

IKAROSに停波コマンドを送信した直後の 管制室での記念写真

小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSは5月15日に15年間の運用を終了しました。写真にはギネス世界記録などの認定証やファンの皆様からいただいたグッズの一部と一緒に写っています。世界初のソーラーセイル・ソーラー電力セイルの実証に成功したIKAROSは2024年に航空宇宙技術遺産に認定されました。IKAROSの技術を継承・発展させることで、特に小型探査や外惑星領域探査に広く貢献することを目指しています(p.4参照)。宇宙研ゆるキャラ総選挙で優勝したイカロス君が停波コマンドをどのように受け取ったか、ぜひX (旧Twitter) *をご確認ください。

*<https://x.com/ikaroskun>



The Forefront of Space Science

宇宙 科学 最前線

次世代深宇宙探査機のためのドッキング機構

東京科学大学工学院機械系 教授 中西 洋喜(なかにし ひろき)

はじめに

次世代の宇宙探査はドッキングがキーテクノロジーの1つになります。これはいったいどういうことでしょうか。本記事では、東京科学大とJAXAが共同で開発を進めている深宇宙探査用のドッキング機構について紹介します。

次世代サンプルリターンミッションとドッキング

地球外天体へ赴き、その石や砂などその天体のサンプルを持ち帰る探査ミッションをサンプルリターンミッションと言います。古くはアポロ宇宙船が月サンプルを持ち帰り、前回1970年の大阪万博では米国館の目玉展示として大行列を作りました。近年では対象となる範囲も深宇宙(地球周回軌道よりも遠くの領域のこと)へ広がり、日本の「はやぶさ」「はやぶさ2」が小惑星の砂を持ち帰ったことは記憶に新しいことと思います。今後、火星や火星の衛星フォボスからのサンプルリターンも予定されており、宇宙探査の1ジャンルとしてますます発展していくことが期待されています。サンプルリターンミッションの特徴として、目標となる天体に接地してサンプルとなる石や砂を収集する必要があるという点が挙げられます。これは一歩間違えると探査機が地面に衝突するなど破損のリスクを伴う危険な作

業です。「はやぶさ2」では、1回目のサンプリングに成功したあと、2回目のサンプリングを行うかどうか慎重に検討されました^{*1}。

もし、2回目のサンプリングのための着地に失敗した場合、1度目に採取できたサンプルも失うことになってしまうのです。最終的には2回目のサンプリングはリスクを越える大きな成果が期待できることから、十分な準備の末、見事成功しました。しかしできることならば、このようなリスクは避けたいところです。現在JAXAを中心に検討がされている次世代のサンプルリターンミッションでは、これを親子型の探査機を用いることによって解決しようとしています。探査機を航行専門の親機と着陸・サンプリング専門の子機に分けるのです。両機はドッキングした状態で探査対象の天体に向かい、目標天体の周回軌道に入ったのち、親機から子機が分離され、子機だけが天体表面に接地し、サンプルを採取します。その後、親機まで戻って再ドッキングし、採取したサンプルを親機に渡します。子機から親機にサンプルを渡す手間が増えましたが、サンプリングによって地球へ帰還する機能を喪失する心配はなくなります。これはかつてアポロ宇宙船が取っていた方式でもあるのですが、これを無人で、かつ深宇宙で行おうというコンセプトです。さらに将来は燃料補給機などともドッキングして探査機を再使用するといった「深宇宙OTV(Orbital Transfer Vehicle, 軌道間輸送機)」へ発展させようという検討もなされています^{*2}。

*1 https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20190708_PPTD_approach3/

*2 <https://www.isas.jaxa.jp/home/research-portal/people/2023/0727/>

深宇宙でのドッキング

上記の次世代探査機の実現に欠かせない技術が「ランデブー・ドッキング技術」になります。これは宇宙機同士が接近（ランデブー）し、結合（ドッキング）して一体化するという技術で、上記のアポロ宇宙船を始め、現在でも宇宙ステーションへの人員や物資の輸送において日常的に行われています。それでは、この技術をそのまま転用すれば良さそうですが、そう簡単な話ではないのです。まず、危険のある作業ですので、人が操縦・または監視することが望ましいです。これまで実現している宇宙でのドッキングのほとんどは有人宇宙船同士や、片方に宇宙飛行士が搭乗しているケースになり、無人で行われたケースも地球近傍で地上局から常時監視ができる状況でした。しかし、深宇宙探査機、特に日本が推進するような比較的小さな探査機では無人が大前提となります。通信による監視についても、深宇宙となると程度に差はありますが、例えば火星ですと光（電波）でも往復で数分から数十分かかる距離になりますからリアルタイム監視ということは不可能になります。よって完全自律でドッキングを完了させる必要があります。

また、ドッキングをするには専用の連結機構とそれを動かすモータなどのアクチュエータが必要です。探査機の体積と重量はロケットの能力やコストによって大きく制約を受けており、その中でドッキング機構に割り当てられる分、本来探査のために必要な機器や燃料が減ることになります。したがって、できるだけ軽量・コンパクトな機構とすることが望まれます。従来の物は深宇宙探査機に提供するには大きく重く、深宇宙探査機用のドッキング機構はまだ確立されていないため、東京科学大学ではJAXAと共同で新しいドッキング機構の開発に取り組んでいます。

ドッキング機構に求められる要求

本ドッキング機構は、図1のようなドッキングシーケンスを想定しました。まず、親機と子機がドッキング可能な相対位置であることを確認したのち、親機が接近を開始し、ある距離まで接近したらスラスタ噴射を停止して慣性運動により子機に接触、そのままドッキングするというものです。

