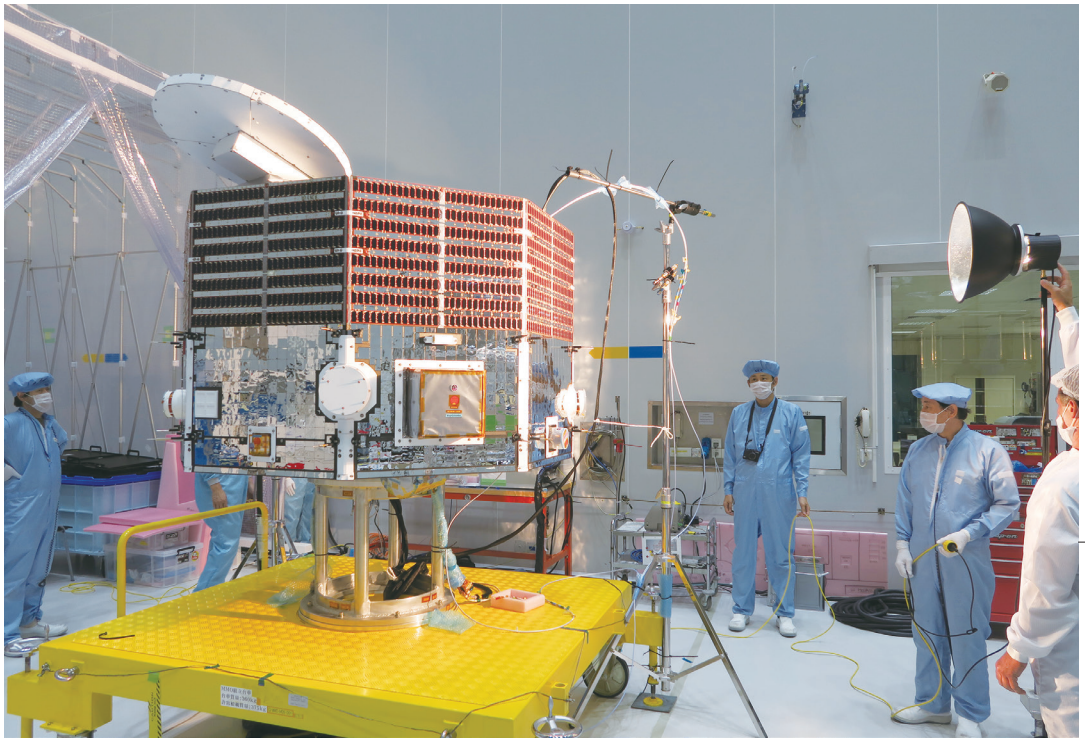
ISSN 0285-2861

ISASニュース

JAXA宇宙科学研究所

2018
9
No.450



水星磁気圏探査機「みお」太陽電池パネル照射試験

2018年6月28日に行われた水星磁気圏探査機「みお」太陽電池パネル照射試験の様子。ヨーロッパ側モジュールの太陽電池パネルの試験で使用している強力なライトをAirbus社の技術者付きでお借りして実施しました。

宇宙科学最前線

宇宙研の極低温推進剤用複合材タンク開発史

宇宙飛翔工学研究系 准教授
竹内 伸介（たけうち しんすけ）

背景

ご存知の方はご存知と思いますが、衛星打上げロケットの重量の約9割は推進剤（例えば燃料の液体水素（LH2）＋酸化剤の液体酸素（LOX）、或いは固体ロケットの場合はポリブタジエン等）が占めています。何故これ程燃料が必要か興味のある方はツィオルコフスキーの公式を調べていただくとして、このお陰でロケットの胴体の大半の部分は推進剤の容器（以降液体を想定してタンク）となっていて、残り約1割の重量のかなりの部分（例えば半分程度）を占めています。打上げ能力向上のために推進剤タンクを軽くしたい、軽量な複合材で推進剤タンクを作りたいという要望は当然のことで、米国を筆頭に1990年代から開発が始まりました。この頃は米国でスペースシャトルの次の宇宙船が模索されていた時期であり、再使用型の機体では使い終わったタンク等のデッドウェイトを捨てられる通常の使い捨てロケットよりも機体の軽量化の要求が厳しくなるため、ある意味必然的な流れであったとも言えます。

一般に複合材は強度の高い繊維（例えば炭素繊維）を樹脂で固めた物ですが、この複合材の特性ゆえに開発は難航します。まず1つ目の問題としては、特に酸化剤用タンクの場合に顕著ですが、樹脂が推進剤に負けて腐食する、或いは最悪の場合は酸化して発火する等の問題が生じます。また2つ目の問題として、特に一般に良く使われる極低温推進剤の場合、複合材が極低温に冷やされると樹脂がガラスのように硬く割れやすくなり（これを専門用語で靭性の低下と言います）、金網入りのガラス板が温度差で割れるように樹脂にひび割れが発生し、内部の推進剤が漏れるという問題もあります。米国で再使用型ロケットの実験機DC-X用に液体水素用の複合材タンクが試作されましたが、この樹脂割れからの漏れ問題でフライト使用には至っていません。

これらの対策として一番良いのは、化学反応にも極低温にも強くて腐食しない・割れない、かつ複合材として成形が可能な樹脂を開発することですが、中々そのように都合良くはいきません。次善の策としては、強度は複合材に持たせ、その内側に漏れを止めるための別材質の内張（ライナー）をするという手があり、宇宙研での複合材タンクの開発はこちらの方法で進めてきました。以下、その歴史をご紹介します。

