

News

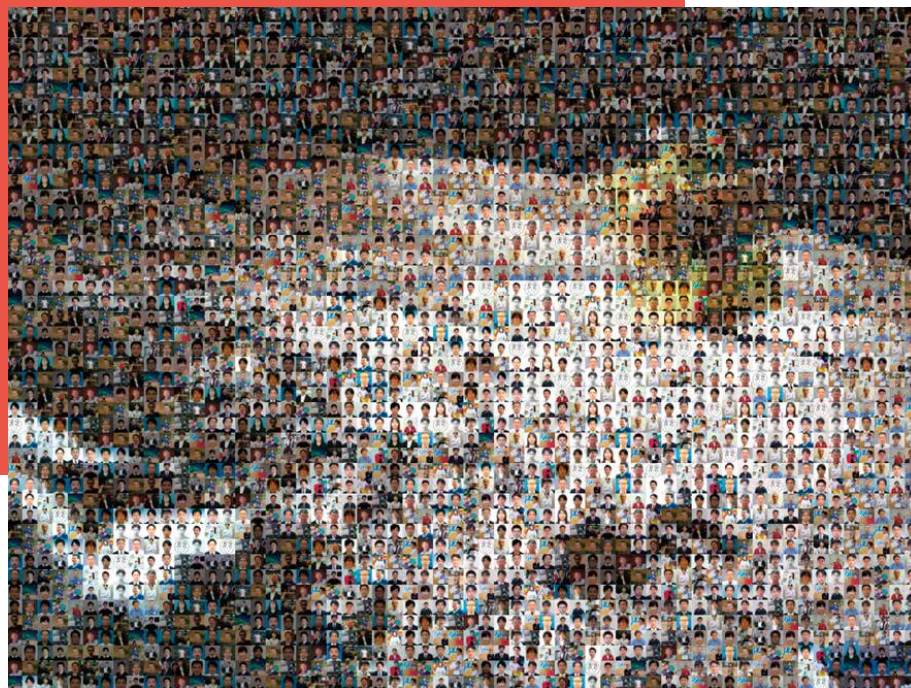
2024

9

No.522

SLIM関係者の顔写真で構成された、LEV-2 (SORA-Q) によるSLIM / 月撮像画像のモザイクアート

SLIMプロジェクトのスタッフロールもかねて作成したモザイク画像です。AIと相談しながら画像照合航法の担当者から教わった画像処理のテクニックを反映することで、プログラムのベースはものの数時間で完成しました。既成のアプリとの比較コンペも実施しましたが、よりきめ細やかな修正が可能なおかげでこちらが採用されています。画像提供いただいた全員が公平に表示されるよう入念に調整しましたが、至らなかった点についてはご容赦願います。(p.6参照)



The Forefront of Space Science

宇宙科学
最前線

宇宙で広がれ、ペラペラ太陽電池

宇宙機応用工学研究系 助教 甚野 裕明(じんの ひろあき)

暗い宇宙で太陽電池は広がりた

太陽電池は、太陽に照らされてさえいれば持続的に電力を発電し宇宙機を動かすことができる、いわば宇宙機の心臓です。しかし万能に見える太陽電池にも、実は弱点があります。それは太陽の光が十分に届かない、太陽遠方の惑星への探査です。例えば木星は、地球-太陽の距離の約5倍太陽から離れた距離にあり、昼間であっても太陽光強度は地球の約4%しかありません(土星に至っては約1%)。そんな暗い宇宙への探査はどのように行えば良いのでしょうか？ 1/100の光量であれば、単純に考えると100倍の面積の太陽電池を使って、タイヨウデンチマシマシ、たくさん光を受け取る物量作戦が有効そうです。

実際に、米国の木星トロヤ群小惑星探査機Lucyや、欧州の木星氷衛星探査機Juiceは、小さく太陽電池を折りたたんでロケットに搭載し、宇宙へ打ち上げてから大きく広げる、展開型の太陽電池パドルを搭載しています。暗い宇宙で太陽電池は広がりたのです。現在の展開型太陽電池パドルは、パタ

パタとパネルを開く構造が主流ですが、究極的に大きく広げたい場合、レジャーシートのような薄くて柔らかい、ペラペラの太陽電池を気球のようにフワッと広げたいくなります。

私の研究では、そのような宇宙で広げるための「ペラペラな」太陽電池に向けて、厚さ約1ミクロン^{*1}(食品用ラップの1/10)の極限に薄いプラスチック基板上へ作られた太陽電池の開発を行っています[1]。本稿では、世界最薄のペラペラ太陽電池の宇宙応用に注目し、最先端の研究内容を紹介したいと思います。

髪の毛より薄い、世界最薄の太陽電池

太陽電池とは、主に単結晶シリコン太陽電池に代表される、ウェハを主体とする分厚い「結晶」太陽電池と、ガラスやプラスチックの支持基板上へ薄膜を成膜する「薄膜」太陽電池に大別されます。私は気づけば10年以上、ペラペラな薄膜デバイスの研究を続けていますが、数「ミリ」メートル厚の支持基板は、基板上へコートされる数100「ナノ」メートル^{*2}厚の薄膜デバイスと比較すると、非常に分厚い世界なのです。