本機構の開発に当たっては、上記のシーケンスを実現するため、以下の要求を設定しました。

1. 十分な位置・姿勢誤差を許容できること
2. 接触時にお互いを突き飛ばすことなくドッキングできること
3. ドッキングを完了後は、いつも同じ位置・姿勢で子機が固定され、外力によって固定が解除されないこと

4. ドッキングの解除、再ドッキングが可能であること
5. ドッキング時以外に勝手に動作しないこと
6. 宇宙空間で使用可能な材料を使用すること

まず要求1については、完全自律での接近であることや、探査機に搭載できる推進系、センサ系の制約から、親機と子機が少しずれて接触することが考えられ、そのずれを許容してドッキングする必要があります。要求2はドッキングの際に親機と子機の接触が生じますが、その接触力によってドッキング前に互いが弾かれて離れてしまうリスクがあります。したがって、接触力を抑えるか、接触力で離れる前にドッキングを行う必要があります。要求3はドッキング完了後にサンプルの受け渡しを行う必要がありますから、受け渡し機構（ここではロボットアームのようなもので受け渡すことを想定しています）がサンプルに確実にアクセスできる位置・姿勢に固定されていないといけません。また、ドッキング中に軌道変換などで加速度がかかることがありますから、その慣性力で固定が解除されてもいけません。要求4については、子機がサンプルを親機に受け渡した後、再びサンプリングに向かうための要求です。要求5、6については宇宙用機器としての要求となります。

スペースデブリ捕獲機構から生まれたドッキング機構のコンセプト

上記の要求を満たしうる機構として、私たちはスペースデブリ捕獲用として開発していた爪型ハンド機構に着目しました。この機構の基本原理解は図2のようになっており、スペースデブリ上の棒状の構造（図では紙面奥行き方向に延びていて断面が記載されています）を把持する目的で考案されました。図中の各リンクは青いリンクの下側の関節を除いて自由回転する関節で接続されています。赤いリンク（接触検知リンクと呼んでいます）は左右のリンクが関節でつながっており、180°（左右のリンクが直線状態）から0°（下に凸の形状に折れ曲がった状態）まで稼働します。この左右をつなぐ中心の関節の少し下にはばねが取り付けられています（図2①の右側模式図参照）。このばねは2つの接触検知リンクがまっすぐの状態（図2①）のときはリンクを広げる向きにトルクを発生していますが、関節が曲がりばねが関節よりも上になると（図2③）、より関節を曲げる向きにトルクの方向が変わる仕掛けになっています。この性質を利用して、図2①では爪が開いた状態が維持され、把持対象が接触検知リンクに触れるとその接触力でリンクが押されてばね力が爪を閉じる方向のトルクを発生し、ただちに爪が把持対象を囲い込んで逃げられないようにします（図2④）。このとき、黄色と緑のリンクが自由に動くことによって把持対

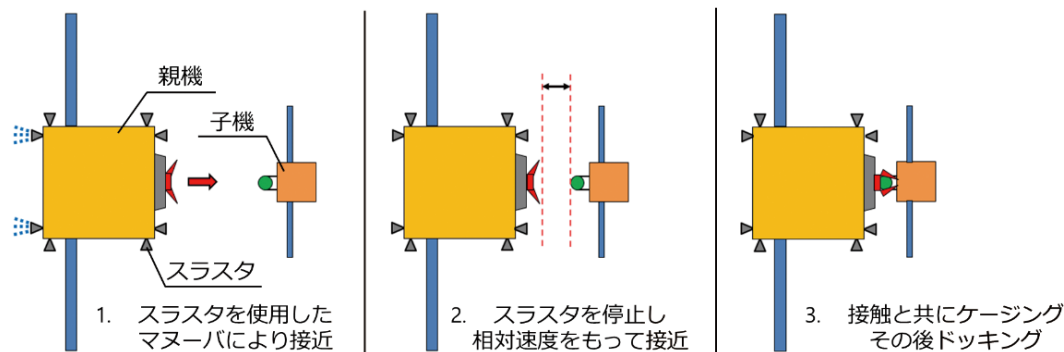


図1：想定する探査機のドッキングシーケンス

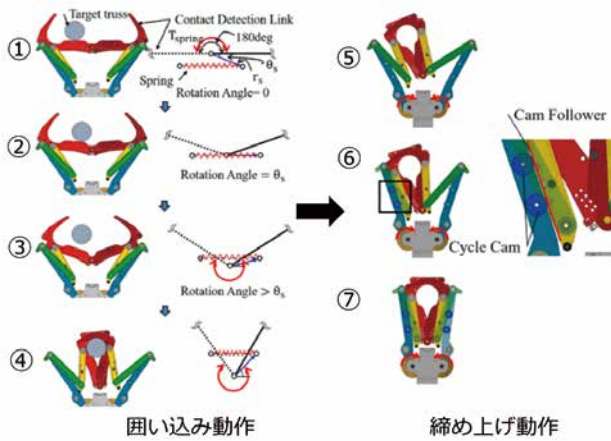


図2：ドッキング機構の動作原理

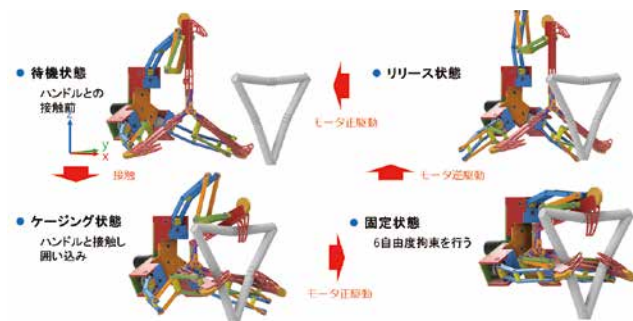
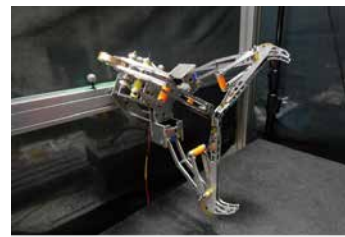


