



水星磁気圏探査機「みお」の打上げ

国際水星探査計画BepiColomboの水星磁気圏探査機「みお」および水星表面探査機（MPO）を搭載したアリアン5型ロケットは、2018年10月20日10時45分28秒（日本時間）に、フランス領ギアナのギアナ宇宙センターより無事に打ち上げられました。（5ページ参照） ©ESA

宇宙科学最前線

技術者よ、設計しよう、仕様書を書こう

宇宙機応用工学研究系 教授

山田 隆弘（やまだ たかひろ）

私は、昨年度、工業標準化事業に対する貢献により経済産業大臣から表彰を受けました。編集委員会から私に与えられたテーマは、それについて解説せよというものですが、その技術的な内容については既に本ニュースの2004年6月号において「宇宙開発における標準化と情報化」という題名で執筆しています。そこで、今回は、私が標準規格などの文書の作成に力を入れている理由についてお話ししたいと思います。なぜならば、その理由をお話しすることは、「人工衛星のような複雑なシステムをいかに効率的に開発するか」という私のシステム工学的な研究の成果を解説することになるからです。

人工衛星のような複雑なシステムの開発は、必然的に大人数のチームで行うことになるのですが、効率的に開発を行うための一つの原則は、「チーム構成員の誰もが何かしら具体的な作業を担当し、その作業結果を文書などにまとめ、プロジェクトの中で機能させること」だと思います。ここで、具体的な作業には、計画立案、要求定義、設計、製造、試験、運用などが含まれます。チーム構成員の各人がこれらの作業の一つあるいは複数を担当し、それぞれの作業の結果をプロジェクトの中で実際

に利用できるような形で文書などにまとめることが効率的な開発には重要です（図1参照）。チーム内での意思統一や情報共有のためには、文書だけでなく会議やメールの交換も必要になりますが、そのような場合でも何らかの文書に基づいて行くと、議論から結論に至るまでの道筋を統一的に管理することができ、結果的には効率的になるからです。以下では、その仕組みについて実例も交えて解説していきます。

まず、何かを開発するときには、開発すべきものを具体的に定義する必要があります。その次には、チームで分担して開発を行えるように、開発の仕事をどのように分割すべきかを考えます。これは、Work Breakdown Structure（WBS）と言われているものを作ることに相当します。WBS内の各々の仕事は、時間軸に沿って定義された複数のフェーズに展開されます。WBSが作成できたら、WBSの各々の項目に対してその項目を担当する個人を割り当てます。この段階に至ったら、開発すべきものの定義、WBS、開発体制（担当者の割り当て）、その他の開発全体にとって重要な事項をまとめた開発計画書（プロジェクトの場合はプロジェクト計画書）を作

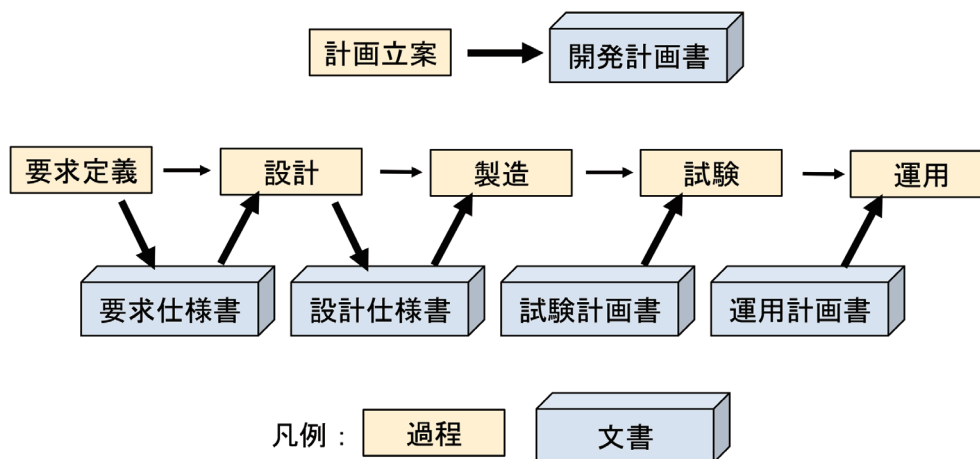


図1 開発過程と文書(例)

成します。この文書は開発全体の責任者が自ら書くべきです。

ここからは各論に入りますが、例えば、あるプロジェクトのあるフェーズにおいて、衛星に搭載される複数の計算機間のインタフェース（接続方式）の開発を私が担当することになったとします。そのインタフェースが満たすべき要求条件は、それ以前のフェーズで既に規定されているはずですから、その要求条件を満たすインタフェースを既存のインタフェースも参考にしながら設計します。最終的にインタフェースが確定したら、その結果を「搭載計算機間インタフェース仕様書」などの文書として発行します。