金属ライナー複合材タンク（2000～2003）

最初に開発したのは液体水素用の金属ライナー複合材タンクです。宇宙研でも1990年代後半から再使用型ロケットの研究と実験が行われており、その実験機に搭載する軽量な推進剤タンクが要望されて開発がスタートしました。実は一般の衛星等で使う高圧ヘリウムガスタンクは、金属製のライナーの上に複合材を成形した構造となっており、これをほぼそのまま踏襲して大型化・低圧化し、内部に推進剤の揺動を抑える板などを追加して極低温推進剤用のタンクとしました。試作したタンクのライナーの材質はアルミで、最薄部は厚さ約1 mm程度となっています。金属ライナーを極低温で使用する際に問題になるのは熱収縮で、内側にあるアルミは線膨張係数が大きく極低温で大きく縮むのに対し、外殻の複合材は線膨張係数がゼロに近く極低温でも余り変形しないため、内部に極低温推進剤を充填するとアルミのライナーが縮んで複合材から剥がれようとする力が作用します。ヘリウムガスタンクはこの対策として塑性処理（通常使用時より高い圧力を掛けてライナーを膨らんだ形状に塑性変形させ、一方で複合材は塑性変形しないため、圧力ゼロではライナーと複合材が互いに押しあう状態にする処理）を行っており、常温付近ではこの処理の効果に加えて接着剤が靭（しな）やかに変形に追随してこれに耐えられるのですが、液体水素のような極低温になると塑性処理の初期変形以上の収縮が起きることに加え接着剤も靭性低下を起こして割れ（剥がれ）やすくなるため、耐えきれずにライナーが剥がれてしまいます。この状態で加圧するとライナーが圧力に耐えられず破断する（そしてライナーが破断すると予想通り複合材では漏洩は止まらない）ことになり、実際に開発時に発生して試作をやり直しています。この対策としては、複合材成形時の繊維の揃え方を見直す、硬化時に圧力を上げ積極的にライナーと複合材間に外圧を作用させる、等の製造上の工夫を行い複合材とライナーの密着力を上げることで解決しました。これ以外にもメタルOリングが冷え過ぎてシールが効かない、ライナーの溶接部分が割れる等々の細かなトラブルもありましたが、試作4回にして無事漏洩の無い液体水素タンクを完成させることが出来ました。完成したタンクはJAXA統合直後の2003年10月から11月に実施された「再使用ロケット実験機第3次離着陸実験（RVT-9）」において実験機に搭載され、3回のフライトを無事成功させています（図1参照）。第2次離着陸実験で使われていたSUS製液体水素タンク（容量130 L、搭載重量82 kg）に対し、容量157 Lと増加しながら断熱材等を含む搭載重量で35 kgと半分以下になっており、飛行高度向上（第2次22 m→第3次42 m）に大きく貢献しました。実フライトの極低温推進剤タンクに複合材タンクが使用されて空を飛んだ例としては世界初かつ原稿執筆時点（2018年8月）でも世界唯一であり、複合材タンク開発の大きな金字塔です。

樹脂ライナー複合材タンク（2003～2010）

金属ライナー複合材タンクの次に開発を行ったのが樹脂ライナー複合材タンクです。これはライナーを剛性の低い樹脂で製造することで、金属ライナーの最大の問題点である極低温時にライナーと複合材の間で生じる熱応力を解消し、可能であればライナーの軽量化までを見込んだタンクです。ライナー用の樹脂には、極低温での破断伸びやガスバリア性、成形性、入手性等を考慮して液晶樹脂（Liquid Crystal Polymer, 以下LCP）を選択しました。開発の最初期にはLCPのフィルムを複合材外殻内面に接着剤で貼り付けたりしていましたが、フィルムの重ね合わせの部分の接着剤に微小な割れが入ってそこから内部の推進剤が漏れたりするため、LCPのフィルムのみを重ね合わせて高温で互いに融着させ一体成型とすることで漏洩の無いライナーを作ることが出来ました。しかしながらここでも問題になったのは、接着剤の靭性の低下でした。実はライナーは樹脂製でも配管類は樹脂や複合材にすることが出来なかったため、タンクの上部中央付近には金属配管類を取り付けた口金と呼ばれる金属部品が埋め込まれており、ライナーと一体成型されています。この口金と複合材外殻が極低温で接着剤の靭性低下のため剥がれてしまう問題が発生しました。先の金属ライナータンクでも同じ問題が発生していたためここで抜本的な問題の解決を図り、靭性を扱う学問である破壊力学を設計に導入することで、靭性が低下しても耐えられる形状の設計が可能となり口金・ライナーと複合材の剥離を抑えることが出来ました。この時点で極低温複合材タンクの設計技術はほぼ確立できたと考えています。この頃になると試験の方も手馴れてきており、開発の最初期では液体水素の充填加圧試験となると二、三十人で寄ってたかって何日もかけて準備して試験していたところが、数人で秋田県能代市にある実験場に行き、準備撤収を含めて1週間で試験が行えるようになっていました。（図2参照）自分達自身で迅速に試験が行えたことは、開発期間の短縮はもちろんのこと、仮に試験自体が失敗に終わった場合でもそこに至る状況を自身で克明に把握で

