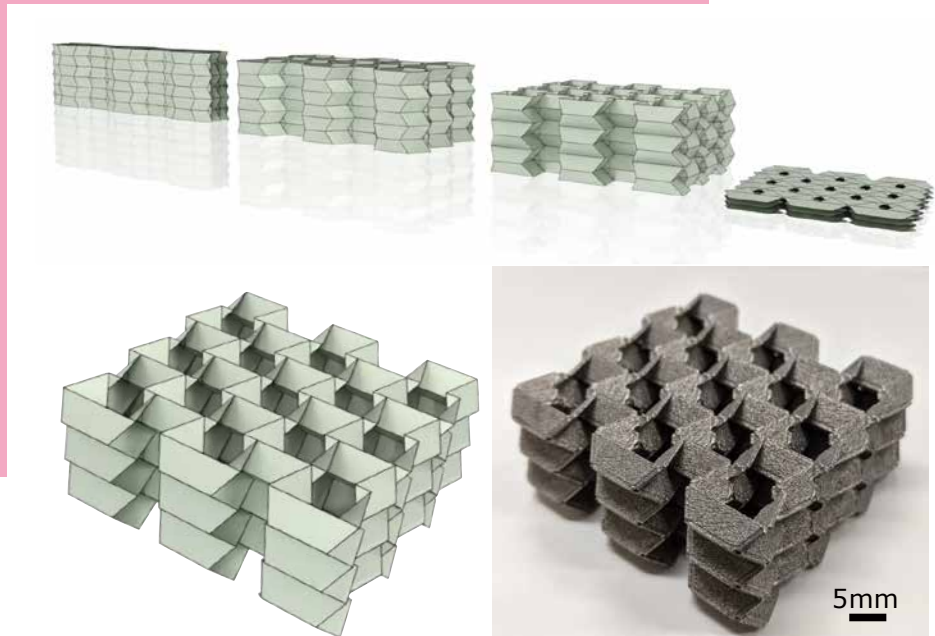


News

機械的メタマテリアル・ 金属3Dプリンターを 融合させた新しい構造の探求

宇宙科学研究所の新しい構造・材料の研究の例として、「機械的メタマテリアル」について本号の宇宙科学最前線で紹介します。特に、Tachi-Miura多面体と呼ばれる折り紙をベースにした機械的メタマテリアルについて解説しました(表紙図は折り畳まれる様子)。さらに、金属3Dプリンターを導入して、折り「紙」ではなく、折り「金属」にも取り組んでいます(写真は試作例)。



The Forefront of Space Science

宇宙科学
最前線

機械的メタマテリアルって何ですか？

宇宙飛行工学研究系 助教 安田 博実(やすだひろみ)

はじめに

タイトルにある「機械的メタマテリアル(またはアーキテクテッド・マテリアル)って何ですか?」と、今回ご紹介する材料・構造の研究をされている方に質問してみてください。(ほぼ間違いなく)研究者の方によって答えが異なると思います。

近年、応用物理や機械工学の分野を中心に研究が盛んに行われている「機械的メタマテリアル」ですが、少し論文を調べると「周波数バンド構造」や、「ソリトン波」、「負のポアソン比」など、いろいろな情報が出てきます。(よくわからないけど)これまでの材料・構造とは何か違うという印象を持たれる方が多いと思います。(現在の私の理解だと)機械工学だけでなく他の様々な分野の知見を構造・材料の研究分野に取り入れ、発展してきた経緯があるため、研究者の数だけ「多様な」機械的メタマテリアルの研究があると考えています。本稿では、機械構造に焦点を当て、機械的メタマテリアルにはどんなものがあるのか、宇宙の分野にどんな関係があるのか、そして現在進めている研究についてお話したいと思います。

機械的メタマテリアルには どんなものがあるのか？

「機械的メタマテリアルとは何か?」を1つの答えに絞るのは難しいので、ここでは「メタマテリアルにはどんなものがあるのか?」についてご紹介したいと思います。機械構造で構成されるメタマテリアル(つまり機械的メタマテリアル)に焦点を当てると、構造全体をユニットセルと呼ばれる要素の周期的な配置で構成し、ユニットセルの幾何形状を工夫することなどで、それを構成する材料自体では発現しない特性を生み出す構造、と捉えて研究をすることがあります(ちなみに、メタマテリアル(metamaterial)の「meta」の接頭語は「超越」を意味します)。このように捉えるのはあくまで一例なので、他にも様々な機械的メタマテリアルの定義はあります。

では、どのような構造を機械的メタマテリアルと呼んでいるのか、図1にいくつかの例を挙げてみました。図1(a)のハニカム構造は六角形を敷き詰めた構造で、軽量でかつ高強度など、形状を工夫することで機械的な特性向上を図る、機械的メタマテリアルの良い例かと思います(応用例としてはロケットフェアリング[1]等)。次に、ラティスと呼ばれる梁

のような部材で格子を形作る構造(図1(b))が挙げられます。幾何形状が複雑ですが、3Dプリンターの登場もあり、製作できるようになってきたことで、研究が広く行われています。最近だと、小型月着陸実証機SLIMの着陸脚の衝撃吸収材としてラティス構造が採用されました[2]。

また、こんなものも機械的メタマテリアルになるの?と思われることが多いのが、「折り紙」。実は、近年「Origami-based metamaterials」として研究が盛んに行われています。この「折り紙」の研究ですが、有名なものとして航空機の胴体のような薄い円筒が座屈したときに現れる形状の「吉村パターン」があり、潰れて強くなるという特徴から飲料の缶に应用されています(図1(c)) [3]。この吉村パターンは円筒ですが、平面的な形状で有名なのが「ミウラ折り」です(図1(d)) [4]。端を持って広げるとそれとは対角の方向にも開いていく(その逆の閉じるときも同様)という開きやすい(または閉じやすい)という特徴をもち、地図の折り方やさらにはソーラーアレイといった幅広い応用例があります。円筒の軸方向における座屈の吉村パターン、2次元的に展開・収納するミウラ折り、の他に例えば3次元の空間充填の特性を持ち且つ折り畳める折り紙はあるのか?ということで、本稿では、そのような折り紙の1つとして、私がこれまで研究してきた「Tachi-Miura 多面体」(図1(e)) [5]について少し詳しく見ていこうと思います。

