される人工クレーターの現地観測が実施されると共に、衝突に伴う軌道変化が詳細に観測されます。
©ESA/Hera/OHB

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

低推力スラスタを活用した静止衛星の軌道遷移

三菱電機株式会社 鎌倉製作所 衛星情報システム部　北村 憲司（きたむら けんじ）

はじめに

人工衛星や宇宙ステーションは地球のまわりを回っている、これは周知の通りです。宇宙ステーションはおよそ高度400kmを飛行し、その軌道周期はおよそ90分ですが、高度を36,000kmまで上げてゆくと、気象衛星ひまわりのような静止衛星が飛んでいる静止軌道（Geostationary Orbit, GEO）となります。ケプラーの第三法則より、高度が高くなるほど軌道周期も長くなりますが、静止軌道の軌道周期はちょうど地球の自転周期と同じ約24時間となります。そのため、地上の観測者からみると、衛星はあたかも頭上でじっと止まっているように見えます。この顕著な性質により、静止衛星は、放送、通信、気象観測、など様々な分野で活用されています。本稿では、筆者が頂いた第13回宇宙科学奨励賞の研究内容から、イオンエンジンやホールスラスタに代表される低推力スラスタを用いて衛星を静止軌道まで遷移させる方法についてご紹介します。

静止軌道までの上昇

一般的に、静止衛星は静止軌道に直接ロケットで投入されることはなく、静止トランスファ軌道（Geostationary Transfer Orbit, GTO）と呼ばれる中間軌道に投入されます。この中間軌道から静止軌道まで、衛星は搭載されたスラスタを用いて自力で軌道を上昇させる必要があります。従来、静止衛星は、遠点でアポジエンジンとよばれる強力な化学スラスタを噴射して、静止軌道に遷移することが一般的でした（図1A）。

同様のことは惑星探査でも行われます。今年は、アメリカ、中国、UAE各国の探査機が火星に到着したことは記憶に新しいですが、探査機が地球から火星に向かう軌道も、上で述べた静止軌道への遷移方式と良く似ています。火星探査機の場合は、遠点で火星と会合し、化学スラスタを噴射して火星周回軌道に投入されます（図1B）。

図1A、Bに示すような、内側と外側の軌道を結ぶ楕円軌道を経由した遷移はホーマン遷移と呼ばれています。ホーマン遷移は比較的短時間（静止軌道の場合はおよそ半日、火星への遷移の場合はそれでも約9ヶ月！）で目標とする軌道に到達できますが、遠点側で強力な化学スラスタを噴射し、推進剤を多大に消費するというデメリットがあります。そこで、化学スラスタよりも排気速度が大きい（燃費が良い）電気推進スラスタによる遷移が注目されています。電気推進スラスタは推力がとても小さいため、軌道遷移に長い時間（静止軌道の場合は数ヶ月）がかかりますが、推進剤消費量を劇的に（およそ70%～80%程度）節約することが可能となります。例えば2t級の静止衛星の場合、化学推進だと1t推進剤が必要なところが、

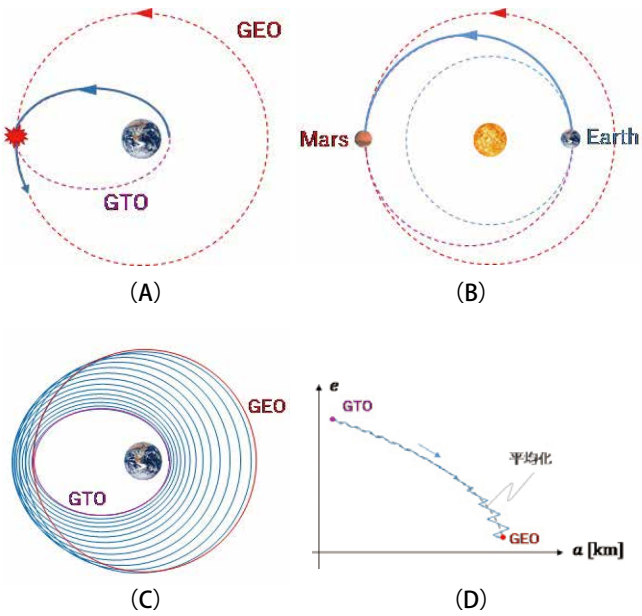

図1：静止トランスファ軌道から静止軌道までの遷移と地球から火星までの遷移。
A：静止トランスファ軌道から静止軌道までのホーマン遷移
B：地球から火星までのホーマン遷移
C：静止トランスファ軌道から静止軌道までのスパイラル遷移
D：スパイラル遷移中の軌道長半径と離心率の軌跡

電気推進にすることで300kgで済むことになります。これは打上げ質量の低減や、ミッションペイロードの拡充など大きなメリットとなります。電気推進を用いた軌道遷移では、一般に図1Cに示すようにスパイラル状に地球のまわりを数10～数100周と回りながら、徐々に軌道を上げてゆくことになります。

最適な遷移軌道とは？

それでは、静止トランスファ軌道から静止軌道まで低推力スラスタでスパイラル遷移するとき、どのようにスラスタの噴射方向を決めれば最適な軌道遷移を実現できるのでしょうか？このとき、代表的な最適性の指標としては以下のようなものが考えられます。

