

日本の科学衛星3機による金星観測キャンペーン (想像図)

水星磁気圏探査機「みお」の金星フライバイ時に実施計画中の、金星探査機「あかつき」と惑星観測用宇宙望遠鏡「ひさき」による金星観測キャンペーンの想像図。金星(左上)の近傍に「みお」と「あかつき」2機の探査機が飛翔し、地球軌道上からは「ひさき」が観測します。日本の科学衛星3機による惑星同時観測は、地球以外では日本の宇宙科学史上初の試みです(p.6参照)。



The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

月惑星表面への着陸ダイナミクス

宇宙機応用工学研究系 准教授 大槻 真嗣(おおつき まさつぐ)

月惑星への着陸探査機

1966年、旧ソビエトのLuna 9により人類が初めて月軟着陸を果たして以来、今日までに110機の月惑星着陸探査機が打ち上げられている。Luna 9では、月面直前で減速のための逆噴射後、エアバッグに包まれた着陸機を分離投下し、世界で初めて観測機器の月惑星表面への軟着陸を成功させている。その後、旧ソビエトが1976年にLuna 24で月面からのサンプルリターンを成功させるまで、米国と合わせて計44機の月着陸機が打ち上げられた。それ以降、探査活動は静まっていたが、近年はイスラエルの民間企業や中国、インドが月着陸を試み、また、米国や日本の民間企業もそれに続いて着陸機を送り込むことを計画しており、月への着陸探査が再び活発化している。

日本では、2021年打上げ予定の米国SLS (Space Launch System) 搭載のOMOTENASHI (Outstanding Moon exploration Technologies demonstrated by Nano Semi-Hard Impactor) ならびに2022年度打上げ予定のSLIM (Smart Lander for Investigating Moon) による月面着陸探査ミッションが計画されている。また、2024年の打上げを目指し、火星衛星探査計画MMX (Martian Moons eXploration) が、火星の月であるフォボスへの着陸に向けて進行中である。

これまでの探査機の着陸成功率は約42%で、失敗の中で着

陸シーケンス時に発生した異常は20件程度となる。Luna 8では、エアバッグが破れスピニングが発生し、その遠心力により燃料が排出できずに減速不足で失敗に至っている。また、彗星への着陸を目指したPhilaeは、二回バウンドし、目標地点から大きくはずれたため、必要な電力を確保できず、計画されたミッションを行うことができなかった。このPhilaeの着陸において、約50Jの運動エネルギーを持って彗星表面に接触し、着陸装置内部の減衰および表面との摩擦により90%以上のエネルギー散逸をした。しかし、アンカーがうまく機能せず、10%のエネルギーが残り、表面をバウンドし、大きな水平移動と共に転倒が起きている。

これらの失敗例からわかるように、保護しなくてはならない探査機部位への着陸時の衝撃(加速度)を緩和し、着陸時に探査機が持つ運動エネルギーを減少させることが、安全な着陸を実現すると考えられる。このような着陸時の探査機の挙動を「着陸ダイナミクス」と呼び、様々な条件下での月惑星表面環境との相互作用でどのような挙動が発現するのかを予測し制御することが、この分野の核となる技術であり、本稿ではその一端に触れる。

図1に探査機着陸時の運動エネルギーと天体への衝突加速度の相関を示す。図1の中ほどにあるグループでは、着陸時の衝撃や転倒から探査機を保護し、高度なミッションを実現す

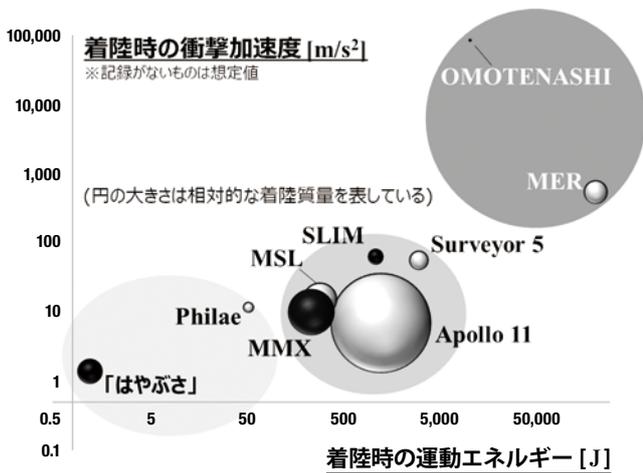


図1 着陸時の惑星探査機の運動エネルギーと天体への衝突加速度の相関

るために、逆噴射ロケットエンジンと着陸脚を併用している。NASAの火星表面探査ミッションで用いられたSkycrane方式を除き、表層近くでは逆噴射を避け、惑星表層物質レゴリスの舞い上がりを抑えて自由落下を行うフェーズが最後に設けられ、衝撃吸収材を用いて着陸時の運動エネルギーを散逸させている。同じグループに位置するSLIMは、同様に3Dプリンタで製造した衝撃吸収材を着陸パッドに搭載して運動エネルギーを散逸させるだけでなく、高度な姿勢制御により最終的な姿勢で接地脚間距離を大きくとり転倒を抑制する手法を採用している。また、MMXIは、微小重力の天体を探査するにも関わらず、着陸質量が大きいため、高重力惑星の探査に匹敵する意外と大きな運動エネルギーを着陸時に吸収または散逸させる必要があることが図1からわかる。