折り紙の「形状」と「機械特性」の関係

「折り紙」はこれまでも工学への応用を目指した研究は多く、IKAROSに代表されるように小さく畳んでおき、使うときに大きく広げるといった例が挙げられます。近年では、「機械的メタマテリアル」の研究の流れと合流することで、「折り紙」が持つ様々な性質が報告されるようになってきました。Tachi-Miura多面体と呼ばれるミウラ折りを発展させた空間充填の特性を持つ折り紙を例に、従来の材料・構造とはちょっと異なる性質に関する私の研究を紹介します。

1) 負のポアソン比: 一般的には材料を潰すと断面が大きくなる人が多いです。このような力を加えた縦方向および横方向の変形の比がポアソン比ですが、通常はこの値は正の値を取ります。このポアソン比が負になることは無いのでしょうか? 実は、Tachi-Miura多面体は、うまくデザインパ

ラメータを選ぶと、図2(a)のように潰した際に断面が小さくなるように変形するという、ちょっと普通とは違う挙動を示す構造の1つとなることがわかりました[6]。

2) 耐荷重かつ折り畳める: 「耐荷重(荷重を支える)」にはがっしりした構造が、「折り畳める」には柔軟に変形できる構造が必要で、その2つは相反する印象があります。Tachi-Miura多面体では、折り目に沿って折っていくことで形状が変化していくのですが、連続的に折り畳まれる途中に2つのモードに分岐する挙動を作り出すことで、特定の方向に関して、ある状態を超えて折ると、図2(b)のように上に物をおいても支えられるようになります。この荷重を支えられる状態(耐荷重モード)は、折り目を何かでロックしているわけではないので、別の方向から引っ張ると先程の平坦な状態にまた折りたたむことが容易にできます[7]。このような構造を用いると「折り畳めて」かつ「荷重も支える」という2つの相反した特性を1つの構造で実現でき、宇宙で空間を持った構造・建築に応用できる可能性を秘めているのではと考えています。

3) Reconfigurableな構造: 形状の変形をコントロールしてポアソン比を負にしたり、耐荷重と折畳みを両立させたりできることがわかると、今度は形状をどれくらい自在にコントロールできるのかが気になるかと思います(少なくとも私は気になりました)。このTachi-Miura多面体は、図2(c)左上にある平坦な状態から同図右下の赤い状態に本来折り畳まれます。しかし、折り目を選択的に山折りと谷折りを入れ替えたりなどすると、構造の特定箇所の形状を変更させることができ、構造を製作した後でも、再度作り直すことなく(形状変更の2パターンは図中青色および緑色で示す箇所に対応)、図中の様々な形状に変化可能なことがわかりました(図2(c)) [8]。従来のように用途ごとに別々に構造をつくるのではなく、1つの構造を作っておいて、使う目的に応じて変形させ、目的が変わったら、また変形させるといった再使用可能な構造に繋がるかも?と考えています。

金属3Dプリンターを使った折り紙構造

折り紙に基づく機械的メタマテリアルが持つ様々な特性が私を含めた多くの研究者によって研究されてきました。しか

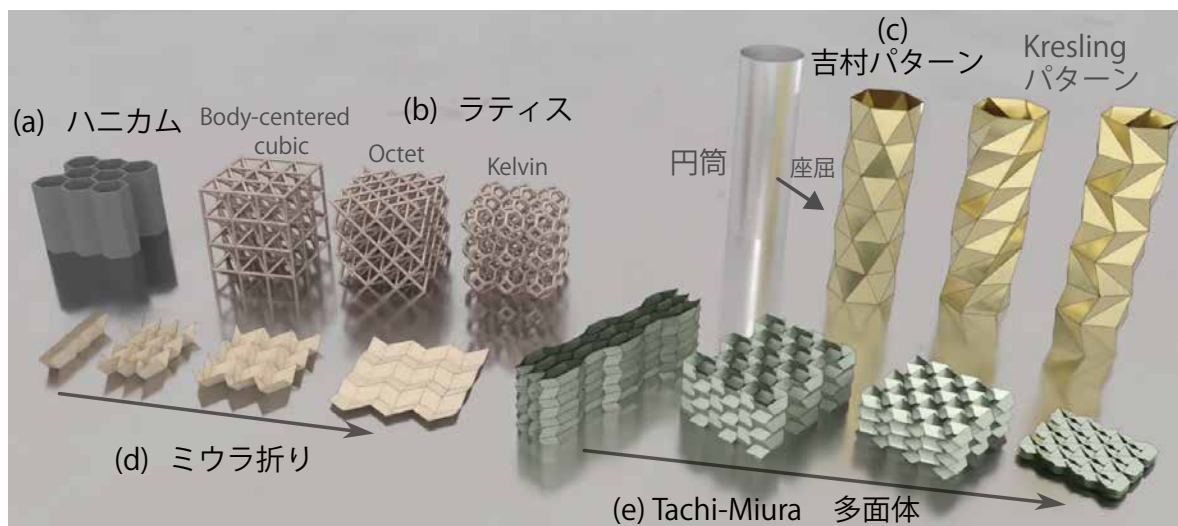


図1: 機械的メタマテリアルの例。(a) ハニカム構造。(b) ラティス構造。また、折り紙に基づく機械的メタマテリアルの例として、(c) 吉村パターン、(d) ミウラ折り、(e) Tachi-Miura多面体。