①できるだけ早く静止軌道まで到達したい
（最短時間問題）
②推進剤の消費量を最小としたい
（推進剤消費量最小問題）
③制御加速度のエネルギーを最小としたい
（エネルギー最小問題）

①と②の問題は工学的に重要ですが、解析的な解を求めるのが困難です。一方で、③については、平均化の理論や最適制御の理論を用いるとうまく解を求めることができます。ここでは、まず③について紹介したあと、①の問題について考えてみます。

エネルギー最小問題とは、スラスタ噴射によって生じる加速度の二乗を時間積分したもの（エネルギー）ができるだけ小さくなるような遷移軌道を求める問題です。この本質はスラスタ推力を可変とすることを許容しつつ、推薬消費を小さくすることにあります。この問題を解くために重要なポイントは以下の２つです。

・平均的な振る舞いに着目する（平均化法）
・状態変数をうまく選ぶ（正準変換）

今、簡単に2次元で考え、衛星はあるXY平面上を運動すると仮定します。このとき、時々刻々の衛星の状態は位置2自由度、速度2自由度の合計4次元で記述することができます。位置X、Yの軌跡を描いたのが、図1Cに相当します。ただし、衛星の状態はXYの直交座標系以外でも表現することができます。有名な表現方法は軌道要素と呼ばれるもので、衛星の状態を楕円の長半径、離心率、近点引数、真近点離角の4変数で表現できます。図1Cの軌道を、長半径aと離心率eの世界で眺めると、図1Dのようになります。直交座標系XYでは何周もぐるぐると回っている軌道が、aとeの世界では図1Dの実線で示すように振動しつつも比較的単純な軌道になっていることがわかります。この振動を除去し、平均化すると図1Dの点線のように更にシンプルになります。このように、変数のとり方をうまく選びつつ、平均的な振る舞いに注目することで問題を考えやすくすることができるようになります。紙面の都合で詳細は割愛しますが、最適制御や解析力学の理論を用いて更に変数をうまく変換することで（正準変換）、エネルギー最小遷移問題を、ある仮想的な平面（$\xi\eta$平面とよぶことにします）上での2点を結ぶ軌道を求める問題に帰着させることができます（図2上）。ただし、この$\xi\eta$平面上では、距離の二乗に比例する中心力が働きます。現実世界では、地球の重力は距離の二乗に反比例しますが、この世界では、距離の二乗に比例する斥力もしくは引力となるところが面白い点です。中心力が引力か斥力かは、静止軌道までの軌道周回数を多くするか、少なくするかに依存します。図2の左下は斥力の場合で、軌道周回数が短いケースです。逆に右下は引力の場合で、周回数が長くなります。中央の図は中間ケースです。これらは、いずれもある指定された遷移時間と周回数に対してエネルギー最小となっています。

この「距離の二乗に比例する斥力もしくは引力が働く世界で、与えられた2点を結ぶ軌道を求める」問題の、解は解析的に求めることが可能です。解析的に解が求められると嬉しいことはなんでしょうか？1つは、複雑な計算をしなくても、（エネルギー最小の観点で）最適な噴射方向を決定できることで

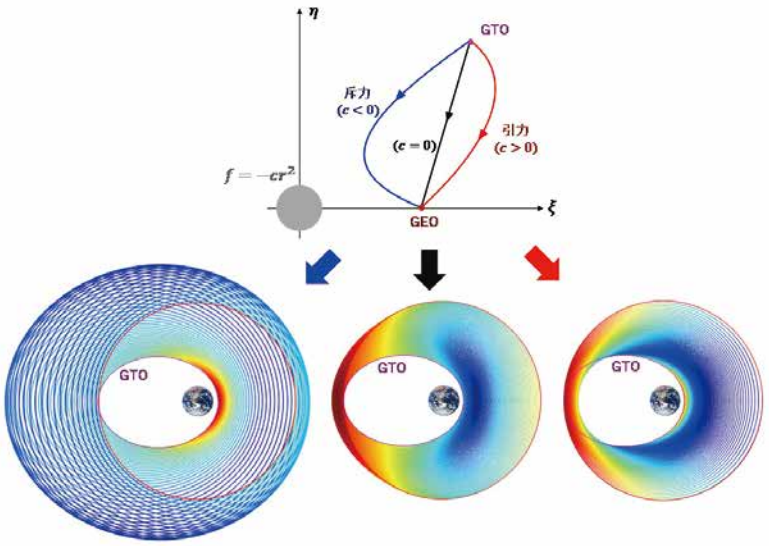

図2：エネルギー最小遷移軌道の比較。
軌道図の色は加速度の大きさを表しており、赤色になるほど大きい。

す。これは衛星搭載計算機のような計算パワーが潤沢でない場合にメリットとなります。別のメリットとしては、エネルギー最小解をもとに、別の問題（最短時間問題、推進剤消費量最小問題など）を解くことができる点です。工学的により実用的な最短時間問題や燃料最小問題は解析的な扱いが難しいため、数値的な計算に頼ることになりますが、数値的に最適化する場合の初期解としてエネルギー最小解を活用できるのです。

