

News

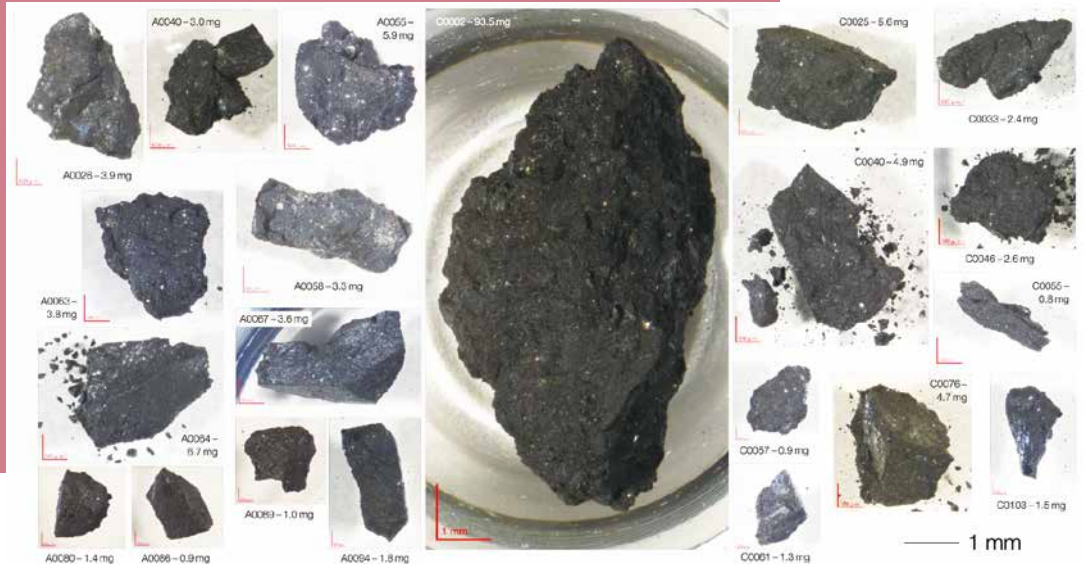
2025

2

No.527

「はやぶさ2」が持ち帰ったリュウグウ粒子

(左) サンプルコンテナ内に見える小惑星リュウグウサンプル。第1回目の着地で採取されたもの。(右)「はやぶさ2」プロジェクト初期分析で分析された個別粒子。これら以外に細粒の集合体試料も分析された。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

リュウグウの石からわかってきたこと

東京大学 大学院理学系研究科 教授 橘 省吾(たちばなしょうご)

「はやぶさ2」が小惑星リュウグウの石や砂を地球に届けて、4年になる。ウーメラ砂漠で朝日に輝く地球帰還カプセルを見た時、宇宙研キュレーション施設でサンプルコンテナ内部の黒い粒子を初めて見た時、「これから分析が始まる」という思いで背筋が伸びた。サンプルリターン探査には、探査機が対象天体への往還を終えてから、始まる科学がある。持ち帰られたサンプルを地球上で分析する科学だ。そして、その科学は将来にわたり続いていく。本稿では、小惑星リュウグウのサンプルとはなんだったのか、「はやぶさ2」プロジェクトチームがおこなったサンプル分析から、わかってきたことの概略を記し、将来への期待も述べたい。

リュウグウにて

C型小惑星*に分類されるリュウグウは、水が含水鉱物として存在し、有機物が含まれることが期待されていた天体であった。含水鉱物や有機物が存在するということは、大規模な加熱も経験しておらず、太陽系最初期の情報が残っている可能性も高い。リュウグウからサンプルを持ち帰り、分析することで、太陽系の起源と初期進化を遡り、また、地球に海や生命の材料がどのようにもたらされたのかを探ろうというのが、リュウグウサンプル分析の科学目標である[1]。

「はやぶさ2」が初めて見るリュウグウは約1kmサイズの暗

*発見されている小惑星の多くがこのタイプである。反射スペクトルが炭素質コンドライトとよばれる水や有機物を含むことのある始原隕石と似ている。

い天体で、表面は岩塊で覆われていた(図1)[2, 3]。水酸基OHによる赤外吸収が確認され、含水鉱物が存在することもわかった[4]。ただし、OHによる吸収の程度は強くなく、水が少ない可能性も指摘された。リュウグウへの着地では、小惑星の石を2地点で採取することに成功し[5]、サンプラー(試料採取装置)[6]の理学担当であった筆者はほっとした(図1)。2回目の着地では、衝突装置がつくった人工クレーター[7]近傍で、クレーター形成で掘り起こされた地下物質の採取を試みた。