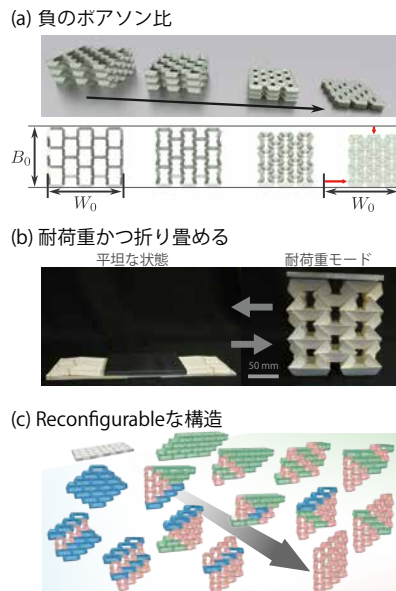


図2: Tachi-Miura多面体の様々な特性。(a) 折り畳まれたときの断面形状の変化。(b) 紙で試作したモデルの「平坦な状態」と「荷重を支えるモード」の切り替え[7]。(c) 1つの折り紙構造が、様々な形状に変化可能な様子を表す図。

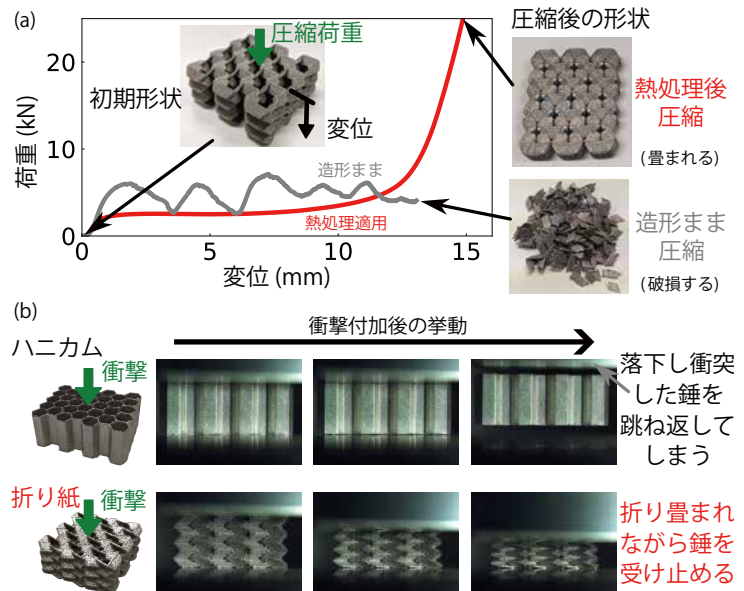


図3: 金属3Dプリンターで製作した折紙に基づく機械的メタマテリアル [9]。(a) アルミ合金を用いて試作した折紙の(準静的)圧縮試験結果と、造形ままおよび熱処理を適用後に圧縮した場合の圧縮後の状態。(b) 同じ体積を持つハニカムと折紙の衝撃試験を行ったときの様子。

し、宇宙機などへの工学応用を考えた時に、「紙」以外の材料(特に金属)でも作れるのか? 金属で作った場合、紙で作ったときと同じ挙動になるのか? など、課題はたくさんあります。そういった課題へのアプローチとして、(私の) JAXA での研究では金属3Dプリンターを活用した折り紙構造の製作に取り組んでいます。折り「紙」ではなく、折り「金属」です。ただし、シート状の材料に折り目を入れて、3次元構造に折っていくのではなく、ここでは最終的な3次元形状を直接プリントしていきます。JAXA安全・信頼性推進部の境野 正法さんとNTTデータザムテクノロジーズ様に協力いただき、アルミ合金を使って手のひらサイズの大きさのプロトタイプを作りました(本号の表紙の図)。

形状がうまく作れたら、折り紙のように折りの動きを出すのは簡単かということ、実はそうでもありませんでした。構造の初期状態を表紙の図下段として、本来のTachi-Miura多面体の潰れる(折り畳まれる)変形は図1(e)右下のようになりますが、3Dプリンターで造形したままのものを潰すと、図3(a)右下のように理想の折り畳まれた形状とはかけ離れた状態に... (折り目に沿って壊れ、粉々になってます)。そこで、3Dプリントした後に、ある条件で熱処理をし圧縮をすると、圧縮後の形状は本来のTachi-Miura多面体の畳まれた状態(図3(a)右上)と同じように、綺麗に折り畳まれて潰れているのがわかるかと思ひます。

この「紙のように綺麗に折れる」というのを衝撃吸収に活かせるのでは? というので、衝撃試験をしました。比較用にTachi-Miura多面体と同じ材料・同じ体積のハニカムを作り、同じ衝撃を加えると、ある衝撃の大きさではハニカムは(面外方向に)あまり潰れず、衝撃を加えるために上から落としたインパクトが跳ね返ってしまいました(図3(b)上段)。一方、Tachi-Miura多面体は綺麗に折れることでスムーズにエネルギーを吸収できているのがわかります(図3(b)下段)[9]。まだ金属3Dプリンターを使った折り紙構造の研究は少なく、始まったばかりですが、折り紙の折り挙動による、圧縮を受けた構造の変形をコントロールできる利点を活かした衝撃吸

収機構、折り紙の形状可変な特性を用いた宇宙での展開構造(または建築物)など様々な応用ができるのでは? とワクワクしながら研究を進めているところです。

さいごに

折り紙を使った機械的メタマテリアルを中心に様々な面白い特性や応用への可能性についてご紹介させていただきましたが、この他にも色々なメタマテリアルの研究が行われています。冒頭の「機械的メタマテリアルとは何か?」の答えが研究者の数だけあると曖昧な言い方をしましたが、多様な分野の知見を取り入れ、それらを機械構造へ適用することで構造というものを理解・解析・設計しようと様々な角度からアプローチした結果の裏返しとも捉えることができるのかなとも私は思ひます。また、機械的メタマテリアルのような新しい構造材料の設計手法と、3Dプリンターといった新しい製造技術を融合することで、宇宙分野を含めた様々な産業への応用が期待できるのではと考えます。