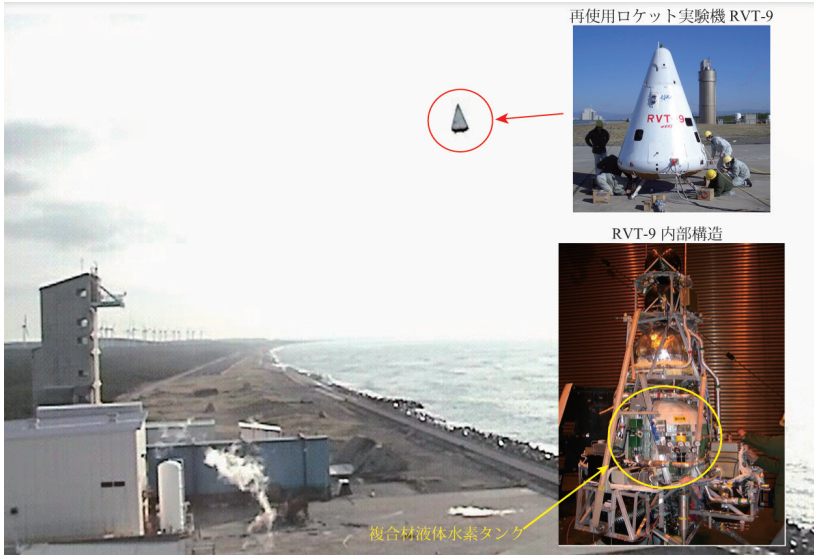


図1　2003年10月31日に能代多目的実験場（現能代ロケット実験場）で実施したフライト実験RVT-9-4で高度約42 mの宙を舞うRVT-9の雄姿とその内部構造、黄色囲み部が断熱施工された試作アルミライナー複合材タンク。（ISAS映像記録班及び管制通信班撮影）

図2　2009年2月に能代多目的実験場（現能代ロケット実験場）で実施した樹脂ライナー複合材タンク液体水素充填加圧試験準備中の一風景、左側の薄緑フィルムで覆われた銀色の物体が断熱材施工された樹脂ライナー複合材タンク。（筆者撮影）

き問題解決に大いに役立つため、開発において大きなアドバンテージであり、毎回協力していただいたISAS職員の方々にはこの場を借りて深い感謝の意を表したいと思います。なお開発した液体水素タンクは2011年3月～2013年3月に実施された高頻度再使用ロケット実験機第1次～第3次地上燃焼試験（FRV-1～FRV-3）において機体に搭載され、9回の地上燃焼試験を含む数十回の繰り返し使用を経て問題は発生していません。一方で樹脂ライナータンクには、ライナーが樹脂であるため酸化性・腐食性の強い推進薬は使えない、具体的には例えば液体水素タンクには問題なく使えるが液体酸素タンクには使えない、という制約があり、これに対応するために次の電鋳ライナータンクの開発に進んでいきます。

電鋳ライナー複合材タンク（2008～）

最後に電鋳ライナー複合材タンクです。電鋳とは電気鋳造の略で、電気メッキと同じ化学反応で金属を析出・生成する技術です。型上に金属を生成し、その後、型を除去することを、特に電気メッキと区別して電気鋳造と呼んでいます。この技術を用いてごく薄い金属皮膜を型上に生成してライナーとし、その上に複合材を成形した後、型を除去することでタンクとするもので、現在試作を進めている段階です。ライナーが金属製なので推進薬の腐食性等には強く、また金属製ではあっても極薄であるので複合材殻から剥がれようとする力は弱く熱収縮の問題にも対応しています。一般に電鋳は型の上に数ミリメートルから数センチメートル程度の金属を析出させ、その後型を除去（溶解）することで複雑な形状の中空構造物を作るのに用いられることが多いのですが、このタンクでは逆に回転楕円体等の比較的単純な形状の型の上に極薄の金属皮膜を生成することになります。この際に苦労したのがガスバリア性で、やはり極薄の皮膜だと微小なピンホールが残りがちとなり、空気等では分からなくてもヘリウムガスのような分子量の小さい気体だとわずかに漏れてくるということが起きます。これはヘリウムよりも更に分子量の小さい水素での使用を考えると致命的なため、型の整面や洗浄方法を見直す、電鋳時の電圧パターンを変える等々して試作を繰り返し、メーカーの努力もあって何とか解決することが出来ました。現時点でニッケル製直径1,200 mm・長さ800 mmの俵型、平均的な厚さは100 μm程度のライナー（図3参照）で、ヘリウムガスを用いたリーク試験（ヘリウムリークディテクターというごくわずかなヘリウムガスを検出できる装置を使用）で漏れが検出されない試作品が完成する段階まで進んでいます。この試作ライナーに複合材を成形すれば一応のタンクは出来上がりですが、この先にも色々な技術的課題が残っています。例えばライナー厚さは現在100 μm程度なのを軽量化のためリークを止められる最低限の厚さ、可能なら20～50 μm程度にまで落とし込んでいきたいと考えていますが、どこまで薄くしてガスバリア性が確保できるか、また薄くした際にどれだけの繰り返し使用に耐えられるかは今後の試作とデータの蓄積が必要な部分です。またフライトに使用するのであれば、タンク内部に飛行中の推進薬の揺動を押さえるための板等を設置する必要があり、これも製造時に大きな課題になります。当初はボトルシップのように出来上がったタンク内に分解した内装品を外から組み立てていくことも考えていましたが、現在は型の中に組み立てた内装品を最初から埋め込んでおいて電鋳を行うことを考えており、これについては今年度試作を行う予定となっています。また現時点ではライナーの品質確認のため別途作った型の上に電鋳でライナーを生成しリーク試験を実施していますが、将来的に製造プロセスの管理でライナーのピンホール発生が抑制出来るようになれば、先に複合材殻を成形してそれを型として内部に電気メッキしてライナー付複合材タンクとすることで製造コストを大幅に抑えることが可能とも考えています。このように将来的な可能性を秘めた電鋳ライナー複合材タンクの開発を進め、今後もロケットの軽量化に貢献していきたいと考えています。