玉手箱の中身

「はやぶさ2」は2020年12月6日、地球帰還カプセルを豪州・ウーメラ砂漠へと着地させた。カプセルを発見したのは、サンプラーをつくりあげたエンジニアの澤田弘崇さんだった。長旅を終えたカプセルはウーメラの風を浴びて、もう少しゆっくりしたかったかもしれないが、回収チームはカプセルを基地へと持ち帰り、試料の入ったコンテナを取り出し、コンテナ内部の気体成分をタンクに採取した後[8, 9]、宇宙科学研究所惑星物質試料受入れ設備(キュレーション)へと輸送した。キュレーションの真空チャンバー内で開封されたコンテナの中には真っ黒な石がたくさん見え、サンプルリターンの成功を確信した(表紙画像)。サンプル重量はおおよそ5g(1回目の着地で約3g、2回目の着地で約2g)で、ミッション目標の0.1gを

大きく超えた。

窒素で満たされたクリーンチャンバー内で、撮像や秤量、分光分析などがおこなわれた後[10, 11]、JAXAキュレーション専門委員会で決められた分量(試料総量の6%にあたる0.3g)が、試料を管理するキュレーショングループから「はやぶさ2」チームに渡され、1年間の試料分析(初期分析)が2021年6月より開始された。

太陽系を代表する化学組成をもつ石

リュウグウの石の化学組成は、太陽に最も近い化学組成をもつ隕石(CIコンドライト)によく似ていた[12]。リュウグウは太陽系を代表する化学組成をもつ天体だったのだ。また、リュウグウの石は、含水鉱物や炭酸塩、硫化鉄、磁鉄鉱など、水との化学反応のできる鉱物や、水から析出する鉱物からなり(石全体に含まれる水は重量にして約7%)、かつて液体の水が存在したことも明らかとなった[12, 13]。この特徴もCIコンドライトによく似ていた。また、炭酸塩が水から析出したのが、太陽系誕生から約400万年後で[12, 14]、リュウグウの鉱物達は地球より古い物質であることも確認された。それだけではない。硫化鉄の中には当時の「液体」の水(炭酸水!)が閉じ込められていた[13]。鉱物間の酸素同位体組成分析からは、炭酸塩と磁鉄鉱の共存温度が40℃程度と見積もられ、リュウグウの水は温泉であったらしい[12]。

太陽系の代表的化学組成をもつ石が、代表的な小惑星であるC型小惑星をつくっていること自体は不思議ではない。しかし、CIコンドライトは地上には10個足らずしかない。それはリュウグウの石が脆いことと関係しそうだ。リュウグウの石のような物質は、地球大気圏突入時に壊れ、燃え尽き、地上まで隕石として到達しないのであろう。

このように希少なCIコンドライトであるが、これまで発見されているこれらの隕石は地上で風化し、鉱物の種類が変わったり、地球の水を吸収したりしてしまっている。すなわち、リュウグウの石は、現時点で私たちが手にする地球外物質の中で、太陽系の化学組成を最も代表する物質のひとつである。そのため、現在、宇宙研地球外物質研究グループが中心となって、Ryugu Reference Projectを立ち上げ、リュウグウ試料の平均化学組成を求めるプロジェクトを進めている[15]。

リュウグウの有機物と生命材料

リュウグウの石は、炭素を4-5重量%含み、その2/3程度

が有機物として存在する[12, 16]。含水鉱物と絡み合うように存在する有機物や、1 μ mに満たないような球状の固体有機物など様々な形態で発見され、重水素や¹⁵Nに富む球状有機物も確認された[17]。重水素や¹⁵Nに富む分子は、恒星が誕生する低温(~10K)のガス雲(分子雲)に観測され、これらの分子に起源をもつ物質が、液体の水との化学反応で完全に壊されることなく、リュウグウに残っていると言える。