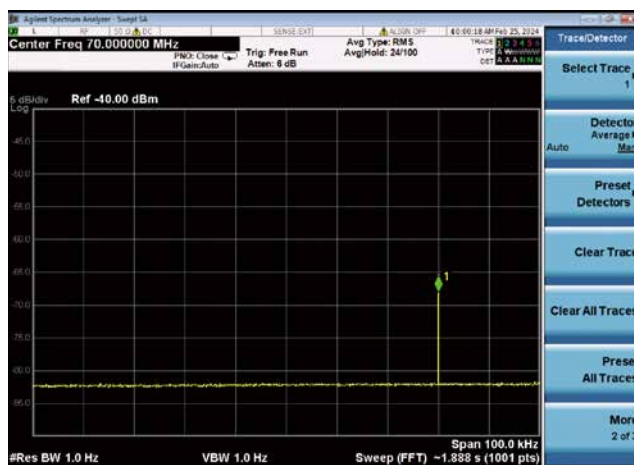
参考文献

- [1] JAXA 宇宙輸送技術部門. ロケットの基礎知識. <https://www.rocket.jaxa.jp/column/knowledge/fairing.html>.
- [2] 河野 太郎, 小型月着陸実証機SLIMの着陸機構, 宇宙科学最前線, 読むISAS URL <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/191226.html>.
- [3] 三浦 公亮, 「考証: チューハイ伍と宇宙研の関係」, 2002年9月号いも焼酎 <https://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/2002/ISASnews258.pdf>.
- [4] Miura, K. Method of packaging and deployment of large membranes in space. The Institute of Space and Astronautical Science Report No.618 1-9 (1985).
- [5] Tachi, T. & Miura, K. Rigid-Foldable cylinders and cells. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 53, 217-226 (2012).
- [6] Yasuda, H. & Yang, J. Reentrant origami-based metamaterials with negative Poisson's ratio and bistability. Physical Review Letters 114, 185502 (2015).
- [7] Yasuda, H., et al. Origami - based cellular structures with in situ transition between collapsible and load - bearing configurations. Advanced Engineering Materials 21, 1900562 (2019).
- [8] Miyazawa, Y. et al. Heterogeneous origami-architected materials with variable stiffness. Communications Materials 2, 110 (2021).
- [9] Yasuda, H. & Kunimine, T. Energy absorption of AlSi10Mg origami cellular structures fabricated via laser powder bed fusion. MRS Communications 1-7 (2024). <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00518-7>.

SLIM、月面での越夜に成功

SLIMは月面への着陸後、電力確保の期間を挟みつつ分光カメラ(MBC)による科学観測を行い、1月31日に月の夜を迎えました。成功基準では日没までの月面活動をエクストラサクセスとしており、いわゆる越夜後の運用はさらに先のチャレンジという位置づけでした。SLIMチームは昨年末から怒涛の運用でしたので、2月前半は体も頭もクールダウンさせつつ、越夜後の運用の準備を進めました。「SLIMの設計は越夜を前提としてないから」と思いつつも、1月の運用で感じた説明できない何かの力のようなものに柄にもなく意を強くし、欲が出てきたのは不思議なものです。とはいえ、やはり各担当とも気になることは多々あります。電気系の立場では、低温環境で一番心配なバッテリーはすでに探査機から切り離していましたが、泥臭いところですが電子部品の実装が懸念でした。小型化のために導入した先進的な実装は基板との熱ひずみの差で故障しないか？いや50年以上前に越夜に成功したアメリカのサーベイヤーの時代より集積化が進み部品点数が減少したことは良い方向？などと考えつつ、搭載コンボの設計資料をひっくり返していると、あっという間に月の夜は明けていきました。

越夜後の運用は、臼田局・内之浦局の全面的なサポートのもと、発生電力の予想に対して余裕を持った運用パスを確保して頂き、ついに2月25日にその時を迎えました。送信機ONのコマンドに対してSLIMが正常に応答したのを、管制室に大書きにしたスペアナ画像で一同確認、そして拍手。そこからは探査機状態の確認や航法カメラでの周辺地形の再撮像など、運用メン



越夜後のSLIMからの応答を示すスペアナ画面

バは夜勤運用を頑張りました。MBCは正常な動作には至りませんでしたが、限られた運用時間の中で次のトライアルに向けたデータを取得しつつ、日本時間3月1日未明に再び日没によりSLIMは休眠に入りました。担当した宇宙機の運用終了はいつも感傷的ですが(先日の「ひさき」の停波もそうでした)、SLIMの日没時は次回があるかを確信できず一層複雑な気持ちです。苦しい開発と運用を乗り切った最高のチームで、もう少しエクストラの先の夕寝美を楽しみたいと思いますので、引き続きの応援をお願いいたします。(福田 盛介)

XRISM 初期科学観測継続中!