図4：ドッキング機構の動作

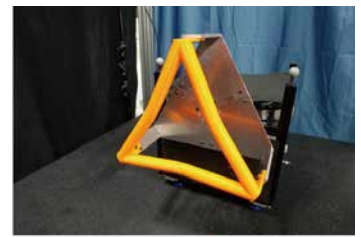
象の相対位置に合わせて爪が移動します。これによって、広い範囲で把持を可能とし(要求1) 接触による突き飛ばしを防ぐ(要求2) ことができます。しかしこの状態では、把持対象は把持機構から離脱することはありませんが、固定はされていません。そこで、次に図2の青いリンクの根元関節をモータによって回転し把持対象を囲っている爪を把持対象ごと中心部に移動させ固定します(図2⑤～⑦)。モータと関節の間にはウォームギアというバックドライブしにくい歯車が入っており、把持対象側からの外力によって爪が押し広げられないようになっています(要求3)。固定した状態からモータを逆回転させて青いリンクを開くことにより、爪も開き、ドッキングの解除と、図2①の状態へと戻ることが可能です(要求4)。また、詳しく説明すると長くなるのでここでは省略しますが、各リンクの重心の位置をうまく調整することにより、図2①の状態では大きな加速度が作用してもリンク自身の慣性力によって勝手に爪が閉じることはありません(要求5)。さらに、これらの機構は全て金属材料で実現可能ですので、宇宙空間でも使用可能です(要求6)。

ドッキング機構の設計

上記の機構により要求はクリアできそうです。しかしまだ問題はいくつかあります。この機構はもともと棒をつかむための物であり、固定も摩擦が期待できないとすると、棒の軸方向の移動と軸周りの回転は固定できません。したがってそれらも固定可能な形状に拡張する必要があります。私たちは、これを実現するドッキング機構をいくつか検討しています。ここでは、その中の1つである三つ爪型ドッキング機構を図3に示します。これは爪を等角度で3つ配置した構成で、子機側に取り付けた三角形のハンドルを把持します。こうすることで、3次元の並



親機側爪機構



子機側ハンドル機構

質量：2.1[kg]
収納時サイズ：210 × 187 × 307[mm]

質量：0.6[kg]
サイズ：266 × 230 × 143[mm]

図3：試作した三つ爪型ドッキング機構

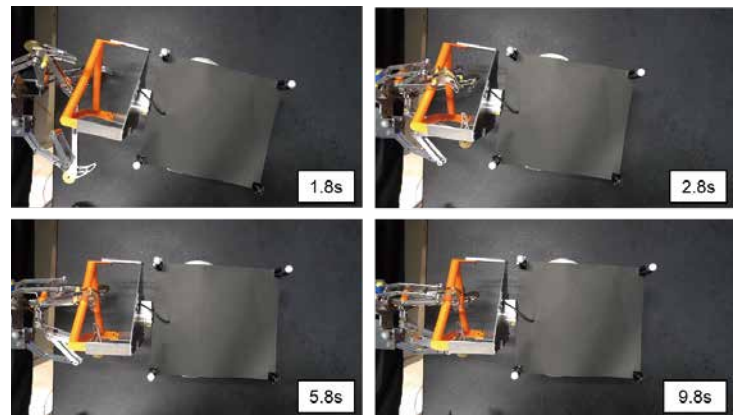


図5：空気浮上装置によるドッキング実験の様子

進・回転方向全てを確実に拘束できるようになります。この構成でのドッキングの流れは図4に示します。基本的に図2と同様のシーケンスとなっていますが、3つの爪がそれぞれ別のハンドルに掛かるという点が異なります。3つの爪から中央部に向かってそれぞれ接触検知リンクが伸びており、中央部の紫のリンクにそれぞれ連結しています。この連結している関節に図2と同様にそれぞればねが搭載され、接触から素早く囲い込みに移行する動作を実現しています。図5に空気浮上装置で二次元的に宇宙空間での運動を模擬したドッキング実験の様子を示します。これは、機構が完全に正対した状態から約10cm、10°ずれた状態で子機が接触したケースですが、接触後にただちに囲い込みが成立し、その後固定状態にすることができています。また、これらの機能を軽量・コンパクトに実現するという点においては、今回紹介した試作機はまだ打上げ環境に耐える仕様とはなっていませんが、図3に示す寸法、重量となっています。最終的には、寸法はそのまま、重量は10kg未満とすることが目標です。これは想定している探査機と同程度のサイズで過去に地球近傍にてドッキングを行った無人宇宙機の機構と比べて、寸法は2/3、重量は1/3程度になります。

おわりに

本記事では、東京科学大学とJAXAで共同開発中の次世代サンプルリターン探査機向けのドッキング機構について紹介しました。現状では、大きくずれた子機とも確実にドッキングできる性能を確立できましたが、解放する際に子機の姿勢が乱れる問題や、宇宙空間に長く置かれた場合の耐久性、もっと軽量・コンパクトにできないかといった課題があり、それらを解決できる新しい機構を検討しています。この機構が深宇宙で活躍する日を楽しみにしていきましょう。