一方、右上のグループに位置する火星探査ローバ(MER)ミッションでは、パラシュートで大気減速や逆噴射による減速の後、着陸時にエアバッグを用いている。MERは高精度なピンポイント着陸を捨てる代わりに、安全かつ軽量な装置で着陸を試みた例であり、同方式の着陸装置を用いた3つのミッションはいずれも成功している。MERに匹敵する運動エネルギーと大きな衝撃を持って月面に到達するOMOTENASHIは、総質量14kgの探査機で、月面へ1kg程度の観測装置を適度に軟着

陸させるという野心的なミッションである。エアバッグと3Dプリンタで製造した衝撃吸収材の両方を利用し、さらに樹脂で充填された耐衝撃構造を着陸機に搭載し、成功に向け開発が進められている。

着陸ダイナミクス(転倒の抑制)

安全な着陸の基本は、探査機を破壊しない、機能を低下させないことである。一般的な着陸脚を持った探査機では減速後の転倒を抑制することが重要である。その際、降りる天体の重力加速度、着陸時の速度方向と大きさ、探査機自体の倒れにくさに加えて、探査機と未知の惑星表面との相互作用で決まる探査機の挙動の推定がその鍵を握る。

低重心で着陸脚の間を広げるほど倒れにくくなるのは自然だが、特に小天体表面では、姿勢を戻すための復元力としての重力が小さく、着陸時に散逸しきれなかった残存エネルギーで、接地後、探査機は容易に転倒し得る。また、積極的にスラスト噴射等の手段で転倒を抑えることも考えられるが、新たなエネルギーが着陸脚や地盤が持つ弾性に蓄えられ、噴射停止後に解放されバウンド等新たな運動を発現することに繋がるため、正確に探査機の挙動を予測した上で用いることが必須である。

探査機の着陸ダイナミクスを把握するため、事前の地上実験やシミュレーションによる総当たり評価を行う。特にシミュレーションの妥当性を得るため、惑星表面の重力環境や機械特性を地上で再現してその環境下で探査機の挙動を確認することが重要である。小さな重力の環境での試験、例えば、航空機実験(微小重力含む低重力環境)や落下塔試験(微小重力のみ)での設計の検証が不可欠となる。なお、地上での低重力試験は数秒から数十秒の時間制約内で行う必要があり、また、表層物質の粒径分布や形を模擬したレゴリスを利用し、その重力依存性を把握して試験に臨むことが肝要である。

図2に、1G(地球の重力)および微小重力環境での試験において、同じ質量ならびに同じ速度を持った着陸パッドが試料へ衝突した際の実験結果を示す。対象試料として東北硅砂8号を用い、その粉粒体中へ直径70mmの着陸パッドを模擬したアルミの円板を0.6m/s程度で衝突させる試験を行っている。

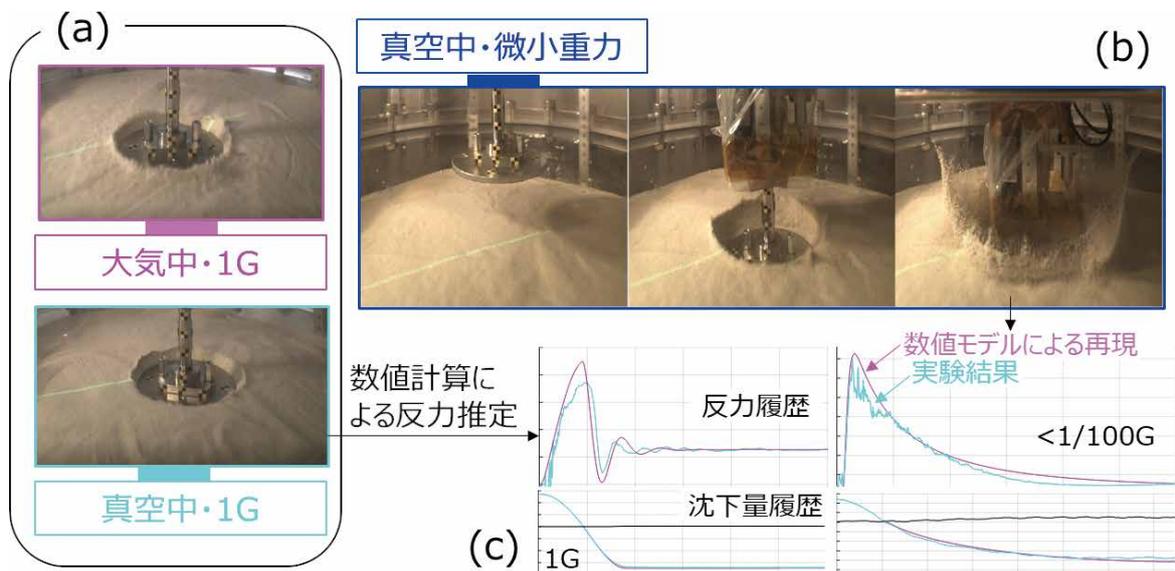


図2 環境作用(重力の大きさ、大気の有無)に依存した粉粒体のふるまいの違いと反力の予測

パッド上部には約3kgの計測器を含む錘が搭載され、試料を含め真空中内(100Pa以下の減圧下)に置かれている。これらの試験体が入った真空チャンバが落下カプセルへ搭載され、約4.7秒の間、真空中を自由落下している際の試験結果が示されている。

1Gで大気の有無の比較(a)では、衝突時の砂の飛散の様子が違うことに加えて、反力の程度は同じだが、大気がある場合はその履歴に高周波の変動が観測されている。次に、微小重力の結果(b)では、1Gで沈下量の増加に応じて反力が大きくなるのに対して、微小重力ではその振幅値が大きく下がり、また、反力は衝突直後が一番大きく、その後長い時間をかけて小さくなっていく履歴をたどる。これをシミュレーションで再現(c)しようとする、地上でよく用いら