最短時間問題

次に、最短時間問題について考えてみましょう。最短時間問題とは、その名の通り、できるだけ短い時間で静止軌道まで到達する問題です。冒頭で述べたとおり、低推力エンジンによる軌道遷移は一般に数ヶ月の時間を要するため、打ち上げてからミッション開始までの時間をできるだけ短くするためにも最短時間問題は実用的に重要となります。最短時間で軌道遷移を完了するためには、常にスラスタを噴射し続けながら、時々刻々のスラスタの噴射方向を適切に制御する必要があります。

もしも軌道上での衛星の運動を完全に予測することができれば、予め地上の計算機で最適な噴射方向を計算しておき、それを衛星にアップロードしてスラスタをその方向に向ける、というような運用ができるでしょう。しかし、軌道上での想定外の事象（スラスタの故障、シャットダウン等）が起こると地上で再度計算をやり直す、というような手間が発生します。また、想定外というほどの事象が起こらずとも、地上で前提としている衛星の力学モデルと実際の軌道上でのモデルの間には多少の差異が必ずあるため（質量特性誤差、スラスタ推力誤差、大気抵抗誤差など）、地上で予想される軌道と実際の軌道が徐々にずれてゆきます。この場合も定期的に地上で計算をやり直すことが必要となります。このような想定外の事象や徐々に蓄積されてゆく誤差に対してロバスト（頑強）にするための方策として、フィードバック制御則を用いることが考えられます。これは、衛星が今の自分の状態をもとに、目標軌道（静止軌道）に最短時間で到達するために適した噴射方向を算出するという制御方法です。図3に軌道長半径を変化させるために最適な噴射方向と、離心率を変化させるために最適な噴射方向を矢印で示しました。これらの矢印を重ね合わせることで、時々刻々の噴射方向を計算することができます。とくに、この重ね合わせの割合を「目標軌道要素−現在の軌道要素」の差分に応じて適切に設定することで、フィードバック制御の構造を持たせつつ、目標軌道（静止軌道）に最短時間で到達するために準最適な噴射方向を実現することができます。

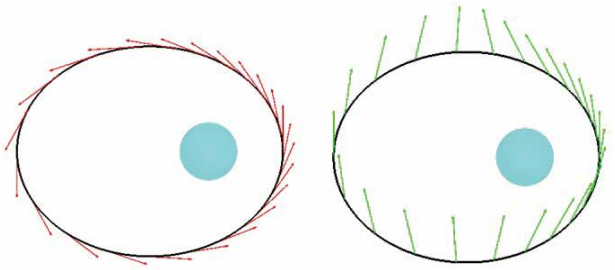

図3：長半径aの制御に最適な噴射方向（左）と離心率eの制御に最適な噴射方向（右）。

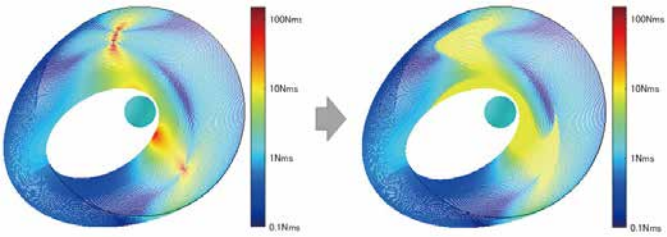

図4：遷移軌道に沿った角運動量の分布（左：姿勢制約を非考慮、右：考慮）。

ここまでは、衛星の軌道運動すなわち、並進運動について話を進めてきました。しかしながら、衛星の姿勢も電気推進スラスタを用いた軌道遷移では重要となります。電気推進スラスタは電気エネルギーで推進剤を加速させて排出することで運動量を得ます。消費エネルギーが大きいため、衛星の太陽電池パドルを太陽の方向に向け続けて発電効率を確保する必要があるのです。一般的に静止衛星の太陽電池パドルはある一軸まわりに回転することができます。この回転自由度を用いると、太陽電池パドルを太陽に向けつつ、スラスタの推力軸が望ましい方向を指すような衛星の姿勢が定まります。ただし、衛星のとるべき姿勢が指定されたとしても、その姿勢に常に追従するように制御できるとは限りません。衛星の姿勢は、リアクションホイールに代表される姿勢制御アクチュエータによって制御されますが、姿勢制御アクチュエータによって発生できるトルクや角運動量には上限があるからです。したがって、トルクや角運動量の制約を考慮しつつ、軌道と姿勢を制御することが必要となります。図4左は、姿勢制御アクチュエータの制約を考慮しないでフィードバック制御で軌道遷移した場合の衛星の角運動量の分布を示しています。この場合、角運動量が非常に大きくなる区間があり、実際にはこのような制御は実現できません。一方で、図4右は角運動量とトルクの制約を考慮したフィードバック制御則であり、角運動量の履歴は現実的な値となっています。なおアクチュエータ制約を考慮しても、遷移日数の増加は微小となっています。