Comet Interceptor(長周期彗星探査計画)の試験継続中

欧州宇宙機関(ESA)と共同で実施しているComet Interceptorの、JAXAが開発する子機B1について、ISASニュース2025年1月号*の宇宙科学最前線ではフライバイ観測における航法誘導制御、ISAS事情では探査機システムの開発モデルの状況をお伝えしていましたが、その続報として観測機器の開発状況報告です。

子機B1には3種類の観測機器が搭載されています。具体的には可視光カメラとして望遠カメラ(NAC:Narrow Angle Camera)と広角カメラ(WAC:Wide Angle Camera)、プラズマ観測パッケージ(PS:Plasma Suite)としてイオン質量分析器(CIMS:Cometary Ion Mass Spectrometer)と磁力計(MAG:MAGnetometer)、そして水素イメージャ(HI:Hydrogen Imager)です。それぞれの観測機器ではエンジニアリングモデル(EM)という、フライトモデル(実際に宇宙空間で使用するもの)を作る前の電気・機械設計の検証モデルが完成しており、6月から開始するシステムとの統合試

験に向けて単体での性能試験や環境試験を実施していました。これらのうち、PSのCIMSとHIについてはそれぞれ東京大学の笠原慧准教授、吉岡 和夫准教授に主導いただき、PSのMAGについては京都大学の松岡 彩子教授に協力いただきながら、JAXAインハウスによる開発をしています。先日、PSチームがCIMSのEMの熱真空試験をISAS熱グループの所有する設備で、HIチームがEMの振動試験をISAS大学共同利用実験調整グループの所有する設備で実施したため、所内の関係者や現場研修中のJAXA新入職員に見てもらう機会を設けました。それぞれの試験検証は無事に完了し、達成感や安堵感からいろいろな意味でホッとしたところです。

近年は衛星・探査機システムのみならず、搭載機器であってもメーカーの試験設備で環境試験を実施することが増え、ISASの試験設備を利用することは減ってきています。藤本所長の狙う「世界最先端の要素を含む内製比率の高い小型プロジェクトを

早いサイクルで回す」ためにも、チーム内の研究者・技術者のさらなる筋力アップやチーム外のメンバーの協力や理解、ISAS試験設備の存在は欠かせません。第一目標は当然プロジェクトの成功ですが、所の狙いも踏まえて関係者一丸となって進めていきますので、引き続き応援よろしくお願いたします。

(Comet Interceptor 所内プロジェクト
副チーム長/伊藤 大智)



EM試験見学時の風景(左:PSの熱真空試験完了後、右:HIの振動試験準備中)

*https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews526.pdf

小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSの運用終了と技術継承

2025年5月15日にIKAROSに停波コマンドを送信し、15年間の運用を終了しました(表紙参照)。

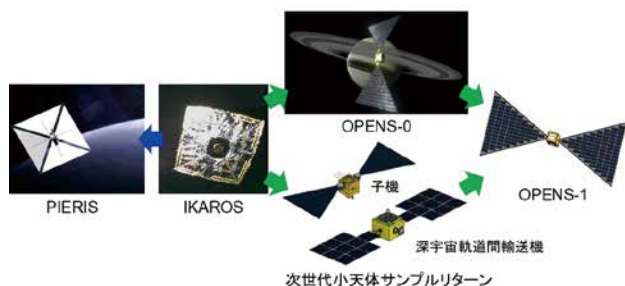
IKAROSは2010年5月21日に打ち上げられ、ソーラーセイルおよびソーラー電力セイルの実証に世界で初めて成功しました。2011年12月には推奨がほぼ枯渇し、姿勢制御できなくなった結果、冬眠モード(シャットダウン状態)と冬眠明けを繰り返すようになりました。冬眠明けにIKAROSの電波を受信するには軌道・姿勢を正確に予想することが必要です。しかし、ソーラーセイルは膜に太陽光を受けると加速すると同時に姿勢が変化します。さらに、姿勢が変化すると膜形状も変化します。そこで、ソーラーセイルの膜形状と姿勢の関係をモデル化して、冬眠モード期間中の軌道・姿勢運動を予想し、冬眠明けのIKAROSを探索しました。

その結果、4回目の冬眠明けまでIKAROSの電波を受信することに成功し、ソーラーセイルの長期間の運動を高精度に予測できるようになりました。しかし、5回目の冬眠モード移行後は、長らくIKAROSの電波を受信できていなかったため、運用を終了することになった次第です。

IKAROSはソーラー電力セイルを用いてイオンエンジンを駆動し外惑星領域探査を実現するためのプリカーサミッションという位置づけで実施しました。この本番ミッションに対応する計画としてOPENS-1を現在検討中ですが、その前にOPENS-0によってソーラー電力セイルを用いた土星フライバイ探査を目指しています。また、次世代小天体サンプルリターンミッションで深宇宙軌道間輸送機に搭載する子機にもソーラー電力セイルを適用予定です。一方、ソーラーセイル技術に関しては、超小型ソーラーセイルPIERISにて姿勢・軌道統合制御実証を実施する予定であり、OPENSシリーズや次世代小天体サンプルリターンでも太陽光圧トルクを活用した姿勢制御を検討しています。

長い間IKAROS計画を実施できたのは、皆様からの応援があったからこそです。IKAROSの運用は終了しましたが、その先に見据えたプログラムはこれからが本番です。これらに向け技術を継承・発展させることが、皆様の応援に報いることだと考えています。これまで誠にありがとうございました。そして、今後ともよろしくお願いたします。