*1 ミクロン：マイクロメートル(10⁻⁶メートル)の略称。

*2 ナノメートル：10⁻⁹メートル。

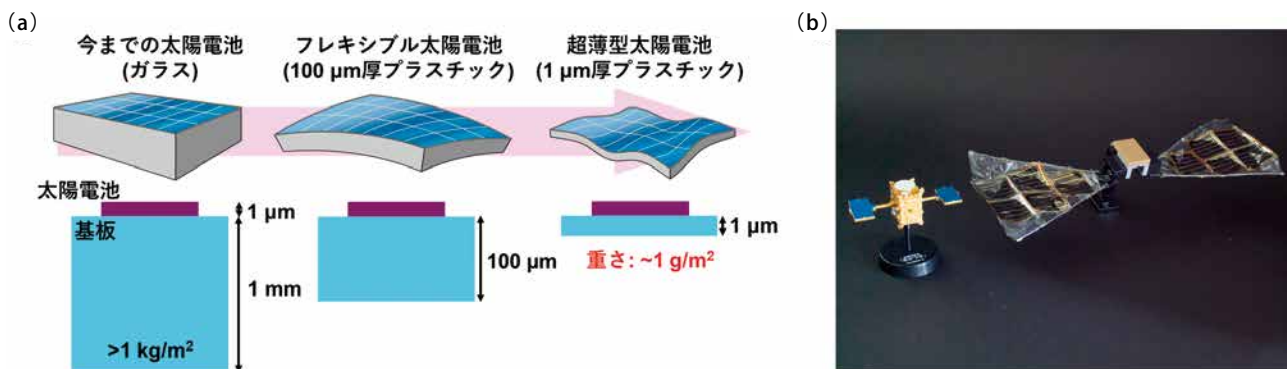


図1：厚さ1ミクロンの極薄プラスチック基板を用いた超薄型太陽電池。(a) 薄型基板による軽量化の概念図。(b) 超薄型化することで、従来衛星(左模型)と比較し、大きく柔軟に展開する太陽電池パドル(右模型)への応用が期待される[1,4]。

そんな薄膜太陽電池は、様々な支持基板上へデバイスを作製することができるため、特にプラスチック基板上へ作製することで、軽くて曲げられるフレキシブルで軽量の宇宙用太陽電池として注目されています(図1a,b)。例えば、シャープ株式会社にて開発された三接合薄膜太陽電池、薄膜軽量SAP(Solar Array Panel)[2]は、小型月着陸実証機SLIMにおいて宇宙機表面へSAPを張り付けることで徹底的な軽量化を実現し、2024年1月の月面ピンポイント着陸の成功の立役者となりました。

近年の研究では、さらにプラスチック基板の厚さを従来の1/100まで薄くした、全厚約1ミクロンの超薄型な太陽電池が注目されています[3,4]。基板を超薄型化することによって、従来のフレキシブル太陽電池を超えた「超フレキシブル性」を有することができます。例えば、デバイスの曲げ剛性は基板膜厚の3乗に比例するため、曲げに対して非常に強く、くしゃくしゃにしても壊れることがありません。また、フレキシブル太陽電池の基板重さの比率を飛躍的に低減できるため、従来の100倍から1,000倍の出力重量比(W/g)を持ち、極限に軽い、深宇宙においても大電力発電が可能な展開太陽電池パドルを実現できます。

しかし、超薄型太陽電池の宇宙電源化には未だ技術的な課題が存在します。その1つがデバイスの宇宙放射線に対する耐久性です。超薄型な太陽電池は、プラスチック基板の厚さを極限まで薄くすることで超フレキシブル性と軽量性を実現できる一方、従来の太陽電池のように分厚い基板やガラス保護膜が存在しないため、温度変化・紫外線・放射線といった宇宙特有の環境ダメージを直接デバイスが受けることになります。特に放射線による損傷は、陽子線・電子線・重イオン粒子といった宇宙に多数存在する放射線によって、結晶欠陥・蓄積電荷によるデバイスの電気的劣化を引き起こします。そのため、超薄型太陽電池の宇宙応用では、放射線に対してデバイス自体が強い薄膜太陽電池の開発が求められています。私たちは、次世代太陽電池として注目されているペロブスカイト太陽電池が有する高い耐放射線性に注目し、ペロブスカイト太陽電池を超薄型基板上へ作製することで、宇宙用電源に最適な超薄型ペロブスカイト太陽電池が実現できると考えています。

宇宙がお好きなペロブスカイト太陽電池

ペロブスカイト太陽電池とは、有機小分子・重金属・ハロゲンによって構成されたペロブスカイト結晶を用いる、次世代の

薄膜太陽電池です[4]。2009年に日本で発明された後[5]、世界中で研究が進み、驚異的な効率改善が行われた結果、現在では薄膜太陽電池の最高効率(26.1%)を達成しています。一方でペロブスカイト太陽電池は、水にとっても弱いという、やっかいな特徴を有しています。であれば、水が存在しない宇宙の環境は、ペロブスカイト太陽電池に絶好の環境と考えられます。そのため、JAXAではペロブスカイト太陽電池の宇宙・成層圏応用に以前から注目し、開発を進めてきました[6,7,8]。特に、ペロブスカイト太陽電池は、陽子線や電子線といった宇宙放射線に対して非常に安定であることがわかり[6]、超薄型太陽電池の作製技術と組み合わせることで、既存のSAPを一新するような次世代の宇宙用太陽電池の開発が期待されています。