おわりに

低推力かつ多周回の軌道遷移は理論も実運用も複雑となりますが、非常に面白い問題構造をもち、今後も活発な研究がなされる分野と考えられます。ホールスラスタやイオンエンジンの技術成熟度が向上したことで、商用衛星や月探査などでも低推力多周回の軌道遷移は化学推進に変わる現実的なオプションとなりつつあります。商用通信衛星では、通信の大容量化の需要に伴いペイロード比率の向上が求められていますが、電気推進によってペイロード輸送効率が高まることにより、商用衛星においては私達が享受する衛星サービスの向上が期待されます。また探査ミッションではミッションペイロードの拡充によって探査の質と量が高まり、新しい発見へとつながることでしょう。

謝辞

本稿に関連する研究を進めるにあたって、（元）大阪大学の山田 克彦教授をはじめ、三菱電機 先端技術総合研究所、鎌倉製作所の皆様には貴重な助言を数多く頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

ただいま米国への出発準備中

超小型探査機EQUULEUSとOMOTENASHIは、SLSロケットに搭載するため、5月中にNASA Kennedy Space Center（KSC）へ向けて発送予定です。この原稿執筆時点では、輸送のための準備と探査機の国内での最終試験をしています。ロケットの打上げは今年の11月頃の予定ですが、超小型探査機はOSAと呼ばれるロケットとOrion宇宙船を結合するアダプターの内部に搭載されるため、約半年前の組み込みが必要です。KSCでは、輸送後の動作チェックと、ロケットからの放出装置（ディスペンサー）へ探査機を組み込む作業を行います（図1）。またOMOTENASHIは、固体ロケットモーターが危険物であるため別梱包で輸送する必要があり、KSCにて探査機の最終組立を行います。慣れない場所で作業する必要があるため、相模原にてロケットモーターのダミーモデルを使って何度も組み立て練習をしました。また組み立てに必要な治具、工具を忘れずに輸送するように入念に確認しています。

図2はOMOTENASHIの相模原での試験風景です。KSCでの動作チェックに使用できる机2つで試験ができるかどうか確認しています。EQUULEUSも同様に、東京大学本郷キャンパスにて試験手順の最終確認中です。KSCでの作業のため、プロジェクトメンバーも渡米します。コロナ禍での海外出張であり、米国到着後および日本へ帰国後には定められた期間、ホテル等での隔離が必要で、PCR検査もたびたび受ける必要があります。感染防止のために入念な準備をしているところです。

（船瀬 龍、橋本 樹明）

図1：EQUULEUSダミー構体を用いたディスペンサーへの格納手順のリハーサルの様子。

図2：KSCでの作業を想定し、机2つに試験装置を並べたセットアップ。

二重小惑星探査計画Hera*

HeraはS型小惑星ディディモスとその衛星ディモルフォスからなる二重小惑星にランデブーする欧州宇宙機関（ESA）の小惑星探査計画です（表紙参照）。ディモルフォスには米航空宇宙局（NASA）の探査機DARTが衝突する予定で、Heraは衝突後の軌道変化やクレーターの事後観測を行います。その主な目的はプラネタリーディフェンス、即ち小惑星が地球に衝突するとわかった場合にその軌道を変えて衝突を回避するための技術や知識の習得です。実は、地球は小惑星衝突の潜在的な危機に晒されているのです。甚大な被害をもたらす直径数10メートル以上の小惑星が地球に衝突する頻度は100年に1回以上です。有名な例では、1908年にツングースカで森林が周囲50kmにわたって壊滅的に薙ぎ倒される原因となりました。また、記憶に新しいところでは2013年に、チェリャビンスク隕石の落下時の衝撃波によって、大きな人的被害や建物損壊が発生しました。

プラネタリーディフェンスは、人類社会への潜在的危機を惑星科学の知識と宇宙工学の技術によって未然に防ぐ応用科学です。直径数10mの小惑星の軌道は、数mの探査機を衝突させることで僅かに変化します。その僅かな軌道変化によって、数10年後に地球に衝突する可能性があると判明した小惑星の地球衝突確率を、実質ゼロまで低減させることができます。しかし小惑星の物性、特に硬さや空隙率、衝撃減衰に関する知識は乏しく、衝突後の挙動がどうなるかよくわかっていません。「はやぶさ2」では、熱赤外撮像によってC型小惑星リュウグウの岩塊が高空隙であること、さらに人工衝突実験によって岩塊が低摩擦な状態で堆積していることがわかりました。しかし地球近傍に最も多く存在するS型小惑星の物性はよくわかっていません。

Heraには日本の熱赤外カメラが搭載され、S型小惑星の岩塊の空隙率など物性を調査するほか、DART衝突によるクレーターの形状やサイズ、物質変化などを調査します。日本からは熱撮像観測に加えて、衝突科学や地形・地質学、軌道運動の専門家も参加し、史上初の国際共同プラネタリーディフェンス計画に参画します。さらに、観測データは科学的にも非常に貴重なものであり、小惑星の物性科学の進展や、二重小惑星の形成過程の理解など新たな惑星科学の展開が期待されます。

（岡田 達明）

*Heraはギリシア神話に登場する女神の名前で略語ではありません。NASAのHERA（Human Exploration Research Analog）とは別のものです。