リュウグウの石を複数の溶媒に浸け、溶け出した有機分子を分析した結果、その化学式が決定できたものだけで、20,000種を超えた[16]。これらの有機分子には、20種程度のアミノ酸や、核酸塩基ウラシル、ビタミンの一種であるニコチン酸も含まれていた[18]。リュウグウのアミノ酸は右手型と左手型(有機分子は立体的な構造を取りうるため、同じ分子でも鏡に映したような二種類が存在する場合がある)がほぼ等量存在していた。地球の生命は左手型のアミノ酸だけを使うことを考えても、非生物的な合成経路でアミノ酸がつけられたものと考えられる。液体の水が存在した誕生直後のリュウグウで多数の有機分子の中に、生命の材料となりえたり、必要としたりする分子も含まれていたということだ。

リュウグウの旅

リュウグウの含水鉱物や炭酸塩をつくった水や二酸化炭素の起源が、太陽系遠方の氷だとすると[13]、リュウグウは太陽から離れた低温領域で誕生した可能性が高い。一方、リュウグウは小惑星帯を代表するC型小惑星であることを考えると、リュウグウやその仲間の天体は、太陽系の遠方から、小惑星帯まで移動してきた天体なのかもしれない。実際、リュウグウの磁鉄鉱に残された残留磁場強度[13]は、原始惑星系円盤内側領域の磁場として考えられるような強さであり、リュウグウが太陽系誕生から数百万年後にはすでに太陽系内側領域に移動していた可能性を示している。そうだとすると、原始の地球に、リュウグウの仲間の小天体が降り注ぎ、海や生命の材料となる水や有機物(しかも、その中には生命前駆分子も含まれる)をもたらしたというシナリオが考えられる。また、リュウグウの水素や窒素の同位体組成は、彗星に比べて、地球の海や空気に近く[16]、水や有機物の供給源としては、彗星よりもっともらしい。

リュウグウ自身は、現在は地球に近い公転軌道をもつ。銀河宇宙線による核破砕反応でつくられる宇宙線生成核種の分析から、採取試料はリュウグウ表面から深さ1m以内に500万

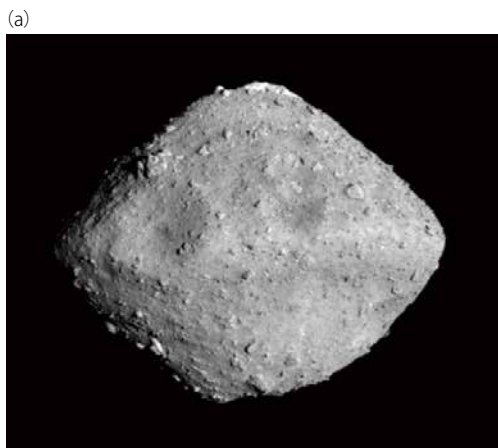


図1: (a)小惑星リュウグウ。©JAXA, 東大など (b)リュウグウでの第2回目のタッチダウン。©JAXA



図2：チームメンバーによって撮影された初期分析スナップショット。

年程度、存在していたことがわかった。これは、リュウグウが今から500万年ほど前に小惑星帯を離れ、近地球軌道に変わり、隕石衝突頻度が減ったため、表面の大規模な掘り返しが起きていないことを示唆する。リュウグウは地球に人類が誕生した頃に、地球近傍へとやってきたのかもしれない[19]。

リュウグウを覆うヴェール

リュウグウの石の表面の一部には、太陽から噴き出すイオン（太陽風）や微小隕石の衝突で、表面鉱物が非晶質化したり、融けたり、脱水したりしている様子が観察された（これらの変質現象は宇宙風化とよばれる）[20]。コンテナから採取されたガスに、太陽風起源のヘリウムが検出されたことも、サンプルに太陽風が打ち込まれていたことの直接の証拠である[9]。宇宙風化による含水鉱物の脱水は、探査機の観測による水が乏しく見えたリュウグウをうまく説明できる可能性がある。リュウグウのようなC型小惑星も宇宙風化のヴェールに覆われ、その実際の姿を内部に隠しているとすると、「はやぶさ2」が人工クレーター形成実験[7]で実施した地下物質の掘削のようなダイナミックな探査も今後重要になりそうだ。