この作業は私が一人でやるのではなく、そのインタフェースを使用する人たち（すなわち、搭載計算機の開発担当者）やプロジェクト内部の他の関係者と調整しながらやるのですが、そのような作業が効率的に行えるように、私は開発が始まったらすぐにインタフェース仕様書の目次を作るようにしています。関係者と調整を行いながら決定した事項があれば、それをインタフェース仕様書の該当部分に記述し、関係者間で回覧し確認してもらいます。関係者が問題を指摘する場合は「インタフェース仕様書のこの部分にこのような問題がある」という形で指摘してもらいます。調整の上で解決策が決まれば、それを文書の該当部分に記入します。このようなサイクルを何度か回せば、調整は完了し、それと同時にインタフェース仕様書も完成します（図2参照）。

プロジェクトの節目ごとに設計審査などの審査が実施されますが、これは、作成した文書を、上で述べたようなプロジェクト内の関係者よりも広い範囲の人たち（例えば、他のプロジェクトで同様の開発を行ったことがある人など）も含めて確認してもらうという作業です。従って、審査だからといって特別な作業を行う必要はなく、それま

で日常的に行っていた確認作業を広い範囲の人達と行う、というだけのことです。

「搭載計算機間インタフェース仕様書」が完成したら、プロジェクトとしての次の作業は、このインタフェース仕様書に適合するように各々の搭載計算機を設計し、製造することです。その次は、製造された搭載計算機がインタフェース仕様に従って正しく接続できるかどうかを試験することですが、この試験も私が担当するとします。インタフェース仕様書の場合と同様に、私はまずインタフェース試験計画書の目次を作ります。そして、関係者と調整を行いながら、試験計画書の内容を作成していきます。それが完成したら、次はインタフェース試験手順書を作成します。試験手順書が完成したら、それに従って試験を実施し、インタフェース試験報告書を作成します。

簡単な実例を用いて開発の方法を文書整備の観点から説明してきましたが、文書整備を重視するのには幾つかの理由があります（図3参照）。第1の理由は、作業の効率化です。日本では欧米と比べて、その場限りの使い捨ての資料を調整用に作成する機会が多いように思いますが、作業の初めから文書を書いていれば、その文書を抜粋することによって調整用資料を作ることができます。また、調整の結果も、同一の文書の該当部分に書き加え、それを確認するようにすれば、最小限の資料で作業が進みます。

第2の理由は、作業の明確化です。上で述べたように、開発途中の議論において「この文書のここをこうすべきだ」と議論することによって、何を議論しているのかが

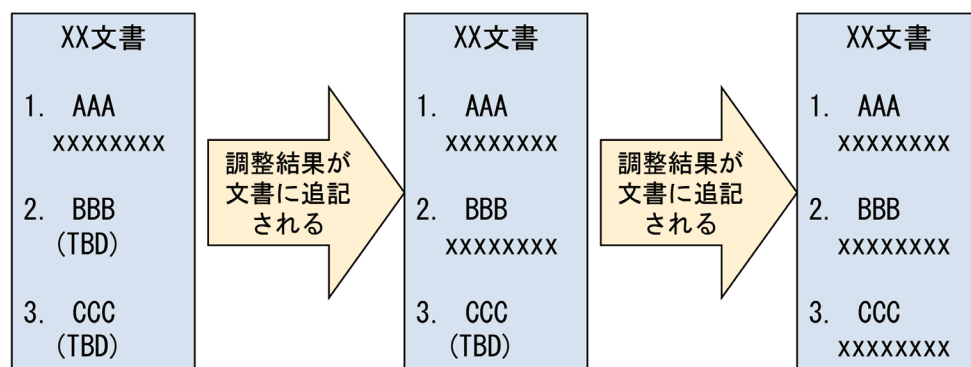


図2 文書を基礎とした開発（TBDは未決定という意味）

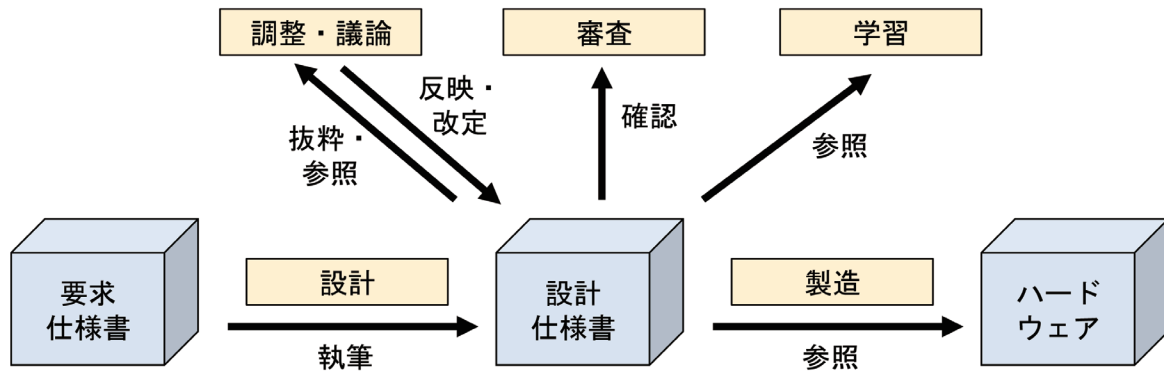


図3 文書の効用

明確になります。また、議論の結果を文書の内容に反映させることによって、議論の結果も明確に示せます。

第3の理由は、各担当者の書くべき文書を指定することによって各担当者の責任範囲を明確に示せることです。例えば、インタフェース担当者は、インタフェース設計がその仕事の中心であったとしても、インタフェース仕様書を完成させることによってその責任を果たしたことが示されることになるのです。