再使用ロケット実験機RV-X･第2次地上燃焼試験の状況

能代ロケット実験場で実施している再使用ロケット実験機RV-Xの第2次地上燃焼試験（RV-X-2）についてご紹介します。RV-Xは宇宙研と研究開発部門が協働で取り組む研究で、先日プロジェクト化された1段再使用飛行実験CALLISTOのフロントローディングとして位置付けられるとともに、より将来に向けたロケットの再使用技術を飛行実験などにより獲得するための実験機です。2018年10月号にて第1次地上燃焼試験（RV-X-1）についてご紹介以来となりますが、その後、実験機を飛行形態に組み上げて、再び能代ロケット実験場の再使用ロケット専用スタンドに組み付け、飛行試験に向けて必要となる、エンジン／推進／構造／誘導制御／アビオニクスなど、実験機を構成する各系の特性を取得するための地上実験を進めています。

RV-Xに搭載されているエンジンは、再使用観測ロケット技術実証プロジェクトで角田宇宙センターにて開発された、推力4トン級の再使用型の液酸液水エンジンで、これまでに150回以上の燃焼試験を耐え抜いてきました。耐久性や信頼性、整備性など、「再使用」するという観点で設計されたエンジンで、実際に再使用ロケットに搭載して繰り返し運用することで、その機能・性能を実証するとともに、将来に向けた新たな課題を見つけることがRV-Xによる研究です。エンジンだけでなく、これまでに要素レベルで研究されてきた推進剤タンクの断熱材や供給系、着陸脚、離着陸飛行制御など、再使用型宇宙輸送システムの構築に向けた様々な技術を実証することがRV-Xの役割です。

再使用ロケット実験機RV-X第2次地上燃焼試験の様子。

RV-X-2では、これまで7回の燃焼試験によりエンジンの作動や推力方向制御の特性取得、アビオニクスの機能確認などを達成しました。エンジンや機体も試験中の過酷な環境に耐えていますが、それ以上に頑張っているのが冬の極寒、夏の猛暑の中で、現場で作業するチームメンバーのみなさんです。特に、私よりもずっと先輩の方々が多いエンジン班のみなさんは、彼らが開発してきた再使用エンジンを、時に優しく時に厳しく可愛がり、老体に鞭打ちながら能代での実験を支えてくださっています。新たな課題も明らかになりながら一歩一歩ではありますが、飛行実証に向けてチーム一丸となって進みたいと思います。

（野中　聡）

深宇宙探査技術実証機（DESTINY$^+$）プロジェクトへ移行

深宇宙探査技術実証機 DESTINY$^+$ミッションは、小型探査機とキックステージの組合せによりイプシロン級ロケット（開発中のイプシロンSロケットによる打上げ予定）によって、深宇宙探査を切り開くことを目的にしています。具体的には、工学目的として、電気推進（イオンエンジン）航行技術の発展とフライバイ探査技術の獲得により太陽系探査対象天体の拡大を目指します。理学目的として、地球生命の前駆物質の可能性がある地球外からの炭素や有機物の主要供給源と考えられている地球飛来ダスト及びその母天体の実態解明を目指し、ふたご座流星群の母天体 Phaethonを探査目標としています。DESTINY$^+$ミッションの特徴は、工学目的とともに、その実証結果として理学目的を達成することにあります（理工一体ミッション！）。

DESTINY$^+$Twitterのアイコン。
2021年3月に開催された宇宙研特別公開中にTwitterにて投票を行って選ばれました。周囲はプロジェクトメンバー関係者が作った候補のアイコン達。

探査天体Phaethonは黄道面に対して軌道面が大きく傾いており、「はやぶさ2」やMMXのように探査天体とランデブーをすることができず、Phaethonが黄道面を横切るタイミングにあわせて、探査機を最接近させてすれ違いざまに観測をするフライバイミッションとなっています。最接近距離は500㎞、すれ違う相対速度は約36km/sとなり、「待ったなしのワンチャンス観測」という挑戦的なミッションです。

プリプロジェクトとなってからほぼ一年。システム要求審査、探査機システムメーカ選定、搭載観測機器メーカ選定、システム定義審査、プロジェクト移行審査と駆け抜け、2021年5月1日にDESTINY$^+$プロジェクトとなりました。2024年度打上げ目標に向けて開発をすすめていきます。

誰かに提示されたものの良し悪しを議論するのではなく、各々が考え検討した結果を持ち合いより良い設計を作り上げていくことを常に意識して開発をすすめていきたいと考えます。不具合の発見は成功への糧として、「今見つかってよかったね、地上で不具合を見つけられてよかったね、対応できるのだから」を合言葉に、ミッション達成に向けた確実な開発を行っていきます（「よかったね」と発言する私の笑顔が怖く見えても気のせいです（笑））。

若手を中心に、プロジェクトをわかりやすく伝えるためにいろいろな企画を考えています。そのひとつとしてTwitterによる情報発信を始めました。ぜひ、フォローして応援いただければと思います。