1月5日にご報告したファーストライトから、約3ヶ月が経ちました。XRISMは、その後も画期的な科学観測データを取得し続けています。但し、Resolveに取り付けられたゲートバルブ(ベリリウム保護膜)は、未だ開放できていません。NASAのメンバーも交えた慎重な検討の結果、当面は開放のための特殊運用を実施せず、閉じた状態での科学観測を続けることが決まりました。

私たちサイエンスチームの役割は、この判断に応じて初期科学観測期(PVフェーズ)の観測計画を見直し、改めてプログラムの最適化を図ることです。PVフェーズ中に観測が予定されていた天体のうち、保護膜による軟X線遮蔽の影響が大きいも

のについては、一旦観測を見送ることとしました。一方、残りの天体の大部分については、保護膜の影響をほとんど受けることなく当初の科学目的を達成できることを確認しました。幸いにして、ResolveのX線センサーが要求値を上回る分光性能を達成できたことに加え、広い視野が売りのXtendの性能も期待以上でした。2月中旬には、満月とほぼ同じ視直径を持つ「超新星残骸 SN 1006」の撮像にも成功し、定常運用移行のプレスリリースに合わせて画像を公開しました。*

3月第2週には、対面形式としては打上げ後初となるサイエンスチーム会議を、東京理科大学 神楽坂キャンパスにて開催しました。大学院生を含めて200名近いメンバーが一堂に集い、大きな講義室が満杯になりました。3日間かけて、これまでに得られた観測成果を共有し、今後の見通しについて熱く議論しました。ファーストライト以降に得られた観測データをその日に初めて見たメンバーも多く、Resolveのスペクトルが投影された瞬間には会場が響けました。

冒頭で述べた通り、XRISMは100%の状態ではありません。しかし、従来のX線衛星と比して性能面での飛躍は大きく、我々の宇宙観を変えうる無二の存在であることに変わりありません。このミッションを「成功」と呼べるかどうかは、今後のサイエンスメンバーの頑張りにかかっています。私は、それができるチームであると確信しています。(山口 弘悦)



東京理科大学にて開催されたXRISMサイエンスチーム会議での集合写真

* https://www.jaxa.jp/press/2024/03/20240304-1_j.html

Roman宇宙望遠鏡計画の進捗

精密宇宙論観測と太陽系外惑星観測、そして様々な広視野赤外線天文学をすすめるNancy Grace Roman 宇宙望遠鏡の開発が順調に進んでいる。NASA側では、2023年9月に広視野観測装置(WFI)の組み立てが完了し、その最終的な試験が行われている。もうひとつの観測装置であるコロナグラフ装置(CGI)の組み立ても順調である。日本は、コロナグラフの心臓部といえるコロナグラフマスクの精密光学基板を提供している。マスクの加工自体はジェット推進研究所(JPL)で行われたが、その基板については、高精度の研磨加工とコーティング技術を持つ日本の企業(夏目光学(株))が担当した。また、偏光観測光学系をデザイン(オプトクラフト社協力)し、ウォラストンプリズム*(株)光学技研が製作)と集光レンズ(三共光学工業(株)が製作)も提供している。集光レンズは直接撮像用のものも提供しており、CGIの直接撮像モードでは我々のレンズが最後に光を結像させる。CGIのフライトモデルの組み立ては2024年1月に完了し、同2月からは熱真空試験を行い基本性能の確認のための光学試験を実施している。順調に進めば両装置とも2024年夏頃までには望遠鏡への組み込みが完了する予定である。

観測データを受信する準備も着々と進んでいる。Romanはこれまでの太陽-地球L2軌道ミッションの10-100倍の速度で大量のデータをダウンリンクする必要があり、このため米欧日の地上局による受信協力が必要である。JAXA美笹深宇宙探査用地上局によるK帯受信システムの開発と受信協力はRoman計画への協力の大きな柱であり、JAXA追跡ネットワーク技術センターとの

図：NASAジェット推進研究所(JPL)で組み立て中のCGI装置フライトモデル。赤丸部分にJAXAが提供した偏光光学素子、マスク基板から作成したコロナグラフマスクが搭載されている。(画像：2024年1月 ©NASA)



協力が進められている。2023年12月にはJAXA宇宙研Roman計画の詳細設計審査会(CDR)が行われ、計画進捗確認と共に、美笹局K帯受信システムの詳細設計についての審査が実施され、いよいよ製作段階に入ることになった。現在、ダウンコンバータ、HDRR、データ伝送システムなどの機器が続々と美笹局に搬入され、また、冷却低雑音アンプの製作・試験も進んでいる。2024年10月までには最終的なインテグレーション・試験を行い、11月からはNASAとの本格的なRF適合試験を実施する予定である。

地上望遠鏡を用いた協調観測・科学協力の準備も進んでいる。2023年半ばには、観測実施のための科学チームやコロナグラフ技術実証観測のためのチームも組織され、ここにも日本の研究者が積極的に参加している。地上望遠鏡協調観測では、大阪大学PRIME望遠鏡が南アフリカ・サザーランド天文台でいよいよ本格的な観測を開始し、また、すばる望遠鏡協調観測については、国立天文台と宇宙科学研究所の間で100夜からなる観測の実施に向けた協力覚え書きに署名された。2026年の打上目標にむけて、いよいよRoman計画がラストスパートに入りつつある。

(山田 亨)

* 偏光観測のため入射光を2つの直交する直線偏光に分離する光学素子

第16回宇宙科学奨励賞を安藤 紘基氏と齋藤 勇士氏に授与

公益財団法人宇宙科学振興会では、毎年、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者に宇宙科学奨励賞を授与しています。創設以来16回目となる今年度は、京都産業大学 理学部 宇宙物理・気象学科 准教授 安藤 紘基氏(理学分野)と東北大学 学際科学フロンティア研究所 助教 齋藤 勇士氏(工学分野)に授与されました。

安藤氏への授賞の対象となった研究業績は「電波掩蔽観測と数値モデリングによる惑星大気の研究」です。安藤氏は、宇宙機を用いた観測から数値シミュレーションによる金星大気駆動メカニズム解明までを一貫して実施され、そのいずれもが高いレベルにあると評価されました。これらの金星大気の研究は惑星気象学の構築のさきがけとなると考えられています。安藤氏は、「あかつき」運用においても中心的役割を果たし、また将来の金星大気観測の計画も引っ張っておられます。観測と理論を統合して太陽系探査を切り拓く傑出した若手研究者であり、今後のリーダーシップに期待がかけられている方です。