文書整備を重視する最後の理由は、文書を蓄積することによって知識を蓄積することができることです。技術の一般論に関しては、教科書や論文を読んで勉強することもできますが、具体的な設計の方法（計画立案の方法なども含めて）を勉強するには、仕様書（計画書なども含めて）を読むのが最も有効な方法です。私自身、インタフェース設計の方法や試験計画立案の方法は、様々なインタフェース仕様書や試験計画書を読んで学んできました。ただし、文書にも出来の良いものとそうでないものがあり、「どのような文書が良い文書であるか」をよく考えながら読む必要があります。

ところで、開発フェーズによっては、開発の結果は文書ではなく、図面であったり、ハードウェアであったり、コンピュータのプログラムであったりします。本稿で私が「文書」と呼んでいるものは、正確に言えば「明確な形があり、プロジェクトの中で機能するアウトプット」となります。プロジェクトにとって重要なことは、各担当者が（文書であれハードウェアであれ）明確な形のあるアウトプットを作成し、それがプロジェクトの中で機能することです。ハードウェアよりも文書の方が重要であると考えているわけではありません。従って、本稿の題名の「設計しよう、仕様書を書こう」は、必ずしも正確な表現ではありませんが、上記の考えを象徴的に表したものであるとお考えください。

さて、これからは応用編です。日本政府が制定した宇宙基本計画では、太陽系探査をプログラムの行的に行うべきということが書かれています。ここで、プログラムとは、複数の関連したプロジェクトを体系的に実行することを意味しています。個々のプロジェクトについては、プロジェクト計画書を書くべきということを本稿の初めの方で述べましたが、プログラムについてもプログラム全体の計画を規定するために「太陽系探査プログラム計画書」

のような文書を作成すべきです。また、プログラム全体の責任者（プログラムマネージャ）も定め、プログラム計画書は、プログラムマネージャが執筆すべきです。

しかし、現時点では太陽系探査プログラムの内容は定まっていませんので、プログラム計画書はまだ書けません。となると、プログラムの内容を決めるための活動を行う必要があります。まずは、プログラムの内容を決めるための計画を立案しなければなりません。例えば、(1) プログラム全体の目標の候補をいくつか定める、(2) それぞれの候補について科学的意義や技術的難易度などについて評価を行う、(3) その評価の結果に基づいて一つの目標を決定する、(4) その目標を達成するためのプログラムの内容を詳細化する、などのステップを定義します。次に、各々のステップを誰がいつからいつまで行い、どのようなアウトプットを出力すべきかを定めます。このようなプロセスについても「太陽系探査プログラム策定計画書」とでもいうような文書を作成して明文化すべきですし、そのプロセスの責任者も任命すべきです。

結構たいへんですが、このようなことを行わなければ、太陽系探査プログラムを実現することは不可能です。もちろん文書だけで太陽系探査プログラムが実現するわけではありませんが、個々のプロジェクトあるいはプログラムの実施と並行して「どのようにすれば複雑なプロジェクトを効率的に実現できるか」についても様々な観点からの研究を行う必要があると思います。本稿でお話したのは、そのような研究の一つの成果です。

文書を基礎とした開発の方法論について述べてきましたが、ここで書いてきたことは、私が実際に様々なプロジェクトで実践してきたことに基づいています。しかし、誰が読んでも正しく理解してもらえるような文書を書くことは容易ではありません。なぜならば、一つの意味を表現する方法には複数のものがあり、また、一つの表現が複数の意味に解釈される可能性もあるからです。意味と表現を1対1に対応させることができれば、文書の作成や理解は楽になりますし、機械によって文書を処理することも可能になるでしょう。現在の私の最大の研究テーマは、文書の前提となっている知識を陽に表現することによって機械でも処理できるような文書を作成する方法についてですが、これについても、いずれどこかでお話したいと思っています。

「はやぶさ2」: MASCOT分離運用とタッチダウンリハーサル運用

9月のMINERVA-II1分離の運用に続いて、10月は「はやぶさ2」プロジェクトメンバーにとって非常に緊張する運用であるMASCOT（マスコット）分離運用と、2回のタッチダウンリハーサル運用がありました。

10月3日、ドイツ・フランスによって開発された小型着陸機MASCOTの分離運用を行いました。探査機は高度約51mまで降下し、10:57:20（日本時間）にMASCOTを分離しました。探査機に搭載しているカメラで、MASCOTが降下していく様子の撮影にも成功しました（図1）。MASCOTは無事にリュウグウ表面に着地し、搭載されたバッテリーが切れるまで約17時間にわたって動作し続けました。一方、探査機の方はすぐにはホームポジション（高度20km）には戻らず、約1日間高度3km付近でホバリングを行いました。これは、MASCOTとの通信を確実に行うためです。MASCOTからのデータはすべて探査機に送られ、日本を経由してドイツのMASCOTチームに送られました。その後、MASCOTチームにより、データの解析がどんどん進んでいるようです。