（高島　健）

Twitter ID:@DESTINY_JAXA　ホームページ:https://destiny.isas.jaxa.jp/

「はやぶさ2」のカプセル展示

2020年12月6日に、6年間の宇宙の旅を終えて地球に戻ってきた「はやぶさ2」の再突入カプセル（地球帰還カプセル）ですが、その公開が始まりました。

まず最初に、2021年3月12日から16日にかけて相模原市立博物館にて公開されました。公開初日の午前中には記念式典が行われ、相模原市の本村 賢太郎市長をはじめとして、JAXAからは國中 均ISAS所長、津田 雄一はやぶさ2プロジェクトマネージャなどが出席しました。また近くの共和小学校の生徒さんにも見学していただきました。その後、一般の人に見学していただきましたが、相模原市立博物館の場合には往復はがきで申し込みをして抽選で当たった人が見学できるというもので、かなりの倍率だったそうです。コロナ禍のもとで、見学できる人数を制限しなければいけなかったことが残念でした。それでも6日間の期間中に、4,600人ほどの方に見ていただくことができました。

続いて3月27日から4月11日に国立科学博物館にてカプセル展示が行われました。こちらは、専用サイトからの事前予約制で、やはり密にならないように配慮されての公開でした。期間中に、20,000人ほどの方が見学をされたということです。また、4月8日には、ヘギョン・ユ駐日オーストラリア首席公使にもご来訪いただきました。オーストラリア政府や関係機関の皆さんには、カプセルのウーメラ帰還に関しまして多大なるご協力をいただきました。感謝いたします。

国立科学博物館のカプセル展示にご来訪いただきましたヘギョン・ユ駐日オーストラリア首席公使（中央）ご一行。左は藤本 正樹副所長。

相模原市特別観光親善大使に就任した「はやツー君」。

今後、今年8月から来年3月にかけて全国でカプセル展示を行う予定です。公開する場所は今後決定されます。詳しくはISASのWeb*に掲載されますのでご覧下さい。是非、宇宙を旅してきた本物を見ていただければと思います。本物ならではの迫力を感じていただけることと思います。

はやツー君が相模原市特別観光親善大使に就任！

「はやぶさ2」のマスコットキャラクター「はやツー君」が相模原市の特別観光親善大使に任命されました。2021年4月1日より1年間、相模原市の魅力を市内外に伝える役目を担うことになります。はやツー君曰く、「生まれ故郷である相模原市の魅力を、全国、全世界、そして宇宙にも発信していくよう頑張ります！」ということです。（吉川　真）

* https://www.isas.jaxa.jp/topics/002615.html

照井 冬人さん、尾川 順子さん、吉川 健人さんが、第53回市村学術賞功績賞を受賞

このたび、はやぶさ2プロジェクトチームの照井 冬人さん、尾川 順子さん、吉川 健人さんが、第53回市村学術賞功績賞を受賞されました。受賞題目は「はやぶさ2による小惑星へのタッチダウンのための高精度画像航法誘導制御技術の確立」。つまり、「はやぶさ2」の大本命技術である着陸の成功が評価されての受賞でした。実は、市村学術賞は「はやぶさ2」関連で既に2回「貢献賞」を獲得していますが、今回はそれよりも一段高い「功績賞」が授与されました。

「はやぶさ2」は2019年2月と7月に小惑星リュウグウへの着陸に成功しました。その着陸精度は、それぞれ1mと60cm。これ以上望めないほどの大成果です。最後の着陸成功ばかりが注目されますが、そこへ至る周到な作戦こそが素晴らしかった。精度の良い着陸のためには精度の良い降下（＝誘導）が必要です。そのためにはレーザー高度計や画像を用いた位置計測（＝航法）が不可欠。私たちはリュウグウ到着後に、中高度航法テスト（2018年7月）→中高度誘導テスト（同年7～8月）→低高度航法テスト（同年9～10月）→低高度誘導テスト（同年10月）と順番に技術を詰めていき、翌2月についに着陸を成功させたのでした。

1960年代、アポロ計画では10年かけて、地球周回（4～7号）→月周回（8号）→着陸船テスト（9号）→月着陸リハ（10号）と行い、11号での着陸成功へ至りました。規模は違いますが、技術ステップの踏み方は実はとても似ています。少し誇示が過ぎるかもしれませんが、「はやぶさ2」はアポロの成したことを、3億キロ彼方で1つの機体で成したと言えます。アポロは11号での月面到達後、15号でリスク承知で高い科学成果を狙い、ハドリー渓谷に着陸させました。その結果がジェネシスロックの発見に繋がりました。これは、「はやぶさ2」が周到な積み重ねの上に実施した第2回の着陸決行と重なります。この着陸で採取できたかもしれない地下物質から“太陽系創世記”の情報が得られたのではと期待が膨らみます。

本技術には、受賞3名の他にたくさんのJAXAおよびNECの技術者が携わっています。今から約13年前の開発当初、「どうせ着陸をやるからには精度1mクラスを狙いたいよね」という遊び心の会話から、いくつかの追加の機能を仕込みました。それがリュウグウの険しさに打ち勝つ決め手となり、ミッション成功への大転回に繋がりました。唯一無二の小天体着陸技術の確立と向上に真摯に向きあったこれら技術者の方々に心から賛辞と祝福を送りたいと思います。（津田 雄一）