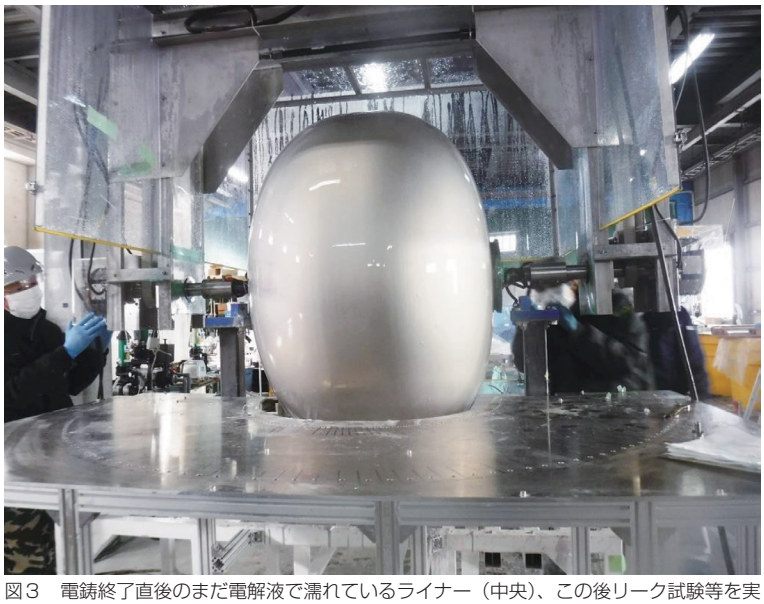


図3　電鋳終了直後のまだ電解液で濡れているライナー（中央）、この後リーク試験等を実施（2018年2月撮影。株式会社NEGENT（現株式会社IST）提供）

「はやぶさ２」着地点候補決定

図１　2018年8月17日に行われたLSS会合の集合写真。

「はやぶさ２」は順調にリュウグウの観測を続けています。通常はホームポジション（あるいはBOX-A）と呼ばれる高度20 km付近から観測を行っています。初めての高度を下げる運用は、７月20～21日に行われました。BOX-C運用と呼ばれるもので、ホームポジションから降下し、高度６kmくらいまでに達しました。また、８月１日には高度５kmほどの中高度運用を行いました。そして、８月６日からはリュウグウの重力を計測するための降下運用を行い、８月７日に高度851 mまでリュウグウに接近しました。（注：BOX-C運用と中高度運用は高度的には似ていますが、航法誘導の方式が異なるので呼び分けています。）

探査機運用においては、可能な限り搭載機器による観測も行っています。観測によってリュウグウの全体形状や表面地形の特徴だけでなく、温度分布やその変化、可視光・近赤外線による表面物質のスペクトルの特徴なども分かってきました。観測データは、小惑星そして惑星の理解へ大きな貢献をすることでしょう。それと同時に、これらのデータを使って、どこに着地するのかの検討も進められました。

着地点を決めることをLanding Site Selection（略してLSS）と呼びます。LSSは探査機本体がタッチダウンする場所だけでなく、小型ローバMINERVA-IIや小型着陸機MASCOTの着地点も選定します。まずは、日本側とMASCOTチーム（メンバーは主にヨーロッパの国より）がそれぞれ着地点を検討しました。そして、８月17日に日本および海外のメンバーが相模原に集まり、最終的な議論を行って着地点の候補を決めました（図１）。決まった着地点候補を図２に示します。タッチダウン、MASCOT、MINERVA-IIがうまく手分けして探査するように場所が選ばれました。

着地点を選ぶ条件は、まずは安全性です。これは、表面が平らで障害となるボルダー（岩塊）がないという条件です。さらに、探査機の姿勢条件やリュウグウ表面の温度条件、日照条件、探査機の運用性などが考慮されます。また、科学的な検討も重要です。これまで得られた観測データを総合すると、リュウグウの表面は異なる性質を持つ物質が混ざっていることが分かりました。さらに、場所ごとに大きく違うことはないということも分かりました。これは、表面のどこからサンプルを採取しても、リュウグウ全体を代表する物質が得られるということを意味しています。つまり、科学的な観点からは、タッチダウンを行う場所に特に制約はないことになります。

今回、LSSにおいて特に難しかった点は、リュウグウが多数のボルダーで覆われていることでした。可能ならば直径100 mの領域で平らでかつ大きなボルダーが無い場所を選びたいのですが、表面全体を見渡してもそのような場所は見当たりません。それで、最もボルダーが少なそうなところをいくつか選び、タッチダウン候補地点としました。MASCOTやMINERVA-IIについても、それぞれの条件を考慮して着地点が選ばれました。

着地点候補が決まると、スケジュールも検討できます。８月の時点で決まったスケジュールでは、まず９月11～12日にタッチダウンに向けた１回目のリハーサル降下を行います。そして、９月20～21日にはMINERVA-II1（３機のMINERVAのうちペアになっている２機）を、10月２～４日にはMASCOTを表面に降ろす運用を行います。その後、２回目のリハーサル降下を10月中旬に行い、１回目のタッチダウンが10月下旬という予定になりました。