実際に、私たちが実現した超薄型ペロブスカイト太陽電池の構造と特性を図2aに示します。ペロブスカイト太陽電池の高効率化のためには、約150℃の加熱プロセス(主に酸化物層の結晶化促進のため)が重要です。ポリエチレンテレフタレート(Polyethylene Terephthalate: PET)に代表される従来の透明なプラスチック基板は、熱に対する耐性が低く、デバイス作製時の加熱プロセスにてプラスチックが変形してしまう課題がありました。私たちの超薄型ペロブスカイト太陽電池は、高耐熱・透明なプラスチックとして、パリレンC(ポリパラキシレン)/SU-8(エポキシ樹脂)の積層プラスチック基板を用いています。パリレンC/SU-8積層構造を用いることで、パリレンCの持つ高耐熱性と、SU-8の高い表面平坦性を両立することができ、加熱プロセスを含むペロブスカイト太陽電池を高品質に作製できる超薄型基板を実現しました。さらに、太陽電池の透明電極としても、従来硬い材料として知られていたITO(酸化インジウムスズ: Indium Tin Oxide)を極薄プラスチック基板向けに柔軟・非晶質に作製することで、曲げに強く、柔らかい透明電極の実現に成功しています[9]。図2bでは、超薄型基板・従来のガラス基板、それぞれに作製したペロブスカイト太陽電池の太陽電池特性を示しています。作製されたペロブスカイト太陽電池は、ガラス基板上において変換効率19.0%、超薄型プラスチック基板上で18.2%を示し、ガラス基板と遜色ない高効率を実現しており、この値は、発表当時における超薄型太陽電池の世界最高効率となっています[1]。

これまでの超薄型ペロブスカイト太陽電池は、飛行機[4]・ウェアラブルセンサ[10]・ドローン[11]と、地上から空中まで軽量電源として応用が提案されています。一方で過酷な宇

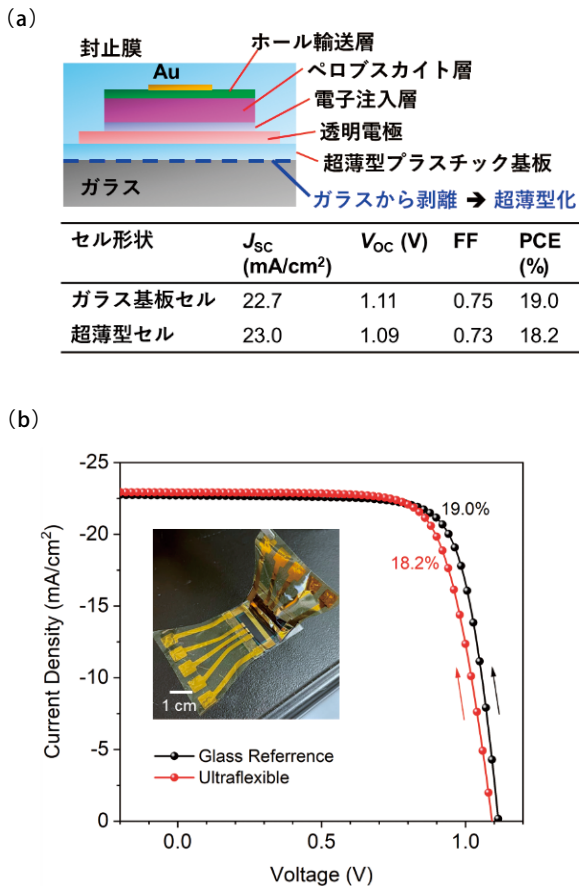


図2：私たちが開発を進めている超薄型ペロブスカイト太陽電池[1]。(a) デバイス構造図と太陽電池特性。(b) 超薄型太陽電池の電気特性曲線（インセット：剥離時のデバイス写真）。

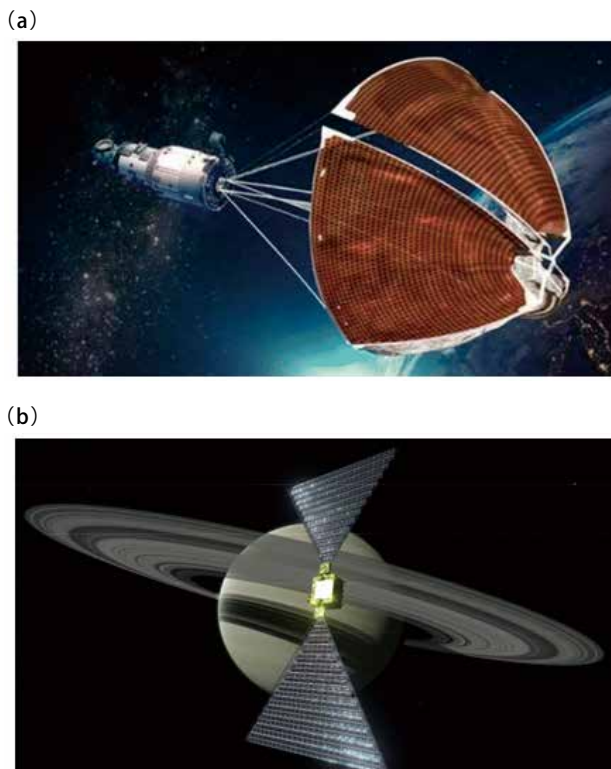


図3：超薄型太陽電池によって実現される次世代小型宇宙機。(a) 気球のように広がる地球周回衛星[12]。(b) 土星リングを直接観測する超小型惑星探査計画OPENS-0[13,14]。

宇宙環境における実証はハードルが高く、未だ報告例は限られます。JAXAは観測ロケット、ISS実験棟、気球といった、様々な宇宙迅速実証のプラットフォームを持っています。JAXAの有する宇宙実証に対する高いアクセス性を活かし、私たちは既存宇宙機の設計デザインを一新するような超薄型ペロブスカイト太陽電池の世界初の宇宙実証に挑戦しています。

ペラペラ太陽電池を身に纏う

超薄型の太陽電池を用いた新時代の宇宙機は、どのようなデザインになるでしょうか？地球を周る周回衛星を考えてみましょう。打上げ時にはクシャクシャに畳まれ、宇宙空間で太陽電池が膨らむ気球のようなデザインになれば、10cm角の小さな衛星が通信や気象観測に役立つようになるかもしれません(図3a)[12]。ロケットの一度の打上げで100-1,000個の衛星が一斉に軌道投入され、地上から見える星のように多数の衛星が宇宙を飛び交う、そんな未来も想像できそうです。