齋藤氏への授賞の対象となった研究業績は「端面燃焼式ハイブリッドロケットの燃焼特性および推力制御特性の解明」です。齋藤氏は、端面燃焼式ハイブリッドロケットの燃焼特性および推力制御特性について先進的な研究を行い、宇宙推進工学および燃焼学の分野で学術的に重要な知見を提供するだけでなく、革新的なハイブリッドロケットを実現し得る1つの方法を明示



前列左が理学部門受賞者の安藤 紘基氏、右が工学部門受賞者の齋藤 勇士氏

しておられます。今後も当該分野を中心に我が国の宇宙工学の発展にリーダーシップを持って貢献していく研究者となることが期待されています。

当振興会は今回受賞された安藤氏と齋藤氏に心からお祝い申し上げますと共に、今後の宇宙科学の発展に大いに貢献されることを期待しております。表彰式とそれに引き続く祝賀会は、3月7日に多数のご来賓、関係者列席のもと、都内のホテルにて開催しました。式中に受賞者による記念講演も行われ、その様子はオンラインでも配信しました。なお、本授賞の対象となった両氏の研究内容は、それぞれISASニュース5月号および6月号の「宇宙科学最前線」で紹介いただく予定です。

(公益財団法人 宇宙科学振興会 佐々木 進)

SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

—SLIMは1日にして成らず！ 軌道計画系—

2024年1月19日23時35分、着陸開始の25分前、SLIMピンポイント着陸に向けた最後の運用が始まりました。管制室では各担当がSLIMの状態を確認し、報告していきます。軌道決定担当から「簡易軌道決定結果 +0.4秒」という報告が淡々と、しかし自信に満ちた声でありました。これは着陸に向けて計画した軌道からのずれを示す数値で、0秒に近いということはほぼ計画通りの軌道でSLIMはやってきた、ということを示します。打上げから約4か月半の期間を経て、SLIMはついに着陸のためのスタート地点にやってきたのです。その後は大変な緊張感の中、誘導航法制御系担当として着陸運用を進めたことを覚えています。そして、SLIMはピンポイント月面着陸を達成しました。詳細はISASニュース2024年3月号をご覧ください。

今回は、打上げから着陸までの壮大な一筆書きとも言える「軌道計画」についてご紹介します。SLIMはH-IIAロケット47号機により、種子島宇宙センターから2023年9月7日に打ち上げられました。旅の始まりとなるこの時点ではSLIMは地球を周回する軌道にあり、このままでは月に到達しません。この後、SLIM自身の持つエンジンを使って月に向かう軌道に乗せます。月に向かう軌道にうまく乗せられる良いタイミングがあり、その瞬間に全力で軌道を変更するためのエンジン噴射（「軌道制御」と言います）を行います。この方式を使って、SLIMは地球周回軌道から月遷移軌道への軌道制御を2023年10月1日に実施し、続いて、10月4日に月の重力を活用してスイングバイを行いました。この月スイングバイにより月軌道の外側、最も地球から遠いところで約130万kmとなる軌道に沿ってSLIMを飛ばします。月軌道の外側では太陽の重力の影響を大きく受けるのでその力に引っ張ってもらうことで、

月軌道への投入時の消費燃料を節約することができます（図1）。2023年12月25日に月周軌道投入のための軌道制御を実施し、その後は着陸に向けて軌道高度を下げる軌道制御を行っていき、着陸開始直前となる2024年1月19日22時40分ごろ、最後の軌道制御を完了しました（図2）。

ここで、「軌道制御」の方法についてご紹介しましょう。軌道制御の目的は、現在飛行している軌道から、目標とする別の軌道に移ることです。まずは、現在飛行している軌道を精密に割り出す「軌道決定」を行います。地上からアンテナを使ってSLIMを追跡し、地上局とSLIMとの電波の往復時間と電波のドップラーシフト量を使って軌道を把握します。軌道決定の次は、エンジン噴射量と向きを決める計算を行います。目標地点までの一筆書きの計算を繰り返し行い、うまくいく計画を採用します。計画を終えたら、必要となる情報をコマンド計画としてまとめ、地上局から送信していきます。そして、いよいよ軌道制御を実施するタイミングでは、SLIMのデータを見守り、何かあった場合にすぐ対応することができるよう万全を期します。軌道制御が終わると、軌道制御が想定通り実行できたことを確認し、一連の流れが完了、となります。

SLIMの打上げから着陸開始まで、この軌道制御を合計で16回行い、エンジン噴射の際の機体の応答がどうなるか、軌道はどうなるかなどを見極めながら、運用を着実に進めてきました。エンジンを噴射して軌道を変更するという一連の操作は着陸時の操作と本質的には同じです。軌道制御の運用を通して機体の特性を把握し、運用方法を磨き上げ、着陸を迎えるころにはSLIMを自在に操ることのできる百戦錬磨の運用チームとなっていたのです。

SLIMでは最新の研究成果と日本の宇宙開発で積み重ねてきた軌道制御のような手堅い技術が相乗効果を発揮しています。4か月半のミッションの前にはさらに長い歴史がある。SLIMは一日にして成らず。ここに、先人の努力やミッションを支えて奮闘したメンバーに敬意を表します。