ここで、１回目のリハーサル降下が非常に重要になります。リハーサル降下では、タッチダウン候補地点上空数十メートルまで降下して、その表面の様子を詳しく調べます。これで、安全にタッチダウンができるかどうかを判断するわけです。リュウグウというボルダーだらけの天体にいかにして確実にタッチダウンするか、それが今後の運用の焦点となります。もちろん、「はやぶさ」初号機では失敗してしまった小型ローバ・小型着陸機を確実にリュウグウ表面に届けることも重要です。

いよいよミッションの最初の山場にむけて緊張が高まってきました。　（吉川 真）

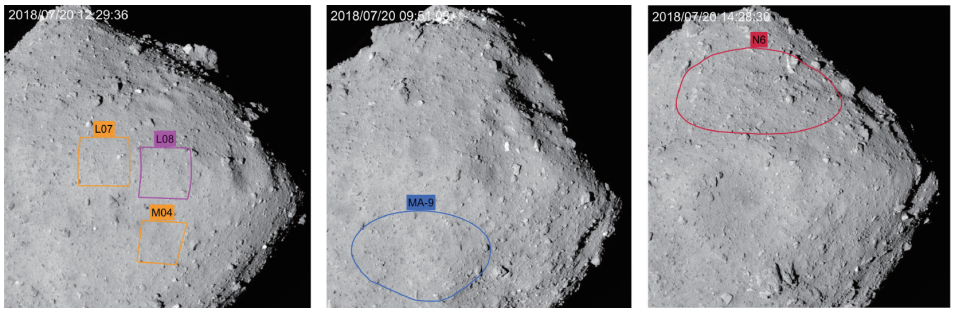


図２　着地点候補。L08と示された領域がタッチダウンの候補地で、L07とM04がバックアップとして選ばれた候補地である。MA-9がMASCOTの着地予定領域、N6がMINERVA-II1の着地予定領域になる。（©JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所）

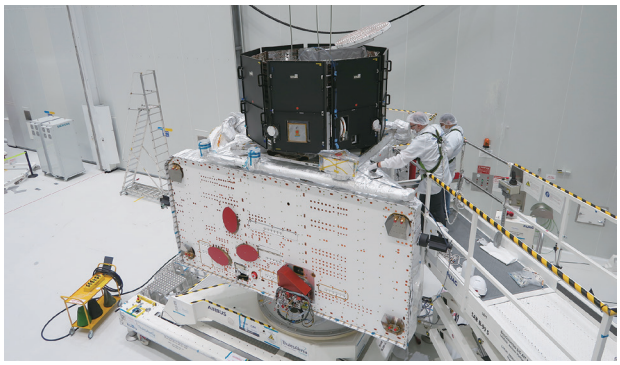
BepiColombo「みお」のMPOとの結合

「みお」(MMO) は打上げに向けて８月 20 日から８月 22 日にかけて MPO と機械的・電気的に結合されました。「みお」は７月２日に MOSIF の一部である MOSIF frame と機械的・電気的に結合されましたが、その後試験ケーブルを用いて、「みお」と MPO との間の電気的インターフェースの健全性確認や、全モジュールを電気的に組み合わせたシステム電気試験、打上げ手順の検証のためのカウントダウンリハーサル電気試験が行われてきました。

電気試験後、MPO への太陽電池取付、多層断熱材 MLI の取付などの作業が行われ、MPO の準備が整ったところで「みお」と MPO との結合が行われました。

結合作業は Thales Alenia Italia のチームにより実施されました。「みお」用の治具を使った作業もありましたが、一連の作業はスムースに運び、問題なく無事に終了しました。MPO と「みお」の間の間隔が狭く機械的結合作業を実施するにはアクセス性がとても悪いため、大変だったと思います。背が高くて腕の長い作業員が活躍していました。Thales Alenia Italia のチームには小柄な人もいて、作業によって使い分けているのかもしれません。

８月 20 日にクレーンを使って「みお」を吊り上げて MPO の上に降ろし、機械的に結合する作業、８月 21 日にコネクタ嵌合などの電気的結合作業が行われ、８月 22 日には MPO と「みお」に火を入れて「みお」との電気的チェックと「みお」の動作確認が行われ健全性が確認されました。



８月20日に行われた「みお」とMPOの結合作業の様子。

MPO、MTM の太陽電池パネルは探査機とは別に折りたたまれて搬入され、クリーンルームで展開されて探査機と結合されます。探査機と結合した後一旦折りたたんで展開試験を行い、再び折りたたんで最終的な打上げ前の状態にされます。太陽電池パネルの展開は重力の影響をキャンセルするためにパネルを吊り上げる治具を使用します。MTM の太陽電池パネルは 14 m もあるため、この吊り上げ治具は巨大なものです。

「みお」はこの後 MPO に結合された状態で MTM とともに推進剤充塡作業が行われます。　（小川 博之）

最新情報は「みお」プロジェクトホームページに掲載されています。
http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/index-j.html

第17回「君が作る宇宙ミッション（きみっしょん）」開催

７月 30 日から８月３日にかけて、高校生向け体験型イベント「君が作る宇宙ミッション（きみっしょん）」を相模原キャンパスにて開催しました。きみっしょんでは、「自ら考え、自ら決定し、自ら作業する」を理念として掲げており、高校生が主体的に宇宙ミッションの立案・検討を行います。

今年は、課題作文で選抜された高校生 18 名が３班に分かれ、総勢 34 名の大学院生のサポートのもと、ミッションにおける目的・手段・実現可能性等について検討しました。今回は、特に「定量評価」に力を入れ、実現可能性の検討について熱い議論が繰り広げられました。