このMASCOTの運用では、タッチダウンの候補地点付近の、詳しい観測も行いました。その結果、候補地点の中で直径が20mくらいの領域に、大きさが50cm以上の岩塊がほとんどないことが確認でき、そこをタッチダウンの有力な場所とすることになりました。しかし、その領域の大きさが20mくらいしかないのので、実際にタッチダウンを行うためにはさらに検討が必要です。特に探査機の航法誘導の精度の検討が重要になります。当初の予定では、10月中旬には2回目のタッチダウンリハーサルを行い、10月下旬に最初のタッチダウンを行う予定でしたが、タッチダウンは行わずに代わりに3回目のリハーサルを行うことにしました。

10月14日～16日、タッチダウンのための2回目のリハーサルとなるTD1-R1-Aが行われました。1回目のタッチダウンリハーサルTD1-R1（9月10日～12日）では、LIDAR（レーザ高度計）の問題により高度600mまでしか降下できなかったのので、再度行うものです。探査機は10月15日に高度22.3mまで降下し、主目的であったLRF（レーザ・レンジ・ファインダ：近距離の高度計）の特性を確認することができました。また、タッチダウン候補地付近の画像や、これまでで最高解像度となる画像も取得できました（図2）。運用の名称ですが、TD1-R2とはせずにTD1-R1-Aとしています。これは、元々計画していたTD1-R2と混同することを避けるためです。

10月23日～25日には、3回目のリハーサルであるTD1-R3が行われました。TD1-R1-Aでは、LRFで距離計測はしましたが、それを探査機の制御には使っていませんでした。TD1-R3では、LRFの計測値を探査機の制御に使ってみることが目的です。また、条件が整えば、ターゲットマーカの投下も行うことにしました。



図1 探査機から分離直後のMASCOT。広角の光学航法カメラ（ONC-W2）で2018年10月3日、10:57:54（日本時間）に撮影。（画像クレジット：JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所）

図2 望遠の光学航法カメラ（ONC-T）によって撮影されたこれまでの最高解像度の画像。解像度は4.6mm/ピクセル。撮影時刻は2018年10月15日、22:40（日本時間）で、高度約42mからの撮影である。（画像クレジット：JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所）

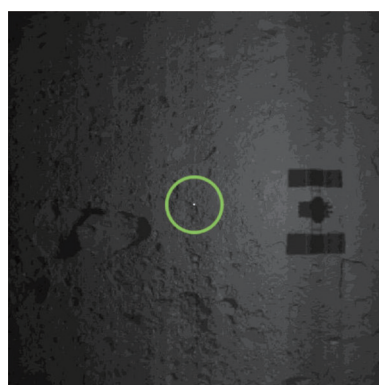
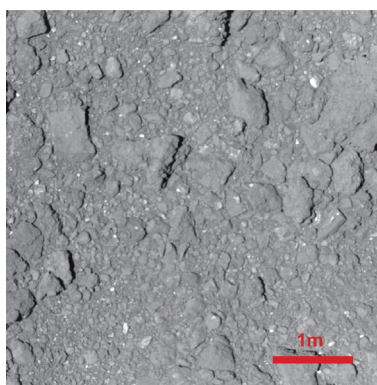


図3 リュウグウ着地後のターゲットマーカ（○印の中の白い点）。広角の光学航法カメラ（ONC-W1）によって2018年10月25日、11:47（日本時間）に、リュウグウ表面から約20mの高度から撮影。

実際のタッチダウンにより近づいたリハーサルとなります。探査機は、10月25日に高度約12mまで小惑星に接近しました。そして、ターゲットマーカを分離し、ターゲットマーカが小惑星表面に着地したことを確認し（図3）、さらにターゲットマーカを追跡することにも成功しました。

MINERVA-II1に続いてMASCOTが無事にリュウグウに届けることができたことで、プロジェクトメンバーは非常に安堵しました。MASCOTはドイツ・フランスを中心に多くの海外のメンバーが関わってきたものですから、万が一にも失敗は許されないものだったからです。また、ターゲットマーカの中には約18万人の名前を刻んだシートが入っています。その約18万人の名前をリュウグウに無事に届けることができたということにもほっとしました。

いよいよ最大の山場であるタッチダウンに向けて、集中して作業を進めることになります。（吉川 真）

さ～て、そろそろ行くか。—BepiColombo水星探査機、ついに宇宙へ—

2018年10月20日10時45分28秒(日本時間)、国際水星探査計画 BepiColombo の水星磁気圏探査機「みお」および水星表面探査機 MPO を搭載したアリアン5型ロケットがついに打ち上げられました。1997年にワーキンググループが発足して以来、実に21年を経てBepiColomboが宇宙へと旅立っていったのです。当初からこの計画に携わってきた先生方や関係者のみなさまにとっては、まさに成人を迎えた我が子が独り立ちするのを見守るようなお気持ちだったでしょう。この場を借りて、全関係者のみなさまにまずは打上げ成功の御礼を申し上げたいと思います。