(森 治)



IKAROSの技術継承

公募型小型ミッション候補 そろい踏み

第2回

3回シリーズでお届けする、公募型小型ミッション候補の紹介。第2回は技術面でのチャレンジ、アピールポイントを語っていただきます。

HiZ-GUNDAMが誇る最強タッグ： 軟X線大望遠鏡とアサーマル設計の冷却近赤外望遠鏡の挑戦

HiZ-GUNDAMは、ガンマ線バースト(GRB)の観測を通して極限時空や初期宇宙を探索するプロジェクトです。この衛星に搭載される観測装置は2つあり、その1つは軟X線帯で広視野を高感度で観測できるEAGLEです。EAGLEではいつどこで起きるかわからないGRBからの微弱なX線放射を検出するため、X線を集光するロブスターアイ光学系(LEO)を100枚以上並べることで広視野と高感度を兼ね備えた観測を実現します。各LEOの個体差を把握した上で0.01度の精度で配置を調整する技術を新たに開発し、軟X線の“大望遠鏡”を作りあげます。またこの望遠鏡の焦点面に大面積のシリコンピクセル検出器であるpnCCDを配置する予定です。微弱な軟X線信号を検出するためにラジエータを用いた冷却機構を開発し

て熱雑音を抑え、低ノイズの検出システムを目指します。

もう1つの観測装置は可視光・近赤外線望遠鏡MONSTERです。EAGLEが発見したGRBをMONSTERで追観測し、その距離(赤方偏移)を測定します。そのためにMONSTERは、ケスタープリズムと呼ばれる特殊な装置で光を波長(色)ごとに分割し、GRBを5色で同時撮像します。これにより、発見からどんどん暗くなっていくGRBを短時間で観測できます。また、赤外線が高感度な観測を実現するために望遠鏡を -100°C 以下に冷却しますが、それによる熱収縮でも焦点がずれない「アサーマル設計」を採用します。これらの技術の採用により、MONSTERはよりシンプルで信頼性の高い宇宙望遠鏡となります。(金沢大学/有元誠、東京都市大学/津村耕司)

理学と工学の連携で挑む高精度編隊飛行の実現 — SILVIAが拓く宇宙観測の新機軸

SILVIAは、軌道上での高精度編隊飛行技術の実証を目指す工学実証ミッションです。複数の宇宙機が互いの相対位置を高精度に維持しながら飛行する「高精度編隊飛行」は、軌道上で大規模な宇宙観測システムを構築するための革新的技術です。複数の衛星が一体となってひとつの巨大な望遠鏡のように機能することで、既存の地上重力波望遠鏡では観測できない低周波帯の重力波の観測や、単一の天文衛星では達成できない高解像度・高感度での赤外線観測を実現する、天文学の新機軸として期待されています。

このような観測には、衛星(に搭載された機器)間の相対位置を光の波長スケール、すなわちマイクロメートル以下の精度で制御する編隊飛行技術が不可欠です。そのためには、精密推進、衛星

間通信、宇宙干渉計による測距といった先進的な要素技術に加え、センチメートル級の粗い制御からマイクロメートル以下の精密制御への段階的な遷移や衛星間の衝突回避などの自律的な運用機能の実現が必要です。これはまさに、宇宙機システムとしての複合的な技術への挑戦です。

このチャレンジを乗り越えるには、衛星間の精密測距を可能とする理学(機器)と、それによる編隊飛行を実現する工学(衛星バス)の密接な連携が不可欠です。SILVIAは、理工連携を中核に据えた学際的な取り組みを通じて高精度編隊飛行技術を実証し、衛星編隊飛行による次世代の宇宙観測の可能性を切り拓く、先進的かつ挑戦的なプロジェクトになっています。(岩城 拓弥)

要素開発を組み合わせ高感度・高分解能を目指すLAPYUTA

われわれは、紫外線宇宙望遠鏡として過去に惑星分光観測衛星「ひさき」を開発しましたが、次世代ミッションであるLAPYUTAでは同じ小型科学衛星規模でありながら感度、空間分解能、波長分解能でそれぞれ「ひさき」の100倍以上もの向上を目指します。高感度化には微細加工技術で新たな表面形状を実現した紫外線検出器のほか、新たな成膜プロセスによるUV増反射コーティング、対象波長に最適化した回折格子など、各素子の効率を1%でも向上させるべく要素開発をそれぞれ進めています(写真)。0.1秒角という高い目標空間分解能の達成には衛星の姿勢擾乱をいかに除去するかがカギですが、観測装置内に可視光モニタカメラを設置し、紫外線観測と同時に対象天体やガイド星のブレを高速撮像することで擾乱を補正する方法を

新たに考案し、その実証実験を進めています。また解像度・撮像速度の向上が顕著な可視光用CMOSイメージセンサを検出器の画像読み出し部に採用し、高空間分解能観測を実現します。さらに $\lambda/\Delta\lambda$ (λ は波長)が約40,000($\Delta\lambda=0.003\text{ nm}$)という高波長分解能を達成するため、2種の回折格子を組み合わせたエシエル型分光器の開発を進めています。これらの紫外線観測技術は世界的にも重要で、LAPYUTAだけでなく次世代旗艦宇宙望遠鏡Habitable Worlds Observatoryへも展開すべく精力的に開発を進めています。(村上 豪)



写真：LAPYUTAで要素開発を進めている試作の例



MMXはフォボスを目指す!