れる砂地盤への圧縮力に基づく相互作用力の推定式で再現することは難しいが、速度の二乗に比例した反力を想定すると、定量的にも、挙動としてもよく合う推定結果を得られる条件があることがわかっている。

このように、低重力における粉粒体と機械の相互作用のより精緻な把握が、実際の天体表面での探査機の着陸ダイナミクス予測に不可欠である。

着陸ダイナミクス(衝撃の緩和)

着陸時に高速な衝突が考えられる場合、表層物質の柔らかさが想定通りであることを期待するにはリスクが伴うため、探査機に衝撃緩和方策を搭載し破壊から保護すべきである。

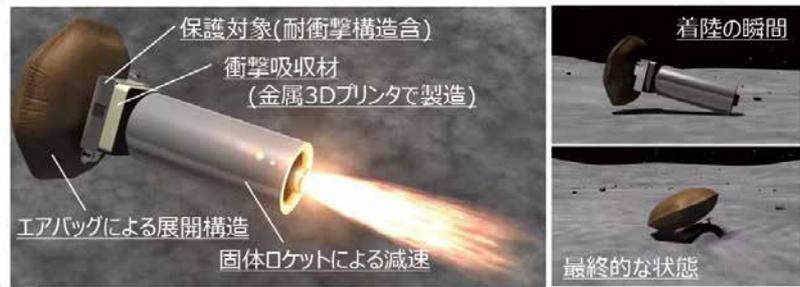
方策のひとつは等加速度で減速させること、もうひとつは減速する距離を長くして衝突速度が0になるまでの時間を十分長くすることである。

前者では、塑性変形を利用した衝撃吸収材の定荷重を示す範囲で使用して衝撃を半分にすることが可能で、後者ではエアバッグ等展開構造を利用して減速距離を増加させ、それに反比例して衝撃加速度を小さくさせることが可能となる。

衝撃吸収材は、要求する衝撃レベルと吸収エネルギー量から、その寸法が一意に設計できる反面、機能の指向性が高いため、確実に動作させるためには着陸脚や探査機下面等へ搭載して衝突方向を制御する必要がある。一方、エアバッグを用いた場合、運動エネルギーの散逸性能はあまり期待できないが、展開構造特有の大きな減速距離を確保できるため、搭載サイズの限定される小型探査機等で用いると効果的である。

図3に示すように、OMOTENASHI探査機(a)では、秒速50mの衝突速度から約1kgのペイロードを守るように、固体ロケットエンジンによる減速に加えて、保護対象との間に着陸方向に対する衝撃吸収材が搭載されている。また反対側には左右の保護も兼ねたエアバッグが展開し、保護対象自体も耐衝撃構造を持つ。エアバッグは展開型エアロシェル実験超小型衛星(EGG)で開発された実績品と同じ構成で製造され、衝撃吸収材はSLIMで開発された金属3Dプリンタの造形品と同じ方法で製造されている。耐衝撃構造としてLunar Aのベネトレータ

大きな衝撃を伴う着陸の例(OMOTENASHI) (a)



地上での衝撃試験(高速走行台車による衝突試験) (b)

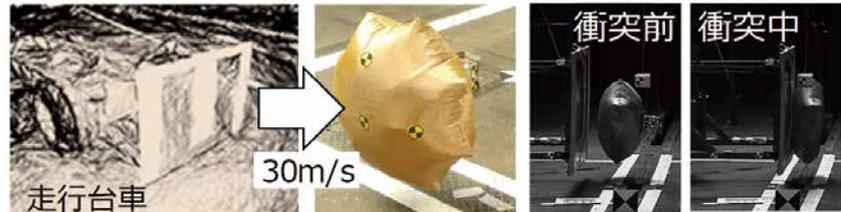


図3 大きな衝撃を伴う着陸(OMOTENASHIを例に)と高速走行台車による衝突試験

で開発された樹脂充填構造を採用している。この方式ではまず着陸時に固体ロケットエンジンと衝撃吸収材を惑星表面へ衝突させ、その塑性変形により、保護部位に加わる衝撃加速度を8,500G程度になるように制御しつつ運動エネルギーを散逸させ、レゴリスへの沈下も利用して減速を図る。そして、エアバッグの大きな面積を保持して、深い沈下を防ぎつつ、バウンドした場合でも、エアバッグにより2、3度目の衝撃を軽減できるようになっている。

エアバッグのような展開構造の衝撃緩和特性を評価するには、地上において大きな衝撃加速度と衝撃エネルギーを与える検証試験が必要となるが、大気による減速をキャンセルするために多くのリソースを要することになる。そこで、エアバッグ自体が高速で動くのではなく、模擬した天体表面が動き、衝撃緩和装置に衝突する地上試験方法が編み出された。図3(b)に示されるように惑星表面を模擬した台車をエアバッグや衝撃吸収材へ時速108kmで衝突させ、結果として、エアバッグによる衝撃緩和とレベル600G、衝撃吸収材による3,000Gを達成し、設計理論の確認と共に、地上試験方法を確立している。また、真空中での砂面衝突や衝突時の姿勢反転も評価しており、設計の想定範囲の逸脱程度を確認する地上試験も実施している。