超薄型の太陽電池は、宇宙探査プロジェクトにおいても鍵となる技術要素です。これまでEQUULEUS、OMOTENASHIなどで培われてきた超小型探査機技術と、ソーラーセイル技術を駆使した展開型薄膜太陽電池パドルを組み合わせることで、土星圏以遠の外惑星探査を実現する探査機プロジェクトOPENS-0が計画されています。OPENS-0ミッションでは、蝶ネクタイのように展開する太陽電池パドルを持つ超小型探査機を土星圏へ送り込むことで、土星リングを構成する環の高速フライバイによる直接観測を計画しています(図3b)[13,14]。超薄型太陽電池の開発が宇宙機搭載レベルまで成熟すれば、OPENS-0以降のさらに大電力が必要な外惑星サンプルリターンといった探査プロジェクトの実現が期待されます。

超薄型ペロブスカイト太陽電池の宇宙応用に向けて、取り組むべき課題は未だ多く存在します。宇宙環境は、高温低温の熱サイクル、極紫外線(300nm以下の紫外線)を含む太陽光、ダスト衝突に対する機械的な強靱さ、熱変形の抑制など、宇宙放射線の耐性は解決しなければいけない課題の1つにすぎません。これらの課題を一つ一つ解決し、次世代の宇宙機のデザインを一新するようなペラペラ太陽電池の開発を進めています。超薄型ペロブスカイト太陽電池によって、宇宙機たちが惑星ごとのドレスコードに従って衣服のように様々な太陽電池を身に纏う、そんな自由な宇宙機開発が実現できるよう研究を進めています。

参考文献

- [1] H. Jinno, et al. Adv. Mater. 36, 1-9 (2024).
- [2] 豊田, ISAS ニュース 2017 年 8 月号 437, 1-3 (2017).
https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews437.pdf
- [3] H. Jinno, et al. Nat. Energy 2, 780-785 (2017).
- [4] M. Kaltenbrunner, et al. Nat. Mater. 14, 1032-1039 (2015).
- [5] A. Kojima, et al. J. Am. Chem. Soc. 131, 6050-1 (2009).
- [6] Y. Miyazawa, et al. iScience 2, 148-155 (2018).
- [7] S. Kanaya, et al. J. Phys. Chem. Lett. 10, 6990-6995 (2019).
- [8] 宮澤, ISAS ニュース 2022 年 5 月号 494, 1-3 (2022).
https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews494.pdf
- [9] T. Yokota, et al. Sci. Adv. 2, e1501856 (2016).
- [10] H. Jinno, et al. Nat. Commun. 12, 2234 (2021).
- [11] B. Hailegnaw, et al. Nat. Energy 9, 677-690 (2024).
- [12] O. Malinkiewicz, et al. Emergent Mater. 3, 9-14 (2020).
- [13] 兵頭, 日本惑星科学会誌 32, 4-15 (2023)
- [14] 尾崎, 超小型衛星利用シンポジウム 2024, 4-4 (2024).

ひので国際科学会議「Hinode-17/IRIS-15/SPHERE-3」を開催

太陽観測衛星「ひので」の国際研究グループでは、打上げ1年後の2007年から、コロナ禍中の2020年を除いて毎年、国際科学会議を開催しています。この科学会議は日本・アメリカ・ヨーロッパの持ち回りで開催しており、17回目の今年は7月23日から27日の5日間、オンラインを併用してアメリカのモンタナ州ボーズマンにあるモンタナ州立大で開催されました。

ここ数年、「ひので」と米国の太陽観測衛星IRISのグループとが共同して会議を開催していますが、今年は初めての試みとして、太陽高エネルギー現象の研究ワークショップであるSPHERE (Solar Physics High Energy Research) を加え、3者での共同開催となりました。そのため今回は、従来の「ひので」科学会議でそれほど多くはなかった、電波や硬X線を用いた太陽フレアの観測や、関連した数値シミュレーションの研究報告が目を引きました。近年、EOVSA (Expanded Owens Valley Solar Array) などによる地上電波観測や、Solar Orbiterに搭載された硬X線望遠鏡STIX、中国の衛星ASO-SIによって、太陽フレアで生成される高エネルギー電子が放射する電波や硬X線について新しい観測が精力的に行われています。今回の会議はこれらの最新成果や観測状況をまとまって知る上でも貴重な機会となりました。もちろん「ひので」をはじめ、IRISやNASAの衛星SDOなどを用いた研究も活発に報告されました。「ひので」EISやIRISの撮像分光による、太陽大気中のプラズマの組成や運動に関する最近の研究の

進展は、SOLAR-Cでさらに発展することが期待されます。

太陽分野では特に近年は単一の観測機器だけを使ったデータ解析が行われることは少なくなっており、観測波長の異なる複数の機器のデータを組み合わせ、現象についてより多角的に描像を得ようとしています。口頭講演では、セッションごとに多様な観測やシミュレーションからそれぞれの科学テーマに迫ろうとするプログラム構成の意図が感じられ、組織委員会の皆さんの努力が偲ばれました。

参加者は170人近くに達し、口頭講演88件、ポスター講演80件を数えました。

今回はイギリスで開催予定です。

(坂尾 太郎)