MMXのミッション機器とリモートセンシング観測

MMXは、これまでの連載で解説した科学目標の達成や探査技術の獲得のために、13種類のミッション機器を搭載します。第3回は、MMXに搭載するミッション機器の種類と、それらを使って軌道上から行うリモートセンシング観測について解説します。

MMXのミッション機器

MMXには、科学目標を実現するための科学ミッション機器を11種類、探査技術獲得のための装置を2種類搭載します。科学ミッション機器はさらに、火星圏での観測のための8つの機器と、サンプル採取のための3つの機器に分類できます。それぞれを表1にまとめました。各ミッション機器は大小ありますが、いずれも比較的大型のものです。これが13機器も搭載されるのは、国内の惑星探査では2007年に打ち上げた月周回衛星Kaguya以来の規模で、MMXが如何に大型の探査機であるかがわかります。

ミッション機器の多くは、これまでの日本の機器開発のヘリテージを活かして、国内の様々な研究者とメーカー、JAXAが中心になり開発する機器となっています。一方で、表中の青字の4つの機器は、アメリカ、フランス、ドイツの各宇宙機関(NASA、CNES、DLR)とJAXAとの国際協力のもと、各国で選定された機関が開発を担当して日本に提供しています。このように、世界の第一線のミッション機器によって探査機を構成するため、従来の惑星探査より大幅に拡張した国際協力を進めていることがMMXの特色の1つです。

これらのミッション機器のフライトモデルは、一部を除き、現在までに探査機本体のもとに輸送され、組み付けられました。各機器の探査機上の配置を図1に示します。MMX探査機は往路・探査・復路の3つのモジュールで構成しますが、ミッション機器はそのうちの探査モジュールと復路モジュールに搭載して、火星圏での観測やサンプル採取を行います。

擬周回軌道からのリモートセンシング観測

MMXは火星圏に到着後、Phobosの擬周回軌道(QSO)に投入されます。これはPhobosとランデブーしながら一緒に火星の周りを周回するような軌道で、Phobos固定座標系で見ると、探査機はPhobosの赤道上をぐるっと周回するように動きます。そのため、この軌道上からPhobosの極域を除く全域を視野に収めることができます。MMXはこの軌道上で、Phobosの昼側を周回中は、多くのミッション機器が配置されている探査機-Z面をPhobosに向けて観測を行い、夜側では地球と通信する姿勢をとることが基本です。その後、MMXは時期によって軌道高度を変更しつつもQSOを維持して観測を続けますが、一時的に3D-QSOと呼ぶ極域をカバーする軌道や、Deimosフライバイ観測のための軌道をとることも検討されています。

MMXは、約3年間の火星圏滞在のちょうど中間の時期に、サンプル採取のためのPhobos着陸を計画しています。軌道上からのリモートセンシング観測は、その前と後で主な目的が変わります。前半では、着陸の準備と着陸地点の選定を急ピッチで進める必要があります。OROCHI、TENGOO、MIRS、MEGANE、LIDARを使って、まずPhobos全体のグローバルマッピングと詳細な形状モデルを作成するための地形観測を行います。その後徐々に高度を下げ、着陸候補となる複数の地点の、より高解像度の観測を行なっていき、最終的に着陸地点を決定します。滞後半では、それまでに発見されたPhobos上の科学的に興味深い地域などをピックアップして観測するとともに、火星(特に大気の様子)、Deimosの観測も重点的に行う予定です。この全期間、CMDM、MSAIは絶えずダスト・イオン環境の計測を定常的に続けます。

MMXでは、従来の探査ミッションと比較して、より早期に観測計画を詳細化した上で、それらの要求に基づいて機器の仕様や地上試験の計画を決定する「運用ファースト」の進め方を意識的に取り入れてきました。上記の火星圏滞在前半の観測計画は、既にほぼデイリー単位のカレンダー上で計画化しており、またその他の全期間についても今年度に同様の精度で計画を決定する予定です。

小川 和律 (おがわ かずのり)

略 称	機器名	用 途	主な開発担当
遠隔観測・地表観測のための装置			
E LIDAR	レーザ高度計	リモセン(高度)	千葉工業大学, NEC, 他
E MEGANE	ガンマ線・中性子線分光計	リモセン(元素)	NASA, JHU-APL
E MIRS	近赤外線分光装置	リモセン(鉱物)	CNES, LIRA
E OROCHI	広角分光カメラ	リモセン(広域地形や鉱物)	立教大学, 明星電気, 他
R TENGOO	望遠カメラ	リモセン(詳細地形など)	立教大学, 明星電気, 他
R CMDM	火星周回ダストモニタ	環境計測(ダスト)	千葉工業大学, 明星電気, 他
E MSA	イオンエネルギー質量分析器	環境計測(イオン)	大阪大学, 明星電気, 他
E ROVER	ローバ(小型移動車両) ^(*)	着陸その場	CNES/DLR
土壌サンプル採取のための装置			
E/R CSMP	サンプリング装置	サンプル採取	JAXA, KHI, 他
E PSMP	ニューマチック採取機構	サンプル採取	NASA, Honeybee Robotics
R SRC	サンプルリターンカプセル	地球リエントリー	JAXA, KHI, 他
探査技術の獲得を目的とした装置			
R SHV	スーパーハイビジョンカメラ	リモセン(広報画像)	NHK, 明星電気, 他
R IREM	惑星空間放射線環境モニタ	環境計測(放射線)	JAXA, 明星電気, 他

E: Exploration Module (探査モジュール) 搭載機器, R: Return Module (復路モジュール) 搭載機器
 (*1) ナビゲーションカメラ, 車輪カメラ, ラマン分光計, 輻射温度計を持つ