おわりに

最後に、月惑星表面への安全な着陸を実現し、ミッションの価値を低下させないためには、探査機の着陸ダイナミクスを考慮した着陸装置の搭載が不可欠である。ただし、着陸条件や月惑星表面環境を地上で再現するのは困難なため物理的な地上試験には限界があり、探査機の着陸ダイナミクスを数式化したシミュレーションでの設計検証が今後多用されると考えられる。そして、探査機内部にも重力依存で変化するダイナミクスを持ち、また、環境の作用も重力により様変わりすることを考えると、惑星表面自体のふるまいや表面との相互作用の予測精度を上げる研究開発の進展、国際宇宙ステーションでの人工重力発生装置を利用した低重力環境での長時間の検証が可能な試験環境の充実が今後期待される。

衝突点近傍で発生する高速度放出物の生成機構の解明

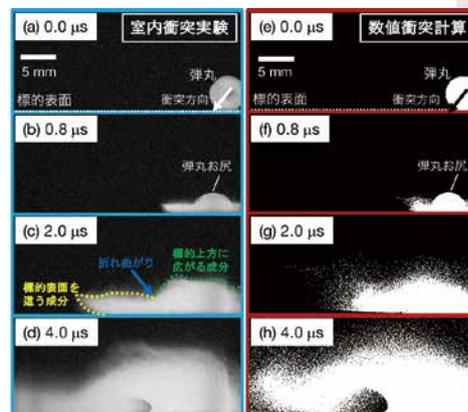
一般に天体衝突が起こると付着や反発、放出物やクレーターの生成、あるいは破壊が起こります。このような衝突現象の一部を切り出して実験室スケールでその現象を再現したり、模擬したりする実験のことを室内衝突実験といいます。本稿では、私たちが行った高速度室内衝突実験について簡単に紹介させていただきます。

クレーターが生成される時、着弾点近傍から放出される物質は衝突速度と同程度の速度にまで達します。そのため天体内で極めて遠方に輸送されるだけでなく、別の天体へ移動することも考えられており物質輸送の観点で高速放出物の挙動を調べることは重要です。私たちは室内衝突実験とSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) コードを用いた数値衝突計算の両方の手法でこの挙動について研究を行いました。室内衝突実験は千葉工業大学惑星探査研究センターにある2段式軽ガス銃を用いました。衝突時には強い発光があるためその後には飛び出す物質を連続的に観察することはこれまで困難でした。そこでバンドパスフィルターを取り付けた高速ビデオカメラの反対側に、単一の波長を持つ強力なレーザーを配置して放出物の影絵を取得し、発光の影響を取り除きました。

さらに、従来研究よりも桁程度速いフレームレート(1秒間に500万コマ)で撮像することによって弾丸が標的にめり込む様子を時間分解できるほど克明に、衝突の最初期からその後にく高速で飛び出す放出物の観察を行うことができました。

斜め衝突では標的表面を這うように放出される成分と、衝突下流への運動を伴いながら上方に広がる成分との2成分が観察されました(図参照)。これを数値衝突計算で区別するには弾丸に 10^6 個の粒子数を用いた空間解像度での計算が必要であり、さらに 3×10^6 個の粒子数を用いた計算では、室内衝突実験で得ら

図：物質が高速度で放出される様子。室内実験の結果を左の列(a-d)、数値計算(弾丸に 3×10^6 個の粒子数を用いた空間解像度)の結果を右の列(e-h)に示す。衝突速度は3.56 km/s、衝突角度は45度、弾丸と標的の材質は共にポリカーボネイト。



れた放出物速度と15%以内の精度で一致することがわかりました。高速度放出物に関して室内実験との詳細な比較を行ったのは本研究が初めてで、この計算解像度で数値衝突計算を行えば、その3次元速度分布をよく再現できることが明らかになりました。

本研究により高速度で放出される物質の速度や放出方向に関して、実験的に妥当性が検証された数値衝突計算を行うことが可能となりました。本計算コードを活用することで、惑星科学における物質輸送の諸問題の解明・検証につながれると考えています。すでにこのコードを用いて火星上での小天体衝突による、火星から火星衛星フォボスへの衝突破片の輸送量が定量的に評価されており、フォボス上に火星表層物質が輸送されたとあることが示されました(Hyodo et al., 2019)。火星衛星探査計画MMXにより、衛星の探査から惑星本体の物質も入手できることが示唆され、フォボスの形成過程だけでなく火星史の解明までもが期待されます。(岡本 尚也)

伊藤琢博さん、IAC2019のThe Luigi G. Napolitano Awardのファイナリストに!

JAXA 研究開発部門 第1研究ユニット所属で相模原在勤の伊藤 琢博さんが、2019年10月に米国ワシントンD.C.にて開催された世界最大級の国際宇宙会議であるInternational Astronautical Congress (IAC)にて、The Luigi G. Napolitano Awardのファイナリストに選ばれました。伊藤さんは、将来の高精度月惑星着陸を実現する新たな誘導方法(搭載計算機による高速軌道計算)を研究しており、第70回となるIACでは、“Throttled Explicit Guidance for Lunar and Planetary Pinpoint Landing”という講演タイトルで口頭発表しました。この研究は、伊藤さん自身も開発に携わる日本の高精度月着陸ミッションSLIM (Smart Lander for Investigating Moon)の先にある、より高度な高精度月惑星着陸ミッションを実現する誘導方法を提案したものです。

この研究が評価され、伊藤さんはThe Luigi G. Napolitano Awardのファイナリストに選ばれました。ファイナリストに残れるのは5人のみで、日本人は伊藤さん1名だけでした。

The Luigi G. Napolitano Awardは、航空宇宙科学分野の発展に重要な貢献をし、かつ、この研究をIACで発表した30歳未満の若手研究者1名に対して与えられる、航空宇宙科学分野における世