８月２日の夕方に行われた最終発表会では、多くの職員・研究員の方々にご参加いただき、時間が足りないほどに活発な議論が行われました。プロの研究者の方々から鋭い指摘を受けたり、貴重なアドバイスをいただいたりと高校生たちは強い刺激を受けたことと思います。

きみっしょんでは、高校生の進路選択の幅を広げることを目的にミッション作成以外にも様々なイベントを企画しています。今年は、運用中の「はやぶさ２」の管制室を見学したり、SLIM（小型月着陸実証機）プロジェクトの澤井 秀次郎教授から衛星開発や自身の関わったプロジェクトに関する講義を受けたりと現場の雰囲気を感じられるような企画を実施しました。また、大学院生や若手研究者の研究を紹介する「院生ミニ講演」や高校生の進路相談の場として「座談会」を設けました。普段関わることのない大学院生や若手研究者との交流は、高校生たちが進路を考える上で大いに参考になったはずです。

第１７回きみっしょん参加者（赤ストラップ）とスタッフ（それ以外）。

一方で、運営に携わっている大学院生にとってもきみっしょんは大きな刺激になりました。私個人としては、普段関わりのなかった大学院生や職員、研究者の方々と一緒に一つの企画を運営するというのは新鮮であり、研究と両立しながらの準備には骨が折れましたが、非常に充実した時間を過ごすことができました。企画会議や事前準備で生まれる他愛もない会話や他分野の研究の話は、どれも刺激的で、自分の視野を広げることにつながったと思います。

最後に、きみっしょんの実施・運営にご協力いただきました皆様に御礼申し上げます。今後のきみっしょんにもご期待ください。　（小野寺 圭祐）

「平成29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

平成 29 年９月 10 日に公募を開始した「平成 29 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」公募は、平成 30 年１月 29 日に応募を締めきり６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。小委員会の評価結果は平成 30 年７月２日の宇宙理学工学合同委員会に報告され、そこでの議論を経て承認されました。７月４日に両委員会から宇宙科学研究所に送られた審査結果の答申を検討した結果、宇宙科学研究所は答申内容を研究所としての審査の結論とすることとし、７月 18 日に提案のあったワーキンググループに結果を通知しました。次のフェーズに進むことのできる提案は、紫外線分光撮像観測により太陽大気と太陽風の形成および太陽フレアーのもととなる太陽大気の不安定性発生のメカニズムの理解をめざす Solar-C_EUVST、広視野X線望遠鏡と赤外線フォローアップ望遠鏡で遠方宇宙でのγ線バーストと重力波対応天体の早期検出と位置同定をめざす HiZ-GUNDAM 計画です。今後、両提案に対してアイデア実現加速プロセス (Pre-PhaseA1b) を実施し、適切な時期にミッション定義フェーズ（Pre-Phase A2）に進んでよいかの審査（プリプロジェクト候補選定審査）を実施する予定です。「公募型小型・評価審査小委員会」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。（満田 和久）

平成30年度第一次気球実験

平成 30 年度第一次気球実験は６月 18 日から８月 10 日の予定で実施されました。本年度の国内気球実験では、理学観測３実験と工学実証１実験を実施することが計画されました。

6月 25 日に高層風の状態の確認と追尾受信システムの健全性確認のために測風ゴム気球を放球して放球準備を整え、その後各実験ともにほぼ予定通りに実験準備を完了したところですが、今年の北海道は7月上旬にまるで梅雨のような天候不順に見舞われ、またジェット気流が７月中旬から下旬まで大きく南向した状態となり、放球機会を見出せない状況が続きました。ようやく8月1日早朝に放球可能な高層風の状況となり、その高層風状況に最も適した B18-05「マルチクロックトレーサーによる大気年代の高精度化」実験の放球作業を開始しましたが、気球へのヘリウムガス注入直前になっても地上風が弱まらず安全な放球ができないという判断で実施を断念することとなりました。その後も地上気象および高層風の状況は改善せず、8月6日に第一次気球実験での全実験の実施を見送ることとなりました。本年度実施できなかった各実験の取扱いについては、今後来年度以降の大気球実験の選定の中で議論することとなります。

今年度は４～５月にオーストラリアでの気球実験を実施したため、北海道大樹町では今回の夏の実験のみとなりました。ご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝いたします。（吉田 哲也）

訃　報

大島 耕一 宇宙研名誉教授（享年 90 歳）におかれましては、平成 30 年８月５日(日)にご逝去されました。

大島 耕一先生は、昭和 32 年に東京大学理工学研究所に赴任されて以来、一貫して同じ処で研究と教育に従事された。研究分野は、実験と理論の両面にわたる流体物理の基礎的研究、波動伝播の研究、さらに宇宙開発の要請に応えた宇宙環境制御法の研究まで、国内外の学界において常に指導的役割を果たされてきた。特に多様な風洞装置や衝撃破管の開発に携わり、これを駆使して数々の先駆的な研究を行ったこと、宇宙環境制御法という新しい技術分野の基礎を確立したことなどが挙げられる。晩年は数値流体力学の発展に注力された。（小林 康徳）

高柳 和夫 宇宙研名誉教授（享年 91 歳）におかれましては、平成30年８月18日(土)にご逝去されました。

高柳 和夫先生は、ISAS の前身、東京大学宇宙航空研究所が設立された直後に着任された数少ないスタッフの一人である。先生のご専門は原子分子物理学、特に原子衝突を対象とするものであった。これは基礎物理学の一部であるが、広く天文学、宇宙科学、地球惑星科学などの基礎をなすものでもある。先生は戦後の日本において、この分野を独力で立ち上げ、大きなグループに育て上げた。また先生は宇航研が ISAS になるまでの様々なプロセスにおいて、その都度重要な役割を果たしてきた。その意味で、先生は ISAS の歴史の重要な一部である。（市川 行和）