左から吉川氏、照井氏、尾川氏。
（市村清新技術財団提供）

OMOTENASHI搭載 超小型固体ロケットモーター

爆発的な力を発揮する小型推進装置

OMOTENASHIの中心部には、全長約300mm・重量約4kgの、固体ロケットモーターが搭載されています（図1）。固体ロケットモーターは、モーターケースの内側に火薬類の一種である固体推進薬が詰め込まれた推進装置で、推進薬が燃焼する際に発生する高温・高圧の燃焼生成物をノズルから排出することによって推進力を得ます。

OMOTENASHIに搭載された超小型の固体ロケットモーターは、僅か20秒弱の燃焼時間中に、着陸モジュールである約0.7kgのサーフェスプローブ*を頭部に載せた状態で、約2,500m/sも加速することができます。この爆発的な力を利用して、着陸シーケンスでは、頭部に着陸モジュールを搭載した固体モーターがオービティングモジュール*から分離するとともに、月面に向かって逆噴射を行いながら減速して着陸します。

最先端のレーザー点火システム

通常、固体ロケットの点火には、電線に電気を流すことで点火玉と呼ばれる火薬に点火し、その火炎をきっかけにロケット本体に点火する方式が取られます。ここで、作業中の静電気や探査機の迷走電流などによる不慮の点火玉の着火の可能性を考え、SAD（Safe & Arm Device）と呼ばれる火炎を遮断する安全装置をロケットに取り付けます。ところが、究極の小型化・軽量化が求められるOMOTENASHIには、SADの取り付けは不可能でした。

そこで、OMOTENASHIは日本の固体ロケットでは初めてとなる、レーザー点火システムを採用しています。これは、OMOTENASHI探査機内に配置したレーザーダイオードから放出した強力なレーザー光を、電気を通さない光ファイバーでロケット本体内に導き点火を行う方式です（図1）。レーザーは探査機内部のコンデンサに蓄えた大きな電気エネルギーにより放出される設計としているため、静電気などで誤動作する恐れが無く、SADが不要になります。

OMOTENASHIは、有人宇宙船として設計されたOrionと相乗りで、NASAのロケットSLS（Space Launch System）によって打ち上げられます。そのため、NASAによる非常に厳しい安全審査を受ける必要がありました。特に、火薬がぎっしり詰まったOMOTENASHIの固体ロケットモーターには厳しい目が向けられました。しかしながら、新たに開発したレーザー点火システムと固体ロケットモーターの安全性が認められ、無事に審査を通過することができました。

図1：OMOTENASHI搭載超小型固体モーターとレーザー点火部。

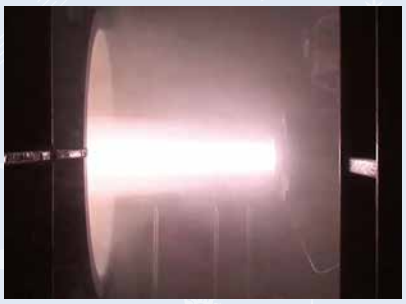

図2：宇宙科学研究所あきる野実験場で行われた真空燃焼試験の様子。

磨き上げられた固体ロケットモーター

OMOTENASHI搭載超小型固体ロケットモーターには、レーザー点火システム以外にも、様々な技術—いぶし銀のノウハウから挑戦的な新規技術まで—が詰め込まれています。開発のプロセスでは、それらの技術を検証し、OMOTENASHI向けに最適化するために、様々な試験を実施しました。特に重要なのが、モーターの燃焼試験です。宇宙科学研究所あきる野実験場では、真空燃焼試験を行いました（図2）。この試験は、JAXAの試験場で固体ロケットにレーザー点火した初めての例となり、真空環境下における推進性能とレーザー点火システムの特性に関する重要なデータを取得することができました。

開発プロセスの中で、数多くの燃焼試験を実施し、その中でOMOTENASHI搭載超小型固体ロケットモーターは磨き上げられ、小型・軽量なボディから大きな力を確実に発揮できる推進装置として完成したのです。

固体ロケットが切り拓く宇宙探査の未来

間もなくOMOTENASHIを打ち上げるSLSロケットには、全長約54m・重量約730tの固体ロケットブースターが取り付けられます。人類史上最大の超巨大固体ロケットブースターによって地球から打ち上げられる世界最小の月面着陸探査機OMOTENASHIが、最後は超小型固体ロケットモーターで月面に着陸すると考えると、まさに固体ロケットの力によって宇宙探査の新たな歴史が作られようとしていると言えます。

小型・軽量で大推力を発揮でき、さらに安全性も兼ね備えた固体モーターを活かせば、これまでは到達不可能だった、重力の強い天体などへのアプローチも可能になるかもしれません。OMOTENASHI搭載超小型固体モーターは、まさにこのコンセプトを具現化したものと言えます。