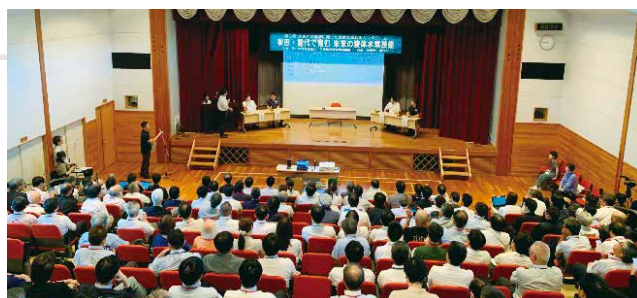
会議中のひとコマ。

第3回水素社会構築に向けた液体水素利用シンポジウムを秋田県能代市で開催

2024年7月19日、20日の2日間にわたり「第3回水素社会構築に向けた液体水素利用シンポジウム～秋田・能代で育む 未来の液体水素技術～」が開催されました。JAXAが水素社会？と思われる方も多いかもしれませんが、実は能代ロケット実験場は宇宙開発で培った技術を基盤として、水素社会構築に必要な技術・機器開発の最前線として活躍しています。液体水素に関する実験が思い切り実施できる場所としての実験エリア拡張計画も進捗中であり、新しい展開を見せつつあります。今回は「能代ロケット実験場を肌で感じ、需要の創出と具体化」と「地元との連携強化」をテーマに、能代市での開催としました。全国の企業や研究機関から200名以上に現地参加いただき、会場では立ち見が出るほど大盛況でした。

19日には実験場利用の具体化を目的に個別の実験場見学会を企画し、海外を含む14の機関と議論を交わしました。一部企業とは具体的な実験実施に向けて調整を継続しているところです。20日午前の一般見学会には150名の団体見学者を受け入れ、能代ロケット実験場における航空宇宙開発、水素社会構築に向けた取り組み、そしてこれからの実験場における技術革新の可能性を体感いただくことができました。

20日午後に開催した講演会では小林 弘明能代ロケット実験場所長から今後の展望が示されたのち、秋田県と能代市から地元自治体における能代ロケット実験場を核とした水素の取り組



パネルディスカッションの様子。会場は満員でした。

み構想を講演いただきました。さらに2件のパネルディスカッションでは産学官の実務者間で「液体水素をキーワードに能代でやっていきたいこと」を議論したのち、それぞれの団体の“リーダー”にあたる方々が「水素の街能代での産官学連携の在り方」について議論しました。水素を核にして社会を変えていきたいというビジョンを参加者間で共有できたのは大きな成果だったと思います。この実現のためには、多くの人の理解と協力のもと、できることから取り組むことが重要だと改めて感じさせられました。

地上社会における水素技術の発展と宇宙科学のための水素技術は、切り離されたものではありません。相互の協調と協創により、基盤的技術獲得におけるシナジー効果が期待できます。能代ロケット実験場がまさにその実証の場として発展できるよう、関係者一同尽力していきます。

(坂本 勇樹)

ISASにて“Cloudy Workshop”日本初開催

2024年8月5日からの5日間、ISASにてCloudy Workshop 2024が開催されました。

Cloudyは星間物質の光電離からスペクトル合成までを解く輻射輸送計算コードで、多様な天体现象の幅広い波長領域における観測との比較に利用されています。ケンタッキー大学のGary Ferland教授を中心に1978年から(!)脈々と開発が続けられており、現在では、分子化学反応や磁場の影響といった高度な過程まで含められる、非常に多機能なコードとなっています。しかし、大きな可能性を秘めた道具であるからこそ、それを最大限に活用できるかは使い手の技量が問われます。



ISAS見学ツアー後の集合写真(上)とグループワーク中の様子(下)。

Cloudy Workshopは、Cloudyを新しく使いたい未経験者や、より深く理解したい初学者に向けた学び舎です。毎日、前半に開発陣からの講義を受け、後半にはグループワークを通して実践的にCloudyを学ぶという濃密なプログラムが好評となり、これまでに世界各地で計13回開催されてきました。コロナ禍で対面での開催が中断されていましたが、今回、XRISMにより精細なX線分光の時代が始まることを背景の1つとして、Ferland教授からもご快諾いただき、初めて日本でホストする運びとなりました。

コミュニティへのアナウンスは最低限のものでしたが、大学院生やポスドクを中心に53名の現地参加者が集まり(聴講のみのリモート参加者も含めると184名!)、過去最多人数での開催となりました。招待講師として、Ferland教授、Peter van Hoof氏(ベルギー王立天文台)、Chamani Gunasekera氏(STScI)のお三方をISASに招き、さらに4名の方にオンラインでご講演いただきました。参加者は皆、Cloudyの解説や最新成果の紹介に熱心に耳を傾け、グループワークでは、各々の興味に応じて9つのテーマに分かれ、熟練者のアドバイスを受けながら、自ら設定した課題にCloudyを使って取り組みました。即席ながらチームを組んで自ら作業するという形式のおかげか、会場には通常の研究会とは一線を画す一体感が生まれ、分野と世代を超えて活発な議論が行われました。最終日には、各グループが会期中に得られた成果を発表し、有終の美を飾りました。

今回のCloudy Workshopを契機に、日本におけるCloudyユーザー層の拡大と相互交流が進み、新たな研究の芽が生まれることが、世話人一同の願いです。その実現を心から期待しています。

(馬場 俊介)

CubeSatサロンの開所式が行われました

7月28日にCubeSatサロンの開所式が日本橋ライフサイエンスビル(東京都中央区)にて行われ、60名近い方々が参加しました。CubeSatサロンは、超小型衛星の成功率向上を実現するための効果的な支援方法の確立を目的として九州工業大学とJAXAが共同で設置したものです。事務局を大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC)が担当しています。