筆者は大学院生として「みお」搭載の水星ナトリウム大気カメラ (MSASI) および MPO 搭載紫外線分光観測装置 (PHEBUS) の開発チームに加わって以来、12年ほど BepiColombo に関わってきました。打上げ時には探査機班の一員としてギアナ宇宙センターにて準備に参加していました。余談ですが、仏領ギアナへ発つ前にプロジェクトマネジメント講習 (初級) を受講したのですが、グループワークの課題が「打上げ2カ月前にロケットに不具合が見つかった。打上げを延期するか否かを含め、どう判断するか?」というものでした。ここでは詳細は省きますが、BepiColombo の打上げ準備を進めていく中でまさにそういった緊張感を現場で体感することができたのは人生でそう得ることのできない貴重な経験だったと思います。リフトオフの瞬間、筆者は探査機チェックアウト室で「みお」の状態をモニタしていました (ただし「みお」はコールドローンチ)。アリアン5型ロケットの飛行状況が正常であることを示すフランス語のアナウンスが館内に響くなか、ESA や Airbus DS、Thales Alenia Space Italy の仲間たちと共に歓声を上げ歓喜のハグ。ああ、国際協力とはこういうことなのかなと、肌と魂で感じました。ちなみに我々とともに打上げを見守った川崎大師のダルマは海外勢に大人気で、打



打上げ成功後のギアナ宇宙センター・探査機チェックアウト室での記念写真。ESA、Airbus DS、Thales Alenia Space Italy、CSGのチームと、両目の入ったダルマとともに歓喜の一枚 (ダルマを持っているのが筆者)。

上げ直前の緊迫した探査機チェックアウト室の空気を和らげてくれました。これは今後の国際協力プロジェクトへの申し送りに加えたいと思います。

「みお」の初期運用はこれからです (本稿はそのためドイツへ向かう機内で執筆)。その後には9回の惑星スイングバイと7年間のクルーズが待っています。水星への旅はまだこれからであり、本格的な科学データが得られるのも7年後です。しかし、これまで私がBepiColomboの開発や打上げの現場にいて感じるのは、すでに得られた大切なものがあるということ。「大切なものは、ほしいものより先に来た」とはジン・フリークスの言葉ですが、まさにその通りだと感じました。「国際協力」とは単なる言葉ではありません。お金でもありません。それは人と人との信頼関係であり、血が通い温もりを感じて初めて意味をもつのではないのでしょうか。このチームと出会い、ともに働き、打上げの瞬間を彼らと見守ることができたことに心から感謝しつつ、これからの長い旅路に向けて改めて気を引き締め、覚悟をもって挑もうと思います。(村上 豪)

国際宇宙探査に関するワークショップ開催

JAXA では、月や火星を対象に国際協働による宇宙探査の議論が世界的に活発に行われていることに対応して、本年7月に国際宇宙探査センターを新規に設置し、国際宇宙探査における日本のシナリオ等の検討を進めています。宇宙理工学合同委員会では、昨年9月に国際宇宙探査専門委員会を設置し、宇宙科学コミュニティに対し国際宇宙探査に関する情報共有を行うこと、国際宇宙探査計画に宇宙科学コミュニティの意見を反映すること等を主たる目的として議論を行っています。

2018年9月25日に宇宙科学研究所において、国際宇宙探査に関するワークショップ (WS) を開催し、国際宇宙探査専門委員会での議論を報告するとともに、宇宙科学コミュニティからの国際宇宙探査への期待や国際宇宙探査のインフラを活用した将来ミッションについて



活発なパネルディスカッションの様子。

議論を行いました。大学、研究機関、メーカ等から約140名が参加し、予定時間を超過してパネルディスカッションが続くなど活発な意見交換が行われました。

本WSは2部構成で行われました。前半は、国際宇宙

探査の状況、月極域探査計画、月サンプルリターン計画、火星衛星探査計画、月・惑星データの取扱い、人材育成の方策等について報告がありました。後半は、意見交換を主として、(1) 近未来の月探査に関する総合討論、(2) 月探査の将来と火星探査に関する総合討論、(3) 探査工学の課題に関する総合討論、の3つのパネルディスカッションが行われました(写真)。

月探査については、月極域探査が科学観測のみならず技術の実証の場として有用である、長期日照領域である極域をベースにして長期的月探査を展開することが日本の特色になりうる、等の意見が出ました。月近傍ミッショ

ン計画(Gateway)を活用したサイエンスや小型探査機の活用について、網羅的な観測や挑戦的な探査という点での期待も出ました。火星探査においては、地下探査に関する意見が多くあり、今後火星探査のシナリオ検討を加速することになりました。また、国際宇宙探査による人材育成の重要性も指摘されました。