その人工クレーターの近傍から採取した試料の中には、地下物質と考えられるものも見つかっている。2回の着地で得られた試料には大きな差異は認められず、リュウグウの表面は均質であるらしいが、2回目に採取された試料だけ、銀河宇宙線で生成される放射性核種（ ^{26}Al 、 ^{10}Be など）の存在度から見積もられる位置が地下1m程度となるものが存在するのだ[e.g., 21]。

リュウグウの先へ

リュウグウの石の分析を通じ、太陽系で起こった出来事の証拠が積み重ねられている。本稿は「はやぶさ2プロジェクト」による分析の結果に基づいたものだが、同様の成果はキュレーションチームからも得られ[e.g., 22, 23]、また、新しい事実も公募分析などから得られている。今後の報告にも期待していただきたい。また、これらの事実はOSIRIS-REx探査機が持ち帰った小惑星ベヌーの試料[24]と比較検討され、水や有機物を含む小惑星における共通の進化過程や、リュウグウ・ベヌー特有の進化などが浮かび上がってくることだろう。

探査で明らかになる事実がどのような条件で起きたのかを

知るためには、実験室での再現実験も必要となる。望遠鏡による他の惑星系の観測結果との比較も重要であるし、宇宙で起こる様々な化学反応を原子や分子レベルで考え、その一方で、シミュレーションなどで広大な空間スケールの中、100-1000万年というような時間で進む恒星や惑星の誕生や進化を議論することも必要になる。探査をきっかけに科学を広げていきたい。

太陽系起源天体の科学は、(1) 太陽系史をそれ以前の分子雲や銀河での物質進化史と結びつけ、(2) 初期太陽系から惑星誕生までの化学進化を追うことを目指すものである[25]。そのための事実を得るのが、サンプルリターン探査であり、「はやぶさ2」は(1)、(2) 両者に迫ることを目的とし、また、(1)、(2) いずれかに特化したミッション(MMXや次世代小天体サンプルリターン)への橋渡しの役割も担っていたと思う[25]。未来のサンプルリターン探査で明らかになる太陽系の実事を楽しみにしたい。

最後に、リュウグウの石からわかったことがもうひとつある。リターンサンプルの分析は皆が本当に喜んでくれるということだ(図2)。

- [1] Tachibana S. et al. (2014) *Geochem. J.* doi.org/10.2343/geochemj.2.0350
- [2] Watanabe S. et al. (2019) *Science* doi.org/10.1126/science.aav8032
- [3] Sugita S. et al. (2019) *Science* doi.org/10.1126/science.aaw0422
- [4] Kitazato K. et al. (2019) *Science* doi.org/10.1126/science.aav7432
- [5] Tachibana S. et al. (2022) *Science* doi.org/10.1126/science.abj8624
- [6] Sawada H. et al. (2017) *Space Sci. Rev.* doi.org/10.1007/s11214-017-0338-8
- [7] Arakawa M. et al. (2020) *Science* doi.org/10.1126/science.aaz1701
- [8] Okazaki R. et al. (2017) *Space Sci. Rev.* doi.org/10.1007/s11214-016-0289-5
- [9] Okazaki R. et al. (2022a) *Sci. Adv.* doi.org/10.1126/sciadv.abo7239
- [10] Yada T. et al. (2022) *Nat. Astron.* doi.org/10.1038/s41550-021-01550-6
- [11] Pilorget C. et al. (2022) *Nat. Astron.* doi.org/10.1038/s41550-021-01549-z
- [12] Yokoyama T. et al. (2022) *Science* doi.org/10.1126/science.abn7850
- [13] Nakamura T. et al. (2022) *Science* doi.org/10.1126/science.abn8671
- [14] Sugawara S. et al. (2024) *Geochim. Cosmochim. Acta* doi.org/10.1016/j.gca.2024.08.013
- [15] <https://curration.isas.jaxa.jp/rfp/>
- [16] Naraoka H. et al. (2023) *Science* doi.org/10.1126/science.abn9033
- [17] Yabuta H. et al. (2023) *Science* doi.org/10.1126/science.abn9057
- [18] Oba Y. et al. (2023) *Nat. Commun.* doi.org/10.1038/s41467-023-36904-3
- [19] Okazaki R. et al. (2022b) *Science* doi.org/10.1126/science.abo0431
- [20] Noguchi T. et al. (2023) *Nat. Astron.* doi.org/10.1038/s41550-022-01841-6
- [21] Nishiizumi K. et al. (2023) *Hayabusa Symposium 2023*
- [22] Nakamura E. et al. (2022) *Proc. Jpn. Acad. Ser. B* doi.org/10.2183/pjab.98.015
- [23] Ito M. et al. (2022) *Nat. Astron.* doi.org/10.1038/s41550-022-01745-5
- [24] Lauretta D. S., Connolly H. C., Jr. et al. (2024) *Meteorit. Planet. Sci.* doi.org/10.1111/maps.14227
- [25] 橋ほか (2014) *地球化学* doi.org/10.14934/chikyukagaku.48.265