界的な賞です。審査は厳格なプロセスを経て行われ、経歴書と発表論文の書類審査、IAC期間中の口頭発表に対する審査を経て受賞が決まります。

残念ながらwinnerとしての受賞には及びま

せんでしたが、その研究内容が高く評価されたこととなります。伊藤さんは「これからも、将来の月惑星着陸ミッションに広く利用される誘導制御法として体系化することを目指して、本研究に取り組んでいきます」と抱負を語っています。

伊藤さんは現在、JAXA職員と博士課程学生(東京大学大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻所属)の2足のわらじを履いており、今回受賞した研究も、博士論文へ向けて取り組んでいる内容になります。忙しい日々が続くと思いますが、今後の活躍に期待しています。(坂井 真一郎)



IAC 2019における受賞式の風景(向かって左から3人目が伊藤 琢博さん)。

ロケットの自撮り棒

ロケットって宇宙でどうなってるの？

子供から大人まで共通の疑問でしょう。もちろん研究者や技術者も同じことを思います。

観測ロケットは衛星に比べ手軽に宇宙へのアクセスできるため、様々な研究者や技術者が観測ロケットを使用して実験を行っています。その人たちも、ロケットに載せた自分の装置が宇宙でちゃんと動いている？壊れてない？などとても気になります。

そこで観測ロケットS-310-45号機には最近巷でホットな話題となっている360°カメラを搭載し、宇宙での観測ロケットの全容を撮影することにしました。360°カメラとしてリコーのThetaを使用することにしました。

不要な部品は取り外し、最小限の部品だけを独自に作製したケースに入れて、写真の右上のように、消防車のはしごのように伸びるレールの先に取り付けました。カメラはロケットが打ち上げられてノーズコーンが開くまで壊れないように固定されています。

エンジンの燃焼が終わり、ノーズコーンが開くとカメラを固定していた装置が外れレールが伸び、写真の右上の状態になります。伸びたレールの先にカメラがついているのでまるで自撮り棒のようになります。レールが伸び切ると一定の間隔で写真を取り始めます。カメラで撮影した画像データは大きくて一度に送れないので

小さく分割して地上に送ります。地上で受け取った細かいデータをつなぎ合わせて再度1枚の画像にします。写真がこのカメラで撮影したものです。カメラ本体の画像処理で自撮り棒(レール)が見えなくなっています。

左上にある小さな明るい点が月で、太陽はロケットの裏側にあり、その光がロケットの隙間からもれています。つまりこの写真には地球と月と太陽が入っているのです。絶妙な時間に打ち上げたおかげで、このような写真が撮れました。また、このカメラで撮影した写真のおかげで、ロケットに搭載した機器がちゃんと動いているかを確認することもでき、当初の目的である「宇宙で実際どうなっているの」という疑問を解決することができました。

今後もこの自撮り棒がロケットに搭載され、素敵な写真をたくさん届けてくれるでしょう。撮影した写真はJAXAデジタルアーカイブスにありますのでぜひご覧ください。* ロケット・輸送システム→観測ロケット→S-310で見ることができます。さらにVRゴーグルで見ると、とても感動すると思います。(三田 信)



360°カメラで撮影した観測ロケットと自撮り棒の伸展状態(右上)。

* <http://jda.jaxa.jp/>

日本地球惑星科学連合大会にて中高生向け講演会「次の世代につなぐ宇宙科学の最前線」を開催

日本地球惑星科学連合(JpGU)2020年度大会にて、オンラインでの中高生向け講演会「次の世代につなぐ宇宙科学の最前線」を開催されました。

日本地球惑星科学連合大会は、例年幕張メッセにて5月に開催される国内最大規模の学会です。今年度は、新型コロナウイルスによる影響で、7月12～16日に時期をずらしてオンライン形態での開催となりました。連合大会では、例年NASAが主催するハイパーウォール(ディスプレイを連結した大画面システム)を用いた中高生向け講演会を行っていますが、こちらも急遽Zoom Webinarアカウントを用いたオンライン講演会へと変更になりました。

今年度は、NASA惑星科学部門長Lori Glaze氏、NASA太陽系物理学部門長Nicola Fox氏、宇宙科学研究所から臼井 寛裕氏、清水敏文氏の4名にご講演いただきました。NASAのお二人は、本講演会のために素晴らしい講演動画を作成いただきました。また、NASAが開発した惑星データ探査アプリであるTREKについて、太

陽系バーチャル研究所のBrian Day氏に紹介動画を作成いただき、宇宙科学研究所の村上 豪氏に解説いただきました。さらに村上豪氏と地球観測センター 山地 萌果氏による司会進行、講演者らと宇宙科学研究所 藤本 正樹氏による質疑応答も行いました。これら多くの方の協力がなければ、実現できなかった講演会でした。

4つの講演とTREK紹介、交流会も含めて約2時間の開催となりました。開催告知が直前の1週間前となってしまったのですが、300名を超える参加者がありました。オンライン開催のため聴講者の反応があまり分からず、講演実施中も不安でしたが、各講演に対して20個近くの質問がでておりました。また講演後のアンケートにおいても、「PCのバッテリー残量が5%になるまでくぎづけで見えていました。」「質問がしやすく、面白かったです。」など、とても満足度の高いものになったと思います。

今回、初めてのオンライン開催となり、その新しい可能性も感じました。1つは、遠方の参加者も参加できることです。現地開催では関東圏の中高生が中心となっていましたが、北海道や鹿児島など関東圏以外の参加者が増えました。もう1つ興味深かったことは、参加年齢層が広がったことです。中高生向けと広報しておりましたが、小学生から40代の方まで幅広く参加いただきました。オンライン開催の方が、真に興味がある講演会に参加しやすいのかもしれない。

本活動も継続して5年目となりますが、これまでに参加された高校の教員の方から、実際に宇宙科学を学ぶ日本・海外の大学に進学した生徒がいると聞いております。この中から、将来の宇宙科学を躍進させる研究者がでてくるのでは、と期待を感じざるを得ません。(飯田 佑輔)



質疑応答の一幕。司会の山地氏と村上氏(上段)、講演者の清水氏と臼井氏(中段)、筆者と藤本氏(下段)。多くの方の協力なしには開催できない講演会でした。

日本の科学衛星3機・夢の協演を計画!!