お二方のご生前のご功績を偲び、心からご冥福をお祈り申し上げます。

連　載

第6回

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。近日参上「はやぶさ2」

HAYABUSA2

距離計測を拒むリュウグウ

「はやぶさ２」は、最終的に 2018 年６月 27 日に小惑星から 20 km の地点で、相対速度を０として小惑星到着となったわけですが、その直前のアプローチフェーズ運用においては LIDAR（LIght Detection And Ranging）と呼ばれるレーザ距離計を用いて、到着の５日前からリュウグウとの相対距離を計測しようと、毎日試みていました。

LIDAR は小惑星との測距を行うセンサで、科学観測機器であると共に、タッチダウンなどの小惑星近傍運用における航法誘導制御に用いる重要な航法機器です。軌道決定や画像航法によってリュウグウとの距離は推定可能とはいえ、実際に１m 以下の精度で相対距離が計測できることは航法において大きな意味を持ちます。我々は測距の成功を期待しながら毎日の運用で LIDAR の起動プロセスを繰り返しました。到着前にそれなりの余裕をもって測距ができるだろうと期待していましたが、実は全く測距ができず、何とか成功したのは到着を宣言した日の前日でした。

その後センサ設定値の調整を実施して、最終的には測距成功率がほぼ 100%になったのですが、測距に苦労した原因は、リュウグウが黒く、表面反射率が低いために、想像以上に LIDAR からリュウグウに照射したレーザ光の反射強度が低く、当初設定していた LIDAR のノイズ閾値などの設定値を再検討する必要に迫られたためでした。測距が困難な要因は表面反射率以外に、表面の凸凹の程度、リュウグウがコマのような形をしていることに起因するレーザが当たる斜面の傾きなどが関係していることが後の解析で明らかになってきています。

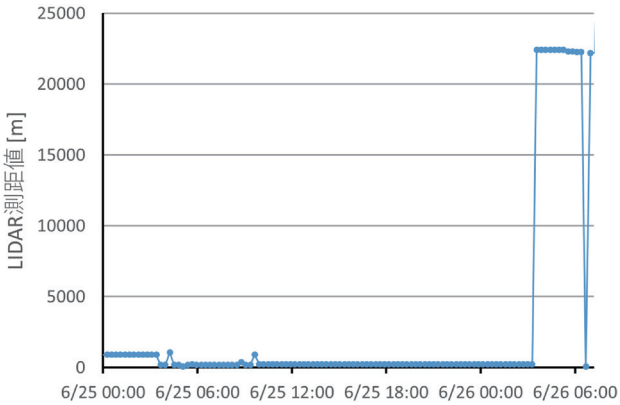


図　小惑星との距離約22kmで初めてLIDAR測距が成功した瞬間（縦軸：測距値）。最初は測距のための設定値を調整していて、なかなか成功せず正しくない値が得られている。測距値が22kmとなったところが測距に成功した瞬間である。距離計測成功後に距離の値がゼロになっているところがあるが、これは計測ができなかったことを示している。このような距離計測ができないということがほぼなくなるように、LIDARの設定値を調整した。

到着以降に続く、高度 6.5 km まで降下して高度維持をする中高度観測運用、高度 851 m まで自由落下で降下して重力を計測する重力計測降下運用においても LIDAR 測距はリュウグウの「気まぐれ」に対し更なる工夫を必要としましたが、最終的にタッチダウンのための測距の目途を立てることができています。このセンサを活用して信頼性の高いタッチダウンを目指したいと思います。

「はやぶさ２」AOCS 担当 **照井 冬人**（てるい ふゆと）

小惑星リュウグウの形状モデル

「はやぶさ２」の形状モデルチームでは、ONC-T（望遠の光学航法カメラ）で撮影した画像などをもとに、リュウグウの三次元形状を計測して、形状モデルを作成します。リュウグウの形状は、小惑星の成因や進化を考える上で基本的な情報であると共に、探査機の運用のためにも使われる、理学的にも工学的にも非常に重要な情報です。

われわれ形状モデルチームでは、２つの異なった方法で形状モデルを作成することにしています。１つ目の方法は、Structure-from-Motion（SfM）と呼ばれるステレオ視の手法の一種です。最近よく見かける、ドローンからの空撮の映像から地形や建物の形を復元するのにも同種の手法が用いられています。もう１つの方法は、Stereophotoclinometry（SPC）と呼ばれるもので、ステレオ視に加えて地形の凹凸と照明条件の兼ね合わせで生じる陰影情報も利用します。「はやぶさ」ミッションでの小惑星イトカワの形状推定を始め、多数の探査ミッションで使用された実績があります。

本稿執筆時点では、リュウグウへの到着後の最初の観測データ（主に高度 20 km から撮影された画像）を用いた形状の解析が終了しています。幸いにして２つの方法でほぼ同じ結果が得られており、正しくリュウグウの形状を復元できていることが確認できました。ポリゴンモデルの形で得られたリュウグウの三次元形状モデルを見ると、そろばんの珠のようなリュウグウの全体形状や、その表面にあるクレーターのような窪地、岩塊が再現できていることがわかります。今後、より高解像度の画像も取り込んで、詳細な形状モデルを作成していきます。