表1: MMXに搭載するミッション機器

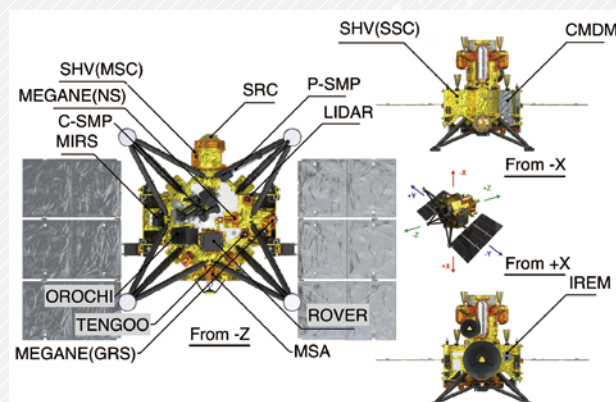


図1: MMXミッション機器の搭載位置

プラネタリーディフェンス、東へ西へ

JAXAプラネタリーディフェンsteam長

吉川 真 (よしかわ まこと)

小惑星や彗星のような天体の地球衝突を扱う活動をプラネタリーディフェンス(スペースガード)と呼びます。1990年代から本格的に動き出したのですが、現在は30年前とは比較にならないくらいその活動が国際的に活発になっています。そのような状況の中、今年の4月初めには東アジアの日本で、そして5月初めには場所を南半球のアフリカ大陸南端の南アフリカへと移して、プラネタリーディフェンスに関連した2つの大きな国際会合が開催されました。

4月初めの会合は「Hera・Apophis T-4・RAMSES Workshop」で、東京大学本郷キャンパスの理学部小柴ホールで4月7日～11日に行われました(写真1)。これはプラネタリーディフェンスに関係した3つの会合が連続的に行われたものです。テーマは、ESAのHeraミッション、小惑星アポフィス、そしてESAのRAMSESミッションでした。5月初めの会合は、Planetary Defense Conference (PDC) というもので、5月5日～9日にケープタウン近郊のステレンボッシュにあるホテルで行われました(写真2)。PDCは2年に一度開催される国際会議で、観測、ミッション、軌道解析、災害回避、国際協力など、プラネタリーディフェンスについて網羅的に議論が行われます。これら両方とも世界中から研究者が集まってきており、対面での参加者は200名規模、オンライン参加者も加えるとさらに多くの参加者がありました。

では、これらの会合でどのようなことが議論されたのでしょうか。天体の地球衝突など「杞憂」だと言われたことがありますが、今は全く違います。現在、地球接近天体(NEO: Near Earth Object)の発見個数は4万個にも迫ってきましたし、天体の地球衝突回避については、机上の理論だけでなく実験も行われています。そして、天体の地球衝突に備えて国際協力の議論も行われています。今回の2つの会合では、これらの話題はもちろんのこと、その他様々な事項について議論が行われました。

特に話題になったこととして、地球衝突の可能性が指摘された2024 YR4とアポフィスという2つの小惑星が挙げられます。2024 YR4は昨年末に発見され、今年1月に2032年の地球衝突の可能性が指摘されました。約1ヶ月後の2月に地球衝突の可能性は否定されましたが、これは国連の元で組織的にプラネタリーディフェンスの活動が開始されてから初めての実例となりました。JAXAでも、この小惑星に対して、国立天文台に観測依頼をしたり、軌道解析や「はやぶさ2」で対応できるかの検討を行いました。その結果についてこれらの会合で発表しました。

アポフィスは、2004年の発見時に2029年の地球衝突の可能性が指摘されました。こちらは、発見されたあと数日後には過去にも撮影されていたことが分かり、地球に衝突しない



写真1: Hera・Apophis T-4・RAMSES Workshopにおける集合写真(東京大学理学部小柴ホール前にて、主催者撮影)



写真2: Planetary Defense Conference (PDC) における集合写真(Protea Hotel by Marriott® Stellenbosch & Conference Centreにて、主催者撮影)

ことが判明しました。ただし、2029年4月13日(の金曜日!)に地球に約32,000kmまで接近します。その大きさは340mと推定されており、このサイズの天体がこのようなところまで接近するのは観測史上初めてです。そのために、接近時に地球の潮汐力でどのような変化が起こるかが注目されており、NASAは小惑星サンプルリターンを行ったOSIRIS-RExをミッション延長してアポフィスに送る運用を行っています。ESAはRAMSESという探査機をアポフィスが地球に接近する前にランデブーさせるミッションを計画中で、JAXAもこのミッションに参加することを検討しています。

この他の今後の注目点としては、ESAのHeraミッションやNASAのNEO Surveyorミッションがあります。Heraは米国のDARTミッションで小惑星衝突実験を行ったディモルフォス(小惑星ディディモスの衛星)に2026年末に到着予定です。NEO Surveyorは、2027年打上げ予定で、太陽-地球系のラグランジュ点L1(地球から見て太陽方向に約150万kmの地点)から小惑星を観測するミッションです。

このように、プラネタリーディフェンスの議論が非常に盛り上がっていますが、2029年は国連が国際年として「International Year of Asteroid Awareness and Planetary Defense」を制定しました。プラネタリーディフェンスは、単に天体の地球衝突の脅威ということだけではなく、地球に接近してくる天体をきちんと把握することは、それらが地球に衝突する場合には防災ですが、資源などの利用や惑星科学にも繋がります。プラネタリーディフェンスの活動を未来の人類への贈り物としたいですね。