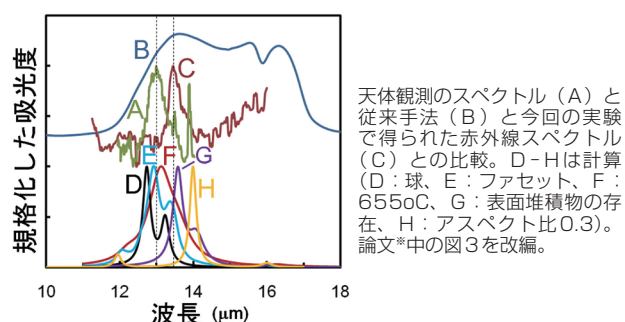
本WSを通じ、各探査計画への参加を含めて国際宇宙探査への関心が高いことを改めて認識しました。また、継続した情報発信や意見交換の場の提供の要望が多く寄せられ、頻繁な会合開催と密なる意見交換の必要性を痛感しました。(国際宇宙探査専門委員会委員長 久保田 孝)

S-520 30号機の成果について

鉱物微粒子が吸収する赤外線波長の位置や強さは、その種類や温度、形、大きさなどに応じて敏感に変化するため、赤外線スペクトルは鉱物の指紋に例えられます。微粒子の形や大きさは形成環境を敏感に反映するため、天体観測で赤外線スペクトルが得られれば、そこに存在している鉱物微粒子(ダスト)を特定できるだけでなく、その物理的、化学的情報を引き出すこともできます。そのため、赤外線スペクトルは、138億年の宇宙の歴史における物質進化を理解するための強力なツールと言えます。しかし、得られる赤外線スペクトルの特徴は、既知の鉱物や実験合成物のスペクトルとは合致せず、赤外線スペクトルの特徴を最大限利用するには至っていません。

例えば、宇宙でダストが生成する現場である晩期型巨星の赤外線スペクトルを測定すると、その波長の中で13 μm 付近に0.5-1.1 μm の幅を持った特徴的なバンドが見られます(図中A)。この起源物質として、高融点で、かつ豊富に存在する元素からなる酸化アルミニウムが提案されています。しかし、実験から得られる酸化アルミニウムの13 μm バンドは4 μm を超える広い幅を示すため(図中B)、確証が得られていませんでした。

そこで我々は、2015年9月11日に観測ロケットS-520 30号機を内之浦宇宙空間観測所から打ち上げ、微小重力環境下で酸化アルミニウムのガスを発生させて、冷却の過程で微粒子が生成する様子を赤外線スペクトルで測定しました。観測ロケットを用いた微小重力環境で



は、対流を抑えることでダストの生成過程と物理的に類似の実験ができ、赤外線スペクトルの変化をより長時間にわたって取得できるなどのメリットがあります(ISAS ニュース 2018年5月号「宇宙科学最前線」参照)。その結果、晩期型巨星で酸化アルミニウムの微粒子が作られる過程を再現でき、理論的には予言されていたものの、実験的には再現できていなかった13 μm バンドと同様の0.5 μm 程度の狭い幅を持つバンドの取得に成功しました(図中C)。その後3年にわたり、試料回収が行えない点を補完するための地上実験や、航空機を用いた微小重力実験による再現実験とデータ解析などを行い(図中D-H)、本年9月、ついに論文として公表することができました*。今後、他の鉱物に対して同様の実験を行うことで、宇宙ダストの生成・成長過程を同定し、物質進化のストーリーを記述できるようになると期待しています。(北海道大学 木村 勇気)

* S. Ishizuka, et al. Nature Communications 9, 3820 (2018)

計 報

堀内 良 宇宙研名誉教授(享年91歳)におかれましては、平成30年10月10日にご逝去なさいました。

堀内 良先生は、昭和34年に助教授として東京大学航空研究所に赴任されてより、一貫して金属材料分野における基礎から開発までの研究を行ってこられた。ライフワークである金属材料の強化機構に関する基礎的研究では、高温における変形を律速する転位論の機構に関する一連の研究成果を創出し、軽金属学会の発展に尽くしてこられた。ロケット・科学衛星用材料の開発研究では、科学衛星最初期のマグネシウム溶接構造の開発やハレー彗星探査における固体モーターチャンバ用超高張力鋼の開発などをはじめとして、日本の宇宙開発に大きく貢献してこられた。並行して大学院学生の指導に熱意を注ぎ、多数の俊英を育ててこられた。(佐藤 英一)

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。

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

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2



合運用

2018年11月～12月、リュウグウは地球からは太陽の向こう側に見えることになります。このような状況のことを「合」と呼び、太陽の影響で「はやぶさ2」と地球との通信ができなくなります。「はやぶさ」ミッションでは、イトカワに向かう途中の公転軌道において合が起りましたが、小惑星でホバリングをしているときに合が起こるのは今回が初めてです。合の期間は、合運用遷移軌道をとることになりますが、軌道制御量がなるべく少なくなり、かつ探査機が常に視野にリュウグウを捉えることができる、太陽方向に100 kmほど延びた軌道になっています。