今年の秋、日本の科学衛星・夢の協演を企画しています。日本の科学衛星3機による金星観測キャンペーンです。

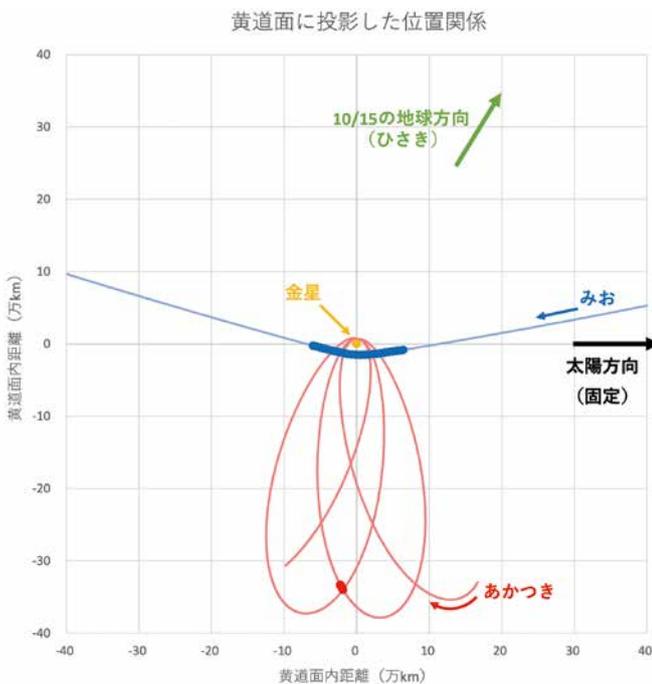
10月15日に日本の水星磁気圏探査機「みお」が水星に向かうための金星スイングバイを行います。金星からおよそ11,000km離れた場所を通過し、前回の地球スイングバイの時

と同様、腕試しに金星の科学観測を計画しています。金星観測といえば、日本初の惑星周回機となった金星探査機「あかつき」です。金星を約11日で周回し、継続的に金星の雲の明るさや動きを観測しています。そして、忘れてはいけない、惑星観測に特化した宇宙望遠鏡「ひさき」です。地球周回軌道から、金星や火星の超高層大気・木星磁気圏プラズマの極端紫外分光観測を継続しています。この3機を同時に利用して金星観測をしようという企てです。

それぞれの軌道計画値を図に示しました。金星の近くに日本の探査機が2つも飛翔しているなんて最近まで夢にも思わなかったシーンです。このキャンペーン観測では、各衛星の特徴を生かした連携観測による金星の大気から金星近傍の宇宙空間プラズマまで広範囲な高度の総合的な観測的研究、1つの衛星だけでは決して観測できない金星の裏側を別の衛星で観測するグローバルな観測、そして、同種の観測を異なる機器で同時に行い、性能評価のための較正データを取得することなどが計画されています。また、8月末には前哨戦として、地球-「みお」-金星がほぼ一直線に並ぶ機会を利用し、「みお」と「ひさき」が金星の同じ場所を同時に観測できる利点を生かした観測も計画しています。本稿が出版される頃は「ただいま観測中」というステータスのはずです。

地球以外では、3機の日本の科学衛星による惑星同時観測は、日本の宇宙科学史上初の試みです。太陽系探査に関わる1人として今からソワソワしています。みなさんも是非、みおちゃん・あかつきくん・きょくたん(ひさき)に次ぐ第4の観測隊員として金星を観測してはいかがでしょうか? 当日、日の出の約2時間前から、東の空に見られる細い弓形の月の近くで、しし座の方向に宵の明星として-4等級の明るさで輝いているはず。今から澄み渡った秋晴れの空になることを祈っています。

(山崎 敦)



図：青線が10月15日前後の「みお」の軌道を、赤線が10月の「あかつき」の軌道を示し、太線部分が「みお」の金星最接近前後数時間の軌道を表します。10月の「ひさき」は地球方向(緑矢印)から観測します。公転による金星位置の変化の影響が図に表れないように、原点に金星、太陽方向を右側に配置した黄道面への投影図です。

「2019年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト提案」の結果について

2019年10月10日に公募を開始した「2019年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト提案」は、2020年2月5日の締切までに7件の応募がありました。宇宙科学研究所は提案の評価を宇宙理学委員会と宇宙工学委員会に依頼し、2つの委員会は合同で「公募型小型・評価審査小委員会」を設置しました。

宇宙科学プログラム室は、希望のあったワーキンググループに対し、提案書作成に向けた調整、支援を行いました。小委員会では、応募のあった全テーマについて2020年3月に一次ヒアリングを行った後、4テーマについて2020年5月に二次ヒアリングを実施し、最終的に1テーマを選定しました。小委員会の選定結果は2020年8月3日の臨時宇宙理工学合同委員会に報告され、そこでの審議を経て承認されました。