図　リュウグウの形状モデル。左がSfM、右がSPCで作成したもの。（©会津大学、神戸大学、JAXA）

会津大学「はやぶさ２」形状モデルチーム **平田 成**（ひらた なる）

宇宙エネルギー工学の今昔

JAXA 名誉教授
佐々木 進（ささき すすむ）

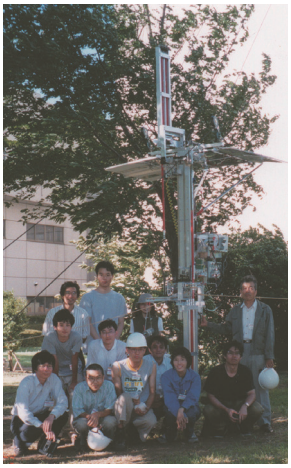
宇宙エネルギーと言えば、皆さん何を連想しますか？多くの人はいわゆる非科学的で怪しいスピリチュアルな“あれ”を思い浮かべるかもしれません。

ところで1981年に宇宙科学研究所が発足した当時、宇宙工学の中に宇宙エネルギー工学という部門が発足しました。宇宙エネルギー工学というのは何とも漠とした名称です。当時その部門の教授に就任されることになった長友信人先生は所長の森 大吉郎先生にこの部門で何をやれば良いか相談されました。答えは「君がやることが宇宙エネルギー工学である」という禅問答的なもので大いに面食らわれたそうです。長友先生は1970年代に米国で盛んに研究の行われた太陽発電衛星（SPS：Solar Power Satellite、宇宙空間で太陽エネルギーを用いて発電しその電力を地上に送る発電所システム）の構想に大変興味を持たれていたことから、SPSを宇宙エネルギー工学部門の研究の中心的な課題に据えられました。今では考えられないようなおおらかな経緯ですね。

さて、当時私は惑星研究系の河島研究室でSPSとは直接関係のない宇宙プラズマの実験室実験や宇宙実験をやっていましたが、1991年に縁があって長友先生の助教授となりました。理学の宇宙プラズマ分野から工学の宇宙エネルギー工学分野への鞍替えでとまどうこともありましたが、長友先生の指導を得て、それから退職までの20年以上も宇宙エネルギー工学（SPS）の研究に携わることになりました。

SPSは全体システムとしては宇宙という枠に収まりきれないエネルギーシステムである上、実用はかなり遠い将来のことと評価が定まっています。そのような途方もないシステムの研究を、宇宙研の宇宙科学研究という枠の中で実施するのはなかなか苦しいものがありました。長友先生は宇宙科学の枠を超えるために、宇宙科学分野以外の人たちも含んだグループを立ち上げ比較的近未来のSPS実証プラントの設計研究を実施されました。その活動はワーキンググループからSPS研究会を経て、現在の宇宙太陽発電学会に繋がりました。同じエネルギーシステムの将来構想である核融合の場合は、名古屋大学プラズマ研究所が生みの親となり核融合研究所が生まれ、さらにITER（国際熱核融合実験炉）に繋がっています。SPSの場合も学会の活動が発展して、今後SPS研究所の設立、国際共同実験プロジェクト発足の経過をたどるかもしれません。

私自身は宇宙科学研究の枠内で実施可能な小規模なSPS実証衛星のプロジェクトの立ち上げに邁進しました。最初は宇宙実験・観測フリーフライヤーSFU、その後は国際宇宙ステーション、大型衛星、最後は小型衛星での小型SPSを目指しましたが、苦節20年、奮闘虚しく実現には至りませんでした。ただしSPSは未来志向の基礎研究の位置付けであったため、宇宙研のメインストリームのプロジェクト研究のような慌ただしさはありませんでした。研究予算は小さくても自由な発想で職員や学生、他機関の方々とともに研究を行うことができ、大変有意義で楽しいものでした（写真）。宇宙研ではこのような自由な基礎研究の割合がだんだん小さくなってきているように感じます。蟻の世界では20%程度がぶらぶらして（いつの日か未来に役立つ基礎研究をして？）、組織の健全性を保っているようですが、宇宙研もその程度の割合で自由な基礎研究ができるのが望ましいですね。宇宙エネルギー工学という部門名は個人的には好きな名前でしたが、残念ながら2003年の組織変更で約20年の歴史を閉じました。ただし、SPSの研究グループは現在も健在で今後ともその活動に期待しています。


宇宙エネルギー工学部門で1999年頃製作されたSPS用トラス自動組み立てロボットと。長友先生は一番右、筆者は最前列左。

ところで冒頭に書いたように宇宙エネルギー工学部門には、怪しい“あれ”の方面の宇宙エネルギーについての問い合わせが時々ありました。目に見えない宇宙エネルギーは本当に実在するのですか？などです。このような異次元の問い合わせには正直困惑したものです。ところが退職の少し前あたりからなぜか“気功”に縁ができ、退職後は気功教室にも通うようになりました。気功を指導してくださった先生は既に亡くなられましたが、その後も教室に通い続け、異分野での苦節5年、今では宇宙エネルギー（？）を使って、家族のちょっとした体調不良くらいは治せるようになりました。ただしこれは本人の見立てですので、やはり怪しい“あれ”なのかもしれません。

JAXA Explore to Realize ISASニュース No.450 2018年9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 生田 ちさと
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。
デザイン制作協力／株式会社アドマス

編集後記

台風が数多く、経験の無いコースをたどったり、異常に暑かったり、大変な8月でした。そんな中あきる野と能代の実験場にお邪魔しました。ご対応いただいた方に御礼申し上げます。
（石川 毅彦）

*本誌は再生紙（古70%）、植物油インキを使用しています。
R70 古紙パルプ配合率70%再生紙を使用
VEGETABLE OIL INK