JAXAとUNISECは2020年度から超小型衛星のミッション保証に関する共同研究を行ってきました。^{*1} 2021年度に出版した「超小型衛星ミッションアシュアランス・ハンドブック」の作成過程で様々な超小型衛星の失敗原因の解析を行う中で、プロジェクトのできるだけ早い段階に外部からのアドバイスがあれば防げた失敗が多くあったことが明らかになりました。超小型衛星を使ったミッションを考えているけれども、どうやってプロジェクトを進めたらいいかわからない、ミッションが実現可能かどうかかわからない、といった相談事に気軽にのれる場所があると良いというアイデアが持ち上がりました。

その他にも、将来的に超小型衛星設計標準などを作っていくために開発者等の生の声を集める仕組みが必要、超小型衛星を使って新たなビジネスを試みたいが宇宙を知らない経営層を説得する努力を助ける必要がある、といった意見がありまし

た。それらの事項についてコンサルティングを行うために、「ふらっと」立ち寄って、ゆっくりとお茶でも飲みながら話ができるような「緩い」相談場所として「CubeSatサロン」を作ろうということになりました。衛星開発・運用の経験が少ない大学・

高専や企業その他の方々を主な対象としていますが、間口をできるだけ広げるために超小型衛星の開発や利用に興味のある方は基本的にどなたでも歓迎です。

2024年度は試行期間として、週1回、衛星開発・運用に知見を有する大学教員が相談に応じます。対面が基本ですが、遠隔の方々のためにオンラインでも対応します。またJAXA内の人的・知的資源を適宜紹介できるように、JAXA安全・信頼性推進部の職員も相談に同席します。CubeSatサロンの紹介や予約等については、ホームページ^{*2}をご参照ください。(趙 孟佑)



CubeSatサロンと大学及びJAXA関係者。

^{*1} <https://ma.unisec.jp/> ^{*2} <https://unisec.jp/cubesatsalon>

SLIM the Moon Sniper

連載

第13回

降りられるところから、降りたいところへ

旅の終わり。
「ありがとう、おやすみなさい」

—— 2024年6月某日午後

運用時の正装である赤ジャケットを着用したSLIMプロジェクトメンバーは、宇宙研に程近い「新田稲荷神社」に集まっていた。境内の小さな丘は「呼ばわり山」と言われ、迷い子や行方不明の者が出たとき、鐘や太鼓をたたいて呼ばわると、必ず現れるという民間信仰で有名な場所で、「はやぶさ」が宇宙で消息を絶った際に川口 淳一郎プロマネ（当時）が毎晩この地を訪れ「発見祈願」をされた場所。

ほとんど奇跡と思われる月着陸後3度の越夜を成功させたSLIMも、5月の呼びかけには応えることがなかった。行方不明ではない。38万キロ離れた月面、SHIOLIKレータの脇に居ることは判っている。ただちょっと声掛けのタイミングが合わなかっただけだ。通信再確立のために出来ることは全てやろう。「お願いします。復活しますように。そしてまた月面の写真を撮ろう。」神様に対してなのかSLIMへのメッセージなのかよく判らないが、一途に手を合わせ心の中で唱えた。

—— 2024年6月27日午前2時

月面上のSLIMに“復活の呪文”を懸命に送り続けた。過酷な月の温度環境。日に日に探査機の状況は悪くなると皆、頭では判っている。並外れた強運を持ち、数々の奇跡を起こしてきた。今回もきっと。沈黙の時間が流れる。。。

「本日の運用は以上で終了です。」

今月も応答はなかった。運用リーダーの発声に、管制室のメンバーから自然と拍手が起こった。期待が大きかった反動の落胆で気持ちが沈む。「本当にお疲れさま」、「ここまでよく頑張ったよ」、「これで永遠にお別れなのか」、「いや、まだ判らない。来月もトライしてみよう」。宇宙研宿泊施設ロジの自室に戻っても、いろんな思いが去来し、その日はなかなか寝付けなかった。

—— 2024年7月16日夕方

SLIMのミッション実現は、多くの方々の献身的な尽力によって為しえたものである。プロジェクト終結作業の一環として、SLIMの研究、開発、運用などに大きな貢献を頂いた関連大学、企業、海外機関など、約100件にも及ぶ方々に感謝状を作成し、発送作業を先ほど終えた。直接出向いて対面での手渡しも企画しているため、全てに行き渡るのはもう少し時間を要するかもしれない。

SLIMは多くのみなさまから応援、激励のお言葉を頂いた。あらためてお礼申し上げたい。ソーシャルメディアを活用し、探査機の状況などにかく丁寧にかつ迅速に情報発信するこ



SLIMプロジェクトから、応援頂いた全ての皆さまに向けての感謝状。

とに努めてきた。どうにかこうにか着陸に漕ぎ着けたSLIMに対して、“よく踏ん張った、偉い”と声掛け頂いた。日没とともに運用を終えると、“おやすみなさい”、越夜後再起動すれば、“おはよう”と、まるで探査機が人格を持った存在として親しみを込めて接して頂けていること、倒立姿勢で着陸したことすら、“転けてて可愛い”、“ドジっ娘ですごく愛おしい”と前向きに捉えて頂けている状況は、当初われわれが望んだ危機管理広報の想定を遙かに超えたものであり、感謝しかない。一緒にハラハラドキドキをもってSLIMを見守り、応援頂いた全ての皆さまに心より感謝し、ここに皆さま宛の感謝状を掲載させていただきます。本当にありがとうございました。

—— 2024年8月23日 22時40分 終わりの時

役目を終えた人工衛星、宇宙機の終わり方は様々である。大気や重力の影響を受け徐々に軌道を落とし大気圏に再突入するもの、旅先の惑星を回り続け文字通り衛星となるもの、後続の衛星に軌道を明け渡すために墓場軌道への退避をおこなうもの。