次のフェーズに進むことのできる提案は、新時代の高精度天体観測手法である宇宙干渉計の実現に必須となる、超高精度フォーメーションフライト技術とドラッグフリー技術の軌

道上実証を行い、将来の重力波望遠鏡や赤外線干渉計等のミッション実現に向けた技術を獲得することを目指すSILVIA (Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications) 計画の1件であります。

今後、この提案に対してアイデア実現加速プロセス (Pre-Phase A1b) を実施し、適切な時期にミッション定義フェーズ (Pre-Phase A2) に進むための審査(プリプロジェクト候補選定審査)を実施していく予定です。その後本提案は、公募型小型計画5号機あるいは6号機の候補の一つとして活動していくこととなります。

公募型小型・評価審査小委員会および木村 真一委員長には、大変な労力をかけて厳正なる審査をしていただきました。小委員会委員および小委員会から評価を委託された外部委員の皆様

に深く感謝いたします。

「みお」つくし

第16回

世代も国境も越え水星へ挑むベピコロンボの物語

水星 / 「惑わない星」より



日本の大型パラボラアンテナも活躍中

「みお」のテレメトリやコマンドの授受は、第14回で紹介した通り、MPO経由で行っています。そのMPOと地上との通信には、日本の大型アンテナも活躍しています。

日本のアンテナを使うときも、MPOの衛星管制運用者はドイツESOCにいます。コマンドはESOCからISASへ、さらにアンテナへと送られて、ようやくMPOへ送信されます。アンテナで受信したテレメトリは逆ルートでESOCへ。ちなみに、アンテナを遠隔操作しているのは筑波宇宙センターです。MPOとの通信には、JAXAの複数の拠点と部署が連携しているのです。

地上系担当 小川 美奈 (おがわ みな)



力強い白田64mアンテナ(左側上下)と近未来感あふれる美笹54mアンテナ(右側上下)。

長野県にある白田宇宙空間観測所(以下「白田」という。)では、口径64mのパラボラアンテナが今日も深宇宙探査機と通信しています。

日本一大きな口径をもつ白田64mアンテナは1984年にハレー彗星探査試験機・探査機「さきがけ」「すいせい」の運

用のため整備され、現在に至るまで金星探査機「あかつき」や小惑星探査機「はやぶさ」「はやぶさ2」といった様々な探査機との通信を担ってきました。水星に向かい航行しているMPOとの通信も白田64mアンテナでサポートしています。

整備から長い年月が経った白田64mアンテナは老朽化により、MPO、「みお」運用局の役目をまもなく後継局にバトンタッチします。

追跡ネットワーク技術センター 領木 萌子 (りょうき もえこ)

白田の後継局として、白田から直線距離で約1.2km程度離れた場所に美笹深宇宙探査用地上局を整備中です。アンテナの口径は白田より一回り小さい54mですが、受信性能等の向上により、性能は白田と同等となっています。

2015年から開始した整備も終盤を迎えており、2020年8月現在、現地では大電力増幅装置(SSPA)の整備中であり、インテグレーション試験、試行運用を経て、2021年4月以降、本格的な運用を開始します。

「みお」水星到着後、「みお」との通信の要となるので、シミュレータを用いた適合性試験もしっかり行う予定です。

深宇宙探査用地上局プロジェクトチーム 内村 孝志 (うちむら たかし)



日欧の違い(高圧ガス関係)

今回は、「みお」の地上支援としての高圧ガス周りを紹介したいと思います。

「みお」搭載の推進薬(超高圧の窒素ガス)及び気密試験用の超高圧のヘリウムガス、観測機器のセンサが酸化するのを防止するためのガスパージ用高圧窒素ガスという3種類の高圧ガスを用いています。

● 日欧の法律の違い

高圧ガスは、国内では日本の法律、欧州では欧州の法律で規制されます。それぞれの制定経緯もあって、国内の法律に適合していてもそのまま欧州に、とはいかなく、色々と苦労をしました。違いの端的な例として、日本では「圧力」のみの規制に対し、米国も含めて欧州では「圧力×容積」というエネルギーの量で規制されています。ESA担当の方といっしょに法律の詳細まで検討し、日本から持ち込む機器を我々が使用することを認めてもらいました。

● ボンベの口金の違い

高圧ガスとして、もっとも身近なのはガスボンベでしょう。これにも違いがあります。中でも、もっとも困るのが接続先であるボンベの口金です。サイズやねじのピッチなどが異なれば絶



屋外一時保管中の気密試験用ボンベ(上段)と口金測定(下段)@ESTEC。

対接続出来ません。しかも欧州域内でも、フランス、ドイツなど国ごとに口金が異なり、ボンベの調達先が重要になります。この辺り、ESAとは何年にも渡って調整して、もう大丈夫だろうと思いつつも試験前にオランダに行って、納入されたばかりのボンベと手持ちの口金を合わせると、噛み合わない事態に至りました(図参照)。超高圧ということで、ガスメーカーが別のガス種のボンベを転用したようで、ESAの担当者も把握しておらず、帰国して急ぎ対応する口金を製作し、試験にこたなきを得ました。ガスパージ用の窒素ガスについても、口金に入れるパッキンに僅かな違いが有りましたが、これも同様に対処しました。

オランダではドイツ製でしたが、ギアナはフランス海外県なのでまた変わります。噛み合わないのでは、とドキドキしましたが、無事打上げまで運用できました。

他にも現地作業してみないと判らないことが多々有りましたが勉強になりました。

推進系担当 志田 真樹 (しだ まき)