探査機が合運用遷移軌道上にいる期間は約30日間になります。まず、準備期間（2018年11月18日～29日）において、2018年11月23日に合運用遷移軌道に投入するための軌道制御（COI：Conjunction Orbit Insertion）が行われます。この期間中にSEP角（太陽—地球—探査機がなす角）は6度から3度まで減少しますが、通信はまだ可能です。次の軌道制御（TCM-1：TCM=Trajectory Correction Maneuver）は2018年11月30日に行います。また、合の後は太陽、地球、小惑星の位置関係が鏡像のように反転するのに対応するために、探査機の姿勢を180度回転させる姿勢制御も行います。次に、合期間（2018

年11月30日～12月21日）ですが、この期間ではSEP角が3度以下となり、探査機との通信が難しくなります。軌道制御は行いませんが、探査機との通信は試

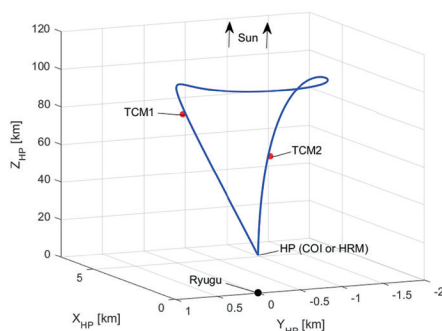


図 ホームポジション座標系での合遷移軌道。この座標系ではZ軸が小惑星から地球の方向になるが、太陽もZ軸方向に位置することになる。

期間は「はやぶさ2」からの電波を用いて太陽の周囲を調べるための貴重な機会となります。これを過ぎると復帰期間（2018年12月22日～2019年1月1日）となります。2018年12月25日に軌道制御（TCM-2）が行われ、さらに2018年12月29日にホームポジションへ復帰する軌道制御（HPR：Home Position Recovery）が行われます。

「はやぶさ2」ミッション解析担当 Stefania Soldini（ステファニア・ソルディニ）
（日本語訳 吉川 真）

虎視眈々と準備を — サンプラ

2018年10月25日、「はやぶさ2」は今年最後のタッチダウン運用リハーサル真っ最中。徐々に高度を下げリュウグウに近づいています。このリハーサルで得られた成果、理学データを基に、いよいよ本番に向けた最後の準備が始まります。

想えば長い道のりでした。「はやぶさ」からの理学目標変更に伴う設計変更、オールメタルのコンテナシール機構の開発から始まって、フライト品開発中の清浄度維持。リュウグウから採ってきたサンプルを汚さないために、サンプルに触れる部品はサンプラチームで精密洗浄し、組立て時、試験時、射場作業中에서도常にサンプラチームが細心の注意を払って清浄度維持に努めました。

工学的な観点では、サンプラホーンがリュウグウに接触した場合の挙動をシミュレーションするためにホーンのパネ特性を計測、また、「はやぶさ2」で追加した数ミリメートルサイズの粒子をホーン先端にひっかけて持ち上げる折り返し部品の試験。ドイツまで行って、落下棟を使った微小重力試験でその有効性を確認しました。サンプラは初号機と基本的な設計は同じといえども、開発要素は盛りだくさんで手のかかる子でした。

2014年12月に打ち上げた後、しばらくサンプラチームとして出番はなかったのですが、実際に動かす日が着々

と近づいています。最後の確認試験として、10月のリハーサルで得られた表面の詳細画像解析結果を基にターゲット土壌を準備し、それに対する弾丸射出試験を計画しています。この試験でリュウグウに弾丸を撃ち込んだときのサンプルの挙動を確認することができます。

サンプラチームの役目はリュウグウでの運用だけではありません。裏ではサンプルが帰ってきた後の準備が始まっていて、地球に帰還したカプセルの回収後に必要な装置の開発もスタートし、慌ただしい毎日です。

タッチダウン本番に向けて、さらにサンプルが地球に帰ってきた後に向けて、サンプラチームの物語はまだまだ序章、リュウグウから持ち帰った玉手箱を開けた後も物語は続きます。

「はやぶさ2」サンプラ担当 澤田 弘崇（さわだ ひろたか）

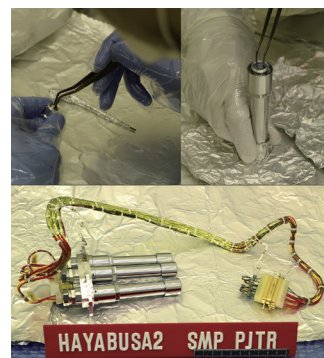


図 種子島宇宙センター 第1衛星組立棟にて、プロジェクタイル（弾丸）を装填している様子。

安全かつ低コストの ハイブリッドロケットで 宇宙旅行を実現する。



宇宙飛行工学研究系 助教

北川 幸樹 (きたがわ こうき)

1978年兵庫県姫路市生まれ。2007年、東京都立科学技術大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士(工学)取得。2007年、(株)IHI航空宇宙事業本部入社。2010年、JAXA宇宙科学研究所着任。現職。2010～2013年、総合研究大学院大学物理科学研究科助教を併任。2014年から、東京大学大学院工学系研究科助教を併任。