軌道計画担当：植田 聡史（うえだ さとし）

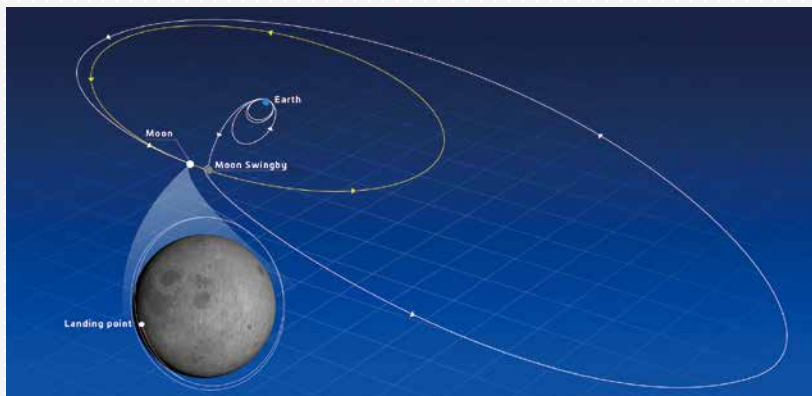


図1：SLIMの軌道計画（打上げ～月周回軌道投入）

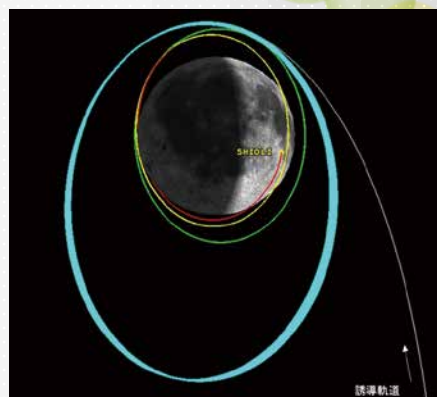


図2：SLIMの軌道計画（月周回軌道投入～着陸）



JAXA 名誉教授

中谷 一郎 (なかたに いちろう)

ロボットだって恋をする？

ロボットの恋の話をする前に、ちょっとした思考実験にお付き合いください。

不治の病であなたには死が迫っていると想定しましょう。そして…

①あなたと同じ外見、個性、考え方を持つクローン人間が作られたとします。あなたが死んでも、そっくりさんが生き続けるなら、死を抵抗なく受け入れられるでしょうか。

—— 答えはNoでしょうね。いくら似ていてもクローンは別の人格。あなたの意識をそのまま継ぐことはできません。それでは…

②あなたの脳の内容が、コンピューターのメモリーに常時バックアップされるとしましょう。いつ死んでも意識は、そっくりさんのロボットに移植され、あなたの意識が記憶とともに、完全によみがえります。短い眠りから目が覚めたような感覚ですね。もちろん、まったく別の体に生まれ変わっていますが、意識はとぎれません。これなら、少し安心して(?)死を受け入れられるでしょうか。

—— 多分答えはYes でしょう。

この思考実験から分かるように、自己意識が連綿とつながっていることこそが、あなたが生きている重要な条件なのですね。ところで、そんなに重要な「意識」とは、そもそも何なのか？ 意識は脳のどの部分の機能なのか？ ロボットに意識を持たせることは可能なのか？ 実は、意識は古くから議論されてきましたが、今でもこれらの疑問の解決には程遠く、混沌としています。意識の定義すら意見が大きく分かれます。意識、心、精神、魂などの違いの説明も研究者によって異なります。中には、「意識は主観であり、幻想である。物理的に実証できないゆえに科学の対象にすらならない」という過激な(しかし、困ったことに、けっこう説得力のある)主張をする一派もあります。

一方、ここ半世紀ほどの間に、脳の中を映像化する技術が開発され、脳を切開しなくても中の様子を知ることができるようになって事情が少し変わりました。fMRIや、CT、PETなど、体内の映像化の技術用語も日常的に目にします。意識研究の国際学会も2つ立ち上がり、意識の研究

者向けジャーナルも3誌を数えます。

AI研究の歴史を振り返ると、AIブームの時代とAI冬の時代とが交互に繰り返されてきました。今まで3回あったAIブームのたびに、識者が論評する定型パターンをご紹介します。

「AIは人間のすることは、何でもできるようになると思われているが、〇〇は、人間にしかできない仕事として永遠に残るであろう。」

この〇〇に入る言葉は、古くは専門技術者のノウハウ、やがて、将棋や囲碁のような名人級の直感を要するゲーム、次には自然言語の理解が必要な翻訳、そして音楽、絵画、俳句など創造力を要する分野などでした。

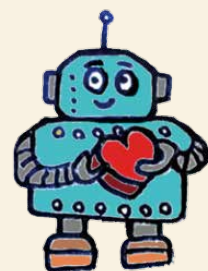
〇〇の中には、当時の技術では実現できそうもないAI応用分野が次々に入った訳ですね。しかしこれらの論評はことごとく外れ、永遠に人間にしかできない筈の技術が、次のAIブームの時代に、片端からAIにより実現されてしまうというのも定型パターンです。

そして現在の(第3次)AIブームに対しての論評は？ 一部の識者のご託宣によれば、「AIは人間のすることなら、何でもこなすけれども、例外は残る。心を通わせる必要のある仕事、たとえばカウンセラー、精神科医、高級料亭の接待、営業の担当などはAIには永遠にできない。」(「意識」の定義すら議論が続いているのを幸い、ここでは、乱暴に「心」と「意識」を区別しないことにします。)

今のAIブームを支えるのは深層学習と呼ばれる技術。確かに、この延長線上にロボットの心が出現することは将来とも、あり得ないでしょう。心を持っているようなフリをするロボットはすでに実現し、日々洗練・進歩しています。しかし、たとえば、お店の接客ロボットの笑顔は心からの笑顔ではない。センサーで人の存在を検出したときに、どう対応すべきかがプログラムされているに過ぎません。(昨今の人間の店員さんはマニュアル通りに応答するだけで、プログラム化されたロボットと同じだという声も聞こえてきそうですが！)

ロボットが心を持っているようなフリをするのと、本当に心を持つのは、まったく別の技術。後者には、心の解明とロボットへの実装という大変困難な技術的ブレークスルーが必要で、まだその糸口すら見つかりません。しかし、近未来の第4次AIブームは、人工的な心——AM (Artificial Mind：筆者の造語です) 技術が牽引するでしょう。そして、心を持つロボットは、恋もすれば、喧嘩もする、心から笑い、泣き、喜ぶ。音楽や絵画に感動し、創造的な仕事に生き甲斐を感じます。しっかりと自己意識を持ち、他者の意識を尊重します。ご注意ください。そうすると、ロボットを壊したら器物損壊罪ではなく傷害罪か、ひょっとすると殺人罪に問われますよ。