「強くて軽い」が 宇宙用材料の永遠のテーマ

極端な条件で使うことができるか

——宇宙構造材料工学が専門ですね。

宇宙飛行体の構造に使われる材料の研究開発を行っています。宇宙飛行体は、超高温や超低温、非常に大きな力がかかるなど、一般的ではない使われ方をします。しかも、高度な信頼性が要求されます。そのため、想定される条件下で材料が劣化せず健全に使うことができるかを調べ、劣化する場合はその対応を考えるのが、大切な仕事です。

——どのような材料が求められているのでしょうか？

強く軽い材料を使いたい、というのが永遠のテーマです。いい材料が出てきても、宇宙飛行体に使ってよいかどうかの実験データを集めるだけで何年もかかります。宇宙科学プロジェクトのスケジュールの中で材料開発に着手し使えるところまで持っていくのは難しいため、将来必要になる材料を見定めて研究開発を進めておくことが重要になってきます。

新規材料開発と宇宙科学プロジェクトのタイミングがちょうど合った例が、金星探査機「あかつき」のセラミックスラスタです。スラスタとは姿勢制御や軌道変更に使う小型のロケットエンジンで、それまでは金属製でした。私たちは、金属より高温強度に優れたセラミックスに置き換える研究開発を進めていました。実験データが揃いこれならばいける！となったころ、「あかつき」プロジェクトが始まり、セラミックスラスタを提案し採用されたのです。

2つの複合化：複合材料とマルチマテリアル

——現在はどのような研究開発を？

「複合化」が重要なキーワードになっています。複合化には2つあり、1つ目は複数の材料を一体的に組み合わせることで単独では得られなかった性能を持たせた「複合材料」です。その代表が、炭素繊維を樹脂でぐるんだ炭素繊維強化プラスチック(CFRP)です。固体ロケットのモータケースは、私たちの研究室で開発してきた最高強度の金属でつくられていましたが、軽くて強度が高いCFRPに少しずつ置き換えられてきました。イプシロンロケットのモータケースは、すべてCFRP製です。

CFRPは優れた複合材料ですが、樹脂が入っているので耐熱性は金属より劣ります。そこで私たちは耐熱性が高いセラミックスに注目し、セラミックスラスタを開発したのです。しかしセラミックスは、衛星打上げ用ロケットのエンジンに使うに

宇宙飛行工学研究系 教授
宇宙科学プログラムディレクタ

佐藤 英一 (さとう えいいち)

1961年、東京都生まれ。東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。工学博士。宇宙科学研究所助手、スイス・ローザンヌ連邦工科大学研究員、宇宙科学研究所助教授などを経て、2006年より現職。専門は宇宙構造材料工学、力学特性、材料信頼性。

<http://www.isas.jaxa.jp/home/sato-lab/>



は強度・信頼性が足りません。その問題を解決するのが、セラミックスの繊維をセラミックスでぐるんだセラミックマトリックス複合材料(CMC)です。まずは小型のエンジンからCMCでつくることを目指していきます。

2つ目の複合化は、特性の異なる材料を適材適所で組み合わせる「マルチマテリアル化」です。各部の条件に合わせて最適な材料を使うことで、強度を維持しつつ軽量化し、信頼性も向上させます。ただし、異なる材料の信頼性ある接合技術の開発が不可欠です。私たちは、セラミックスラスタを大型化するため、セラミックスと金属を接合した接合スラスタも開発しています。

液体ロケットであるH-IIAやH3の燃料タンクにCFRPは使われていません。燃料の液体水素は極低温のため、熱ひずみによってCFRPに亀裂ができてしまうのです。私たちは、液晶ポリマーの膜をタンクの内側に貼ることで亀裂から液体水素が漏洩するのを防止するCFRP製タンクを開発し、再使用ロケットに搭載して飛行実験を行いました。これは2つの複合化の合わせ技ですね。

——宇宙用材料の研究開発、その面白さや難しさは？

地上用の材料の研究では普通、金属、セラミックス、複合材料など種類ごとに専門家がいます。一方、宇宙用の材料を専門とする研究室は、JAXAでは私たちだけで、日本の中でもおそらくほかにはないので、あらゆる材料の相談が舞い込んできます。マイナス270℃の実験もやれば、1,500℃の実験もやります。大変ですが面白い。相談された条件が極端であればあるほど、うれしくなります。

——2019年12月から宇宙科学プログラムディレクタを務めていらっしゃるんですよね。

宇宙研で行っているプロジェクトの統括です。これまで材料を通して多くのプロジェクトに少しずつ関わってきましたが、宇宙科学プログラムディレクタはプロジェクトの立ち上げから終了まですべてを見なければいけません。しかも、それぞれステージが違うので、目が回ります。

最近はプロジェクトが大型化し、打上げ頻度が減る傾向にあります。私は、大型と小型のバランスを取り、打上げ頻度を増やすべきだと考えています。また、開発中で問題が生じると、打上げも伸びてコストも増えます。打上げ頻度を維持するためにも、準備段階で道筋をしっかりと見通しておくと共に、システムズエンジニアリングの導入が不可欠でしょう。

編集後記

ようやく梅雨が明けて夏らしく暑くなってきました。7月にはNEOWISE彗星が地球に接近し、7月下旬には水星から海王星までのすべての惑星が空に勢ぞろいしました。

私は残念ながら梅雨空でそれらを見ることができませんでした。皆さんはいかがだったでしょうか？ (小川 博之)



ISASニュース No.473 2020年8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/>