SLIMはどうだろう。

「パトラッシュ… 疲れたろう…。僕も疲れたんだ。なんだかとても眠いんだ。」昭和のおじさん世代には懐かしい「フランダースの犬」の様な悲しい終わり方ではない。地球からは月を見上げるたびにわれわれから思いを馳せられ、月では多くのお犬様達がそばで見守ってくれている。そしてまるで月の静寂を守るかのようにじっとそこに佇んでいるのだ。なんて幸せな探査機なんだろう。

2023年8月から始まった本連載も（着陸運用前後の2回は連載中断させて頂きましたが）全13回、この記事をもって無事に最終回を迎えることができました。長きにわたりご覧頂きありがとうございました。

SLIMサブマネージャ：櫛木 賢一（くしき けんいち）



名古屋大学宇宙地球環境研究所

草野 完也 (くさの かんや)

宇宙の災害に備えるために

2024年夏の日本列島はこれまでにない暑さと台風それに地震に見舞われ、苦労された方も多くおられたのではないのでしょうか。被災された皆さんにはお見舞い申し上げます。8月8日に宮崎県で発生したマグニチュード7.1の地震により、気象庁から初めて発表された南海トラフ地震臨時情報(巨大地震注意)は、日本列島に住む我々が地震の巣の上で生きていることを改めて思い起こさせる機会となりました。私自身も、いつか起きるであろう(もしかすると、今日起きるかもしれない)災害への備えの重要性を再認識し、本棚の固定や飲料水の備蓄などを見直しました。

地上では色々な災害を免れることはできませんが、宇宙でも様々な災害が起きる可能性があります。特に、太陽で起きる爆発現象である太陽フレアやコロナ質量放出(CME)は宇宙災害の主要な原因となることがあります。例えば、太陽での爆発は大量の高エネルギー粒子(SEP)を放出する場合があるため、地球のように厚い大気も強い磁場も無い惑星間空間や月面では、放射線被ばくのリスクが常に伴います。NASAが1961年から1972年に実施した人類初の有人月面着陸ミッションであるアポロ計画の最中にも何度か太陽高エネルギー粒子現象が発生しました。特に、1972年8月に発生した太陽フレアの影響は深刻なものでした。幸いにもその際、ミッションは行われていませんでしたが、もし適切なシールドを施さず月面で船外活動をしていたら、致死レベルを超える被曝を受けた可能性もあると考えられています。

人間活動に影響を与えるこうした宇宙環境の変動は「宇宙天気」と呼ばれています。宇宙天気は宇宙放射線のみならず、超高層大気の抵抗による低軌道衛星の軌道変化、通信測位障害、地上での電力障害など生活を支える様々なインフラにも影響を与えます。それゆえ、宇宙天気起因する社会影響は宇宙時代の新たな災害であり、それに備える必要があります。

地上の災害と同様、宇宙災害に対しても重要な対策は被害想定と発生予知です。太陽フレアは(地震と同様に)規模の増大と共に頻度が低下するため、最大級の被害を引き起こす大規模フレアは稀にしか発生しません。太陽フレアは1859年に英国の天文学者リチャード・キャリントンによって発見されましたが、その際に観測されたフレアがその後、現在に至るまでに観測された最大のフレアであったと言われています。しかし観測の歴史はまだ165年しかないため、最大フレアの想定は難しい問題です。最近で



太陽地球圏環境予測(PSTEP)サマースクール(2017年8月、北海道陸別町にて)。

は、過去に地球に降り注いだ太陽高エネルギー粒子が地球大気中で生み出した同位体の痕跡を樹木年輪や氷床から見出す研究がすすめられています。名古屋大学の三宅らはそうした研究によってキャリントンが観測したフレアの10倍以上の規模のフレアが、西暦774年から775年に発生していたことを示す結果を見出しています。すなわち、人類がまだ直接観測したことがない、巨大な太陽フレアが実際に発生していた可能性が高く、それゆえ今後も発生すると考えられます。

アーサー・C・クラークとスティーヴン・バクスターの「太陽の盾(Sunstorm)」は、超巨大太陽フレアから地球を救うため、ラグランジュ(L1)点に巨大な盾を建造する超お薦めのSF作品です。でも、現代のテクノロジーでは実現不可能ですね。それゆえ、宇宙災害の被害を未然に防ぐためには、できるだけ早期にその発生を予測して対応する宇宙天気予報が求められています。特に、新たな月面有人ミッションであるアルテミス計画や様々な民間宇宙事業が進展する現在、宇宙天気予報の重要性は急速に高まっています。

そのため、米国ではNASAが宇宙天気プログラム・オフィスを設置すると共に、4つの大学に宇宙天気研究拠点を設置し、宇宙天気予測センターを運用する米国海洋大気庁(NOAA)と協力しながらより高度な宇宙天気予報の研究開発を組織的に推進しています。欧州でもESAの宇宙天気オフィスのもとで全欧に形成された太陽、太陽圏、宇宙放射線、電離圏、地磁気に関する5つの拠点を中心に、宇宙天気予報の研究開発が多くの研究者の協力によって進められているようです。

一方、我が国では情報通信研究機構(NICT)が宇宙天気の予報運用を担っています。これから月面や宇宙の利用が格段に進む時代を迎えて、JAXAもその長所を活かしながら全国の研究者と互いに協力し、宇宙災害に組織的に取り組む必要があるのではないのでしょうか。その為には理学と工学、さらに社会経済分野の総合的な知見が必要になります。2017年の夏休みに私たちは宇宙天気研究の将来を担う全国の大学院生約100名が参加した太陽地球圏環境予測(PSTEP)サマースクールを北海道陸別町で開催しました。異なる専門分野を学ぶ若い大学院生との交流はとても刺激的で、未来社会が必要とする総合領域としての宇宙天気研究の重要性を再認識する機会となりました。今後ともそうした機会が増えると共に、宇宙がいつまでも安全で魅力的なフロンティアとして拡大することを願っています。