宇宙・夢・人

Space Human Dream

》超小型宇宙機を深宇宙へ、そして賢く

超小型宇宙機で深宇宙へ、行きたいところへ

——どのようなテーマに取り組んでいるのでしょうか？

大学時代から超小型宇宙機の研究開発に携わっています。学科を決める2年生の夏前に、テレビで火星探査ローバーの特集番組を見たことがきっかけでした。地球から離れた天体にロボットを送り、遠隔操作で探査するというのが、とても面白そうで、自分もやってみたいと思ったのです。

——研究室では、どのような超小型宇宙機を開発したのですか？

当時から、地球周回低軌道の超小型衛星は、さまざまな大学で開発されていました。私が配属された研究室では、その先、つまり深宇宙を目指すことにしました。それが、宇宙研と共同で開発したPROCYON(プロキオン)です。次のEQUULEUS(エクレウス)では、地球や月、太陽といった天体の重力をうまく利用しながら超小型宇宙機で行きたいところに行くことを目指しました。打上げの翌日には、月フライバイに必要な非常に難しい軌道制御を行わなければなりません。タイムリミットが短く、もし失敗すれば、EQUULEUSは月を通り過ぎて遠くへ飛んでいってしまいます。とても緊張したことを覚えています。その軌道制御に成功し、EQUULEUSが月フライバイ中に撮影した月の裏側の写真を管制室で受け取ったときは、ものすごく感動しました。

長周期彗星を待ち構え、親機と子機で観測

——現在はどういうことに取り組まれていますか？

ESAが主導するComet Interceptor(コメット・インターセプター)という彗星探査ミッションに参加しています。親機と2機の子機で構成され、長周期彗星の近くを通過しながら観測するフライバイ探査を行うものです。子機の1つをJAXAが開発します。長周期彗星は、太陽からの熱の影響をほとんど受けていないため、それを観測することで太陽系が誕生したころの状態を知る手がかりが得られます。ただし長周期彗星は、いつ、どのようなものが接近してくるか分かりません。

そのためComet Interceptorは、打上げ後にまず太陽-地球系のラグランジュ点に向かい、そこで待機します。そして、地上からの観測で長周期彗星が発見され、探査対象に適していると判断されると、その彗星へ向かいます。探査機は普通、打上げ前に探査する天体が決まっていますが、打上げ後に決めるというコンセプトが新しく、面白いなと思っています。

——超小型宇宙機を子機として使うことの利点は？

超小型宇宙機は、独力で探査天体まで飛行してミッションを行う

学際科学研究系 准教授

中島 晋太郎 (なかじま しんたろう)

1991年、群馬県出身。東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士(工学)。東京大学大学院工学系研究科特任研究員を経て、2020年よりJAXA宇宙科学研究所テニュアトラック特任助教、2025年より現職。



ことも可能です。しかし、小さいため、搭載できる観測機器の重量・サイズには限界があります。輸送を親機に任せることで、同じ観測機器を搭載しても探査機全体を小さく・軽くしたり、同じ大きさ・重さの探査機により多くの観測機器を搭載できたりします。今の超小型宇宙機には寿命が短いという課題がありますが、輸送中は休眠させることで、寿命を延ばす効果も期待できます。

また、子機を親機から切り離して異なる方向から観測することで、より高度な探査も実現できます。さらに、子機であれば、彗星により接近して観測するといったリスクの高い探査にも挑戦しやすくなります。

宇宙機を賢くしたい

——今後、取り組みたいことを教えてください。

宇宙機をもっと賢くしたい。宇宙機の自律化は昔から目指されていますが、まだあまり広がっていません。予測できない振る舞いを勝手にさせては困る、というのが大きな理由だと考えています。そのため、現在の宇宙機で多く採用されているのは、If-thenベースの自律機能です。「この状態の場合はこう振る舞う」と、想定されるすべての状態に対する振る舞いを事前に定めておくというものです。

私は、宇宙機をもっと賢くして、自分で考えて振る舞えるようにしたいのです。もちろん、宇宙機の判断が信頼できるものでなければなりません。そこで注目しているのが、モデルベースの自律機能です。宇宙機的设计情報に基づいたモデルをつくり、宇宙機自身がそのモデルを使って最適な振る舞いを探索し、実行するというものです。If-thenベースでは対応できない未知の状況にも、柔軟に対応できます。「〇〇の観測をして」と目的を設定したら、姿勢を変え、必要な観測機器の電源を入れ、テストをして、観測する、といった一連の操作をすべて自律的にやってくれる。そんな宇宙機が理想です。

——趣味は？

サッカー観戦です。サッカーでは、アップセット、つまり弱いと見られていたチームが強豪に勝つことが比較的多く起こります。スタジアムの雰囲気など、数値では表せない要素が試合に影響を与えても言われています。そういうところも、サッカーの面白さだと思っています。

宇宙ミッションにも、それと似たところがあると感じています。チームの雰囲気がよく、みんながモチベーション高く、楽しく取り組んでいると、そのミッションはうまくいくように思うのです。Comet Interceptorのチームも、2029年の打上げを目指し、いい雰囲気ができてきていると感じています。

編集後記

IKAROSの停波から準備中の公募小型3ミッション、MMX、次世代の深宇宙探査のドッキング機構まで、テクノロジーの来し方行く末が熱く語られた今号となりました。例年に増して暑い日が続きますが、読者の皆様におかれましてはくれぐれもご自愛ください。

(石川 毅彦)



ISASニュース No.532 2025年7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/JAXA 宇宙科学研究所長 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/株式会社トリッド
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 isasnews@isas.jaxa.jp

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