森下 直樹（もりした なおき）

* ISASニュース 2021年3月号本連載記事参照

JAXA 名誉教授
上杉 邦憲（うえすぎ くにのり）

年年歳歳花相似 歳歳年年人不同

我が家に一鉢の風蘭（富貴蘭）があり、年に一度初夏の頃、可憐な花を沢山咲かせます。この風蘭には以下のような歴史があります。

今から51年前の昭和45（1970）年2月11日、鹿児島県の大隅半島にある内之浦という町の太平洋を望む高台から日本初の人工衛星「おおすみ」が打ち上げられました。ロケットの打上げというと、種子島と思われる方が殆どかもしれません。私が「内之浦でロケットを上げています」と言うと「エッ、そんな危ない!」と言われたのは実話です。「内之浦」を「うち（家）の裏」と間違われたのでした。

内之浦は「おおすみ」打上げの頃、人口は約5,000人、漁業が主産業で、町の道路は未舗装、信号機は1つもなく、裸足の子供たちが私たちロケット実験班に対しても、元気良く「おはようございます! 」と挨拶してくれる、良き時代の小さな町でした。

内之浦には婦人会という組織があり、この方たちは昭和37（1962）年実験場を造成する際にモッコを担いだり整地作業を手伝ったことに始まり、「おおすみ」打上げ成功の時には町を挙げての提灯行列、その後も衛星打上げ前日には必ず成功祈願の千羽鶴を届けてくださるだけでなく、場内各建屋の掃除や実験班の昼食の世話など「さつまおごじょ」の本領を発揮して、打上げ成功にはなくてはならない縁の下の力持ちの存在でした。

婦人会2代目の会長橋本 雅子さんは、昭和41（1966）年私が大学院生として初めて内之浦に行った時、若く見えたらしく「なんか、最近の宇宙研は中学生も雇っとるんか」と言われたのが機縁で、その後家族ぐるみで親子のような付き合いをさせて戴きました。雅子おばちゃんの御主人惟義さんは「1町1営林署というのは内之浦だけだ」というのが御自慢の営林署職員でした。

「おおすみ」打上げの頃、その惟ちゃんが「山に風蘭が自生していたので株分けした。一株上げる」と言ってくださったのが写真の風蘭です。樹齢ではなく何というのか知りませんが、こんな小さな植物が50年以上経った今に至るまで、毎年初夏になると変わることなく可憐な花を咲かせています。なんという生命力でしょうか。

2020年6月撮影

まさに「年年歳歳花相似 歳歳年年人不同」で、惟義さんもすでに鬼籍に入られ、私も「はやぶさ」の打上げを最後に内之浦へ行く事もなくなりました。けれども一年に一度この白い風蘭の花が咲くと、内之浦の人達との熱い交流や打上げに纏わる様々な出来事が懐かしく思い出されます。

今や内之浦という町名もなくなり、宇宙研もすっかり変わってしまったように思います。思い起こせば、1993年、外部評価委員会委員として招聘したNature誌のJohn Maddox編集長が“Recipe for a good research laboratory”（Nature Vol.386, 23/30 December 1993）と題して書かれたNews Letter には当時の宇宙研の特徴がよく捉えられています。そこには、宇宙研がうまく機能していて、世界一の研究所と言うに値する、といういささか褒め過ぎの評価が載っていますが、その理由として挙げられていたのは、他の宇宙予算がオーバーしても影響を受けない宇宙科学の独立性、宇宙研が発想から設計、オペレーションまでの全てを遂行する自律性、そして工学と理学が完全に対等のパートナーとしてほぼ1年に1つの優れたプロジェクトを実行する遂行能力の3点でした。さらに約100名の大学院生を含め、300名という少ない人数も宇宙研の強みであり、その中で、大学院学生もコントロールセンターで責任を持つなどして教育していることも重要な要素と述べています。

そんな小さな研究所だった宇宙研が、NASA、ESA、IKIといった巨大な研究機関と対等に渡り合って、時には競争し、時には協力して宇宙科学世界一を目指していました。国際ハレー艦隊によるハレー彗星探査や、この4機関で設立した国際コンサルグループ（IACG）の下での国際太陽・地球物理（ISTP）計画や太陽系探査は大きな成果を挙げました。MUSES-C（「はやぶさ」）もIACGの協力がなければ、困難を乗り越えて帰還することは出来ませんでした。こうして世界の研究機関と競争と協力をしながら、世界一の宇宙科学研究所を目指すという伝統の精神は、今でも宇宙研の皆さんの心に脈々と流れていることでしょう。

年年歳歳人や組織が変わっても、歳歳年年小さくても世界一美しい宇宙科学の花を咲かせることを願っています。この白い風蘭のように。

編集後記

今と昔の地図を簡単に比較できる某大学研究室のサイトを知った。近所の散歩が多くなった昨今、数10年スケールでの街の激変や昔の痕跡が知れて、重宝している。宇宙開発の環境も現在激変しつつある。20-30年先の宇宙科学がどう変わるかは楽しみであるが、予想が難しい。（清水 敏文）

ISASニュース No.482 2021年5月号
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　藤本 正樹
編集責任者／ISAS ニュース編集委員長　山村 一誠
デザイン制作協力／株式会社アズディップ
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1　TEL: 042-759-8008

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶http://www.isas.jaxa.jp/