ようやく標題にたどり着いたところで紙数が尽きました。ここから先の文は、生成AIに任せの方がよさそうなのでこの辺で筆を置くことにしましょう。



画：筆者

》「宇宙をより近く」を 能代から実現したい

年100日以上は能代ロケット実験場

——秋田県の能代ロケット実験場から昨日戻ったばかりで、またすぐ能代に行かれるそうですね。

ロケット開発と水素社会実現に向けた活動、その2本立てで研究開発を行っています。能代ロケット実験場にはそのための実験設備があるので、年100日以上は能代にいます。

——ロケットの研究開発の道に進んだきっかけは？

高校生のころから飛行機など飛びものに憧れていて、飛びものをつくりたいと思っていました。できれば未来の飛びものがいいな、とも。極超音速航空機はまだ本格的な実用化には至っていなかったことから、そのエンジンの開発に大学時代から取り組みました。

燃料の液体水素をエンジンにうまく送れないことが問題になっていました。極低温の液体水素が温められて沸騰し、流れづらくなってしまうようなのですが、どのくらい沸騰しているのかも分かっていませんでした。そこで、液体水素の沸騰状態を計測するセンサを開発し、データの取得にも成功しました。そのデータを使い、液体水素の流動特性のシミュレーションもできるようになりました。

大学院の修士課程だった2014年、このセンサを観測ロケットに搭載し、宇宙空間で液体窒素の沸騰状態を計測する実験に参加しました。自分達が開発したセンサが宇宙に行き、宇宙から送ってきたデータを見たとき、とても感動しました。そして、宇宙を飛びものをつくりたい、と思ったのです。これが私の研究人生のターニングポイントになりました。

このセンサはさまざまな需要があり、H3ロケットの第2段エンジンの地上燃焼試験でも使われました。日本の基幹ロケットの開発に貢献できたというのは、格別にうれしかったですね。

——現在どういう思いで、ロケットエンジンの研究開発に取り組んでいるのでしょうか。

宇宙をより近くしたい。そう思っています。宇宙に物を安くたくさん届け、人が宇宙に簡単に行ける、そういう世界にしたいのです。新婚旅行の行き先を選ぶときに、宇宙が候補に入るくらいになればいいな。私も一度は宇宙に行ってみたいです。

失敗を肌で感じ、その経験を次に生かす

——これまでの実験で忘れられないものはありますか。

再使用ロケット用に開発している* ATRIUMエンジンのガス

*エアターボエンジンとロケットエンジンの複合エンジン。Air Turbo Rocket for Innovative Unmanned Missionエンジンの略称。

編集後記

SLIM君の1日(太陽の南中周期)が1ヶ月くらい、というのは面白いんですね。そうすると、1地球(っていうのかな? 衛星の満ち欠けの周期)も1ヶ月くらいで、1年(公転周期)は1年くらいでしょうか? こっちは暑くなってきましたが、そっちにも四季があるのかしら? 長生きして教えて欲しいなあ。(斎藤 芳隆)

宇宙飛行工学研究系 助教

坂本 勇樹(さかもと ゆうき)

1991年、東京都生まれ。早稲田大学基幹理工学部機械科学航空学科卒業。同大学基幹理工学研究科機械科学専攻博士課程修了。博士(工学)。フォン・カルマン流体力学研究所(ベルギー)研究員、JAXA プロジェクト研究員、日本学術振興会特別研究員PDを経て、2022年より現職。



ジェネレータ燃焼試験です。2019年の年末で、私は計測室にいました。ガスジェネレータの中では水素と酸素を燃やして高温のガスをつくります。試験を開始すると、ガスジェネレータの温度が一瞬でポンと高くなったのです。異常が発生したら「エマスト!」と叫んで非常停止ボタンを押さなければいけないのですが、私は温度センサの誤りかもしれないと、一瞬ちゅうちょしました。「エマスト!」と叫んで非常停止ボタンを押したのと、ガスジェネレータが割れるのが同時でした。異常だと少しでも思ったら止める勇気が必要なのです。割れた瞬間のことを、今でも肌が覚えています。この肌感を決して忘れることはないし、忘れてはいけないと思っています。

世界をリードする液体水素の実験施設を能代に

——水素社会実現に向けた活動とは？

近年、多くの企業が水素社会実現を目標に掲げ、液体水素を輸送・貯蔵する技術の開発に取り組んでいます。液体水素はロケットの燃料であり、能代ロケット実験場には液体水素の実験施設があり、液体水素を扱うノウハウを持った人もいます。そこで能代ロケット実験場では、企業に液体水素を扱うノウハウを伝えたり、企業が開発したバルブなどの試験を一緒に行ったりしています。

液体水素の実験施設の拡張を計画中です。事故を模擬した試験ができる施設にしようとしています。事故が起きないようにすることは大前提ですが、事故が起きても人命が守られる、施設が守られる必要があります。それには、どういう事故が起きる可能性があるのか、そのとき液体水素はどのような挙動をするのかを知っておかなければ、対策を取れないからです。大規模なアクシデントを模擬した試験ができる施設は、まだどこにもありません。世界をリードする液体水素の実験環境を整えることが、私たちの使命だと思っています。水素社会が実現し液体水素がたくさん使われるようになれば、値段が下がります。ロケットの打上げ費用も安くなって宇宙がより近くなる、という効果も期待しています。

——能代はどういう街ですか？

とてもいい街ですよ。能代市も市民の皆さんも、ロケット実験場を受け入れ、温かく見守ってくれています。ありがたいです。能代市は、宇宙や水素社会をテーマにさまざまな構想を練っています。それを、大学やJAXAも一緒になって実現しようという試みも進行中で、私はJAXA側の取りまとめをしています。ますます能代が好きになっていきます。



ISASニュース No.517 2024年4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/>