▶ ハイブリッドロケットの研究がライフワーク

——宇宙研ではどんな研究を？

宇宙研で研究を始めて9年目。ハイブリッドロケットの研究や固体推進系の研究、イプシロンロケットの開発などに携わってきました。特に、「ハイブリッドロケット」の研究は学生時代から一貫して取り組んできました。ロケットが推進力を得るには、「燃料」と「酸化剤」の両方が必要です。固体ロケットはこの2つを混ぜ合わせて固体状の推進薬にしたもので、火薬という分類になり、1度火をつければそのまま最後まで燃え続けます。一方、液体ロケットは燃料・酸化剤ともに液体で、燃焼器に両者を噴射し、混合させて燃焼させます。これらに対してハイブリッドロケットは、一般的には酸化剤が液体で、燃料が固体です。その最大の特長は優れた安全性にあります。酸化剤と燃料が混合していないため固体燃料の表面でしか燃焼しないので、燃料にヒビが入っていたり、酸化剤が漏れたりするなどの不具合が発生しても、爆発的に燃焼することはありません。本質的に非爆発性の推進系であると言えます。従来のロケットは、安全性を担保するためにコストがかかるため、ハイブリッドロケットは低コスト化にも有効です。反面、燃えにくいという欠点もあり、いかに効率よく燃やすかが課題となります。

私は、燃料にプラスチックやワックスなどの一般的な危険物ではない高分子材料を使い、酸化剤に液体酸素を使うハイブリッドロケットエンジンの研究を進めています。特に、燃えにくさを解決するために、酸化剤に旋回を与えて噴射し、固体燃料とよく混ぜるようにして燃やそうという方法を研究しています。安全でしかも低コストで飛ばせるハイブリッドロケットは、理論的には昔からある技術で、人を乗せるには最も適しています。実際に性能を出すのが極めて難しく、未だ実用化には至っていないものの、米国の民間企業が計画している宇宙旅行用の弾道飛行ロケットには、ハイブリッドロケットが採用されています。ハイブリッドロケット以外では、2013年からイプシロンロケットの開発に参加し、強化型イプシロンロケット開発では、新規開発の第2段

モータM-35の開発を担当し、開発最終段階の地上燃焼試験では実験主任を担当しました。また、基礎研究としては、現在、固体ロケットモータのレーザー点火の研究にも注力しています。

——注目している技術は？

「再使用ロケット」です。使い捨てではなく、地上に戻ってきたらまた使おうというコンセプトです。イーロン・マスク氏のSpaceX社が液体ロケットでの再使用技術を着々と実現していますが、来るべき宇宙旅行時代には欠かせない技術です。将来的には宇宙輸送系も航空機と同様に、故障が発生しても帰還でき、何度も使用できるようにしていくべきと考えています。再使用技術が確立されたら、ハイブリッドロケットに置き換えることで故障許容性が格段と高くなります。人が安心して安く宇宙を旅するために欠かせない技術であると考えており、大きな関心を寄せています。

▶ 宇宙飛行は一旅行者として楽しみたい

——宇宙に興味を持たれたのはいつから？

宇宙への憧れは子どものころからありました。きっかけは映画で、『スター・ウォーズ』や『2001年宇宙の旅』などを観て「宇宙って不思議な空間だな」と思ったのが始まりです。小学校6年生の時、秋山豊寛さんが日本人で初めて宇宙へ行き、その後、毛利衛さんも続きました。こうした活躍の報道に触発され、「自分も宇宙に行ってみたい」という思いがより強くなりました。ただ、スペースシャトルやロケットの事故も多発しており、現状のロケットにはとても乗りたいとは思えませんでした。大学に進学して、ハイブリッドロケットに出会い、この技術を使って自分自身が安心して乗れるロケットを作りたいと思うようになりました。博士課程までハイブリッドロケットの研究に没頭し、卒業後は(株)IHIに就職しました。そこでは、ロケットではなくジェットエンジンの燃焼器やアフタバーナの研究開発をしました。燃焼工学と推進工学を専門としていましたので、非常に興味深い仕事でした。2年ほど勤務して、宇宙研に転職し再びハイブリッドロケットの研究を始めました。民間企業の場合は、ただ良いものを作ればいいわけではありません。新しく良い製品であると同時に、利益につなげなければならない。本当に自分が作りたい物を作る環境ではありませんでした。ですから、目先の利害に関係なく自分の良いと思う研究に没頭できる宇宙研に来た時は、本当にいい環境に身を置くことができたと思いました。

私自身、宇宙飛行士ではなく旅行者として宇宙を楽しみたいと思っています。出張より旅行の方が楽しいですから。宇宙旅行の費用を安くし、安心して行けるように、それを実現するために、日々ハイブリッドロケットの研究を進めています。同じように考えている方がおられるようでしたら、是非一緒にハイブリッドロケットの研究をしませんか？



ISASニュース No.452 2018年11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

読書の秋にISASニュースはいかがだったでしょうか。わからない単語を調べたり、関係する本を読むのにも秋の夜長はピッタリです。今月の宇宙科学最前線に刺激を受けて、積みあがってしまった昔の実験計画書を読んでみようと思います。(坂東 信尚)

*本誌は再生紙(古70%)、
植物油インキを使用して
います。

R270
古紙/ハルパ配合率70%再生紙を使用

**VEGETABLE
OIL INK**