》将来の月惑星探査に貢献したい

マルチフィジックスシミュレーションに挑戦

——月惑星探査データ解析グループに所属されています。どのようなことに取り組んでいるのでしょうか？

月惑星探査データ解析グループでは、月惑星の研究や将来の探査に貢献するという目的のもと、探査で得られたデータの解析や、新しい解析手法の開発研究を行っています。その中で私が担当している業務の1つは、月が誕生直後にほぼ全球規模で融解したマグマオーシャンの状態から、冷えて固まり、現在の姿になるまでを模擬するマルチフィジックスシミュレーションモデルの開発です。マルチフィジックスシミュレーションとは、流体、伝熱、構造力学など複数の物理現象を統合してシミュレーションを行うもので、土木や医療、自動車などさまざまな分野で使われています。月惑星探査でもこのツールを利用して新しいことができないか検討することになったのです。

——なぜ月のマグマオーシャンに注目したのでしょうか？

私は大学・大学院時代に、月のマグマオーシャンの研究をしていました。月全球規模のマグマオーシャンが冷えて固まった結果、現在の月になったと考えられています。私は、マグマオーシャンを模擬した高温高压実験及び冷却モデルによって、結晶が析出し分離する過程を明らかにすることを目指していました。かんらん石や輝石など重い鉱物は沈んでマントルをつくり、斜長石など軽い鉱物は浮かんで地殻をつくるという、大きな流れは分かっています。しかし、どんな組成の鉱物が、いつ、どのくらいの粒径で、どれくらいの速度で分離したのか、詳細の分離メカニズムはまだ明らかになっていません。そこで、マルチフィジックスシミュレーションツールを開発することで、新しい視点でそのテーマに挑戦してみようと思ったのです。

このツールを使うと、何をどのくらいの精度で計測すれば、月の組成や進化のシナリオを制約できるか、より根拠を持って提示できるようになるはずです。課題が多く実用化にはまだ遠いのですが、将来の月探査に貢献することを目指して取り組んでいます。

月を研究対象に選んだ理由

——子どものころは、どのようなことに興味がありましたか？

父の影響で、子どものころから宇宙が好きでした。宇宙の図鑑を繰り返し読み、科学雑誌を絵本代わりに見ていました。

——なぜ月の研究をするようになったのですか？

その後もずっと宇宙に興味があったので、理学部の地球惑星物理

月惑星探査データ解析グループ
MMX プロジェクトチーム

宮崎 理紗 (みやざき りさ)

1986年、東京都生まれ。東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻卒。理学博士（月科学）。2014年、JAXAに入職。地球観測研究センターを経て、2019年より現職。MMXプロジェクトチームを併任。



学科に進みました。そして卒業論文の研究テーマを決めるとき、宇宙の中でも身近に感じられる天体がいいと思い、月を選びました。

色彩豊かで変化する地球に感動

——以前は、地球観測研究センターに所属されていました。

JAXAに就職して最初の配属先が、地球観測研究センターでした。これまで月科学研究に注力していたので、新しいことを始めようと思い、宇宙から地球を見る仕事を希望しました。気候変動観測衛星「しきさい」が観測したデータの解析と可視化を担当し、「地球って、宇宙から見るとこんなに様々な表情を持つ天体なんだ」と驚きました。月の表面はグレーで、ほとんど変化しません。だからなおさら、色彩豊かで、日々変化する地球に、とても感動しました。

近年、民間企業も含め、各国で月を目指そうという流れが盛り上がってきました。また、地球観測に携わったことで、月の面白さを改めて知ることができました。そうしたことから、月惑星探査データ解析グループへの異動希望を出したのです。現在は、火星衛星探査計画MMXプロジェクトチームにも併任しています。

開発から運用、解析、利用まで、すべての現場を経験したい

——MMXでは、どういうことを担当しているのですか？

観測機器全体の運用検討を担当しています。MMXには、たくさん観測機器が搭載されます。それぞれが、いつ、どこで、どういう観測をするかという計画を立てるのですが、観測データを地球に送るダウンリンクの通信量など様々な要素を組み合わせる必要があります。とても複雑な作業です。2026年度の打上げ予定に向けて、すでにとても忙しくなっています。

——なぜMMXの運用にも携わるようになったのですか？

JAXAに入ったときから、開発から運用、解析、利用まで、幅広く現場に携わりたいと思っていました。運用とデータ解析の両方を同時に担当するのは、正直とても大変です。でも、データ解析をしているからこそ、科学者がどういうデータを取りたいのか分かり、そのために観測機器をどう運用すればよいかを考えることができます。二足のわらじを履くというのではなく、運用とデータ解析が両輪となって進めるように頑張っています。

——仕事をする上で心掛けていることはありますか？

私はマルチタスクがあまり得意ではありませんでした。そのため、データ解析と運用という両輪を回していくためにも、視野を広くして状況を把握し、優先度を適切に判断できるように心掛けています。

編集後記

毎回一読者として楽しみにしていたSLIMの連載も今月で最終回になってしまいました。次回の連載もご期待ください。もう9月のはずなのに、テレビをつけると暑い日のニュースばかりで、早く涼しい秋を感じたいものです。肝は冷やしたくないですが。

(坂東 信尚)



ISASニュース No.522 2024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
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/>