宇宙研の直面する経営課題への対応

現在宇宙研において、立ち上げ段階のプロジェクトは、大きな壁に直面し、進捗が滞っている。昨年ミッション定義審査(MDR)を終えたLiteBIRDは、参画機関のひとつの撤退という機関間の大型共同計画としての問題に直面し(下記藤本記事参照)、同じくMDRを終えたJASMINEは、この時点でコスト上限値を大幅超過し、共に次のフェーズに進めない状態に陥ってしまった。このため宇宙研として、後続の宇宙科学プログラムが持続的に遂行できるような道筋が求められている。

JASMINEの状況は、JASMINE固有の事情ではなく、宇宙研を取り巻くこれまでにない環境変化に起因するものである。具体的には、

1) ウクライナ問題、コロナ禍を発端とし、大幅円安も強く影響する急激な物価上昇

2) 宇宙科学に割けるメーカーリソースの逼迫

これは、宇宙予算増加による宇宙科学外の受注増加、企業統治強化による赤字リスクの可能性の高い宇宙科学への慎重姿勢、などに起因する

3) アルテミス計画等との連携、ベンチャー活力の活用必要性などが挙げられる。

このような課題に対応するため、昨年10月に経営課題対応タスクフォースを立ち上げ、3つの分科会の活動を開始した。

1) 衛星アーキテクチャ分科会：すでに10年以上経過した小型

科学衛星バスにつき、衛星の高コスト化の状況、及び初号機からの技術発展を踏まえ、低コストかつ小型・高機能な科学探査ミッションを創出するための衛星アーキテクチャの刷新を行う。また、新たな小型科学衛星バスの公募時の運用ルールを検討し、整理する。

2) ECO公募分科会：公募型小型計画2024年度公募では、125億円を上限とし、採択より5年程度で打上げという条件でのECO&FAST公募を実施したが、今後、よりECO公募の機会を拡大していくことが持続的な宇宙科学プログラムにおいて重要であり、ECO公募の在り方や活用の方策について検討を行い、120億円程度で価値がある利用方策をまとめる。

3) 大型国際協力分科会：宇宙科学・探査ロードマップの改定で海外計画への大規模参画は戦略的中型として可能となった。HWO*1、UOP*2、ESA・L4*3といった現状見えている大型計画への参画の可能性や、参画の前提となる技術的成熟度(TRL)の向上方策、参画のプロセス等の整理を行う。

本タスクフォースが中心となって、将来フレームワーク検討委員会とも連携して、2040年代までを見据えた持続的な宇宙科学・探査プログラムの実施へ向け、宇宙研の主要な経営課題を抽出し、今後の方向性を検討していく。

(プログラムディレクタ/佐藤 英一)

* 1 NASA の大型計画「Habitable Worlds Observatory」：ハビタブルゾーンにある系外惑星の観測ミッション * 2 NASA の大型計画「Uranus Orbiter and Probe」：天王星探査ミッション
* 3 ESA Voyage 2050 の最初の大型計画：土星衛星探査ミッション

LiteBIRDのリフォーメーション(“改革”)

LiteBIRD(ライトバード)は、宇宙の始まりの瞬間を探るといって挑戦的なミッションである。上記、佐藤プログラムディレクタの記事にある参画機関の撤退という問題を契機に、現在計画の見直しに取り組んでいる。

宇宙は138億年前に高温高密度の状態から始まり、それが大きく膨張することで現在の姿になった(ビッグバン宇宙論)。なぜそのような高温高密度の状態から始まったのか?それを説明するのがインフレーション理論である。この理論によれば、時空が急激に膨張(インフレーション)した後、相転移を起こして高温高密度になり、ビッグバンが始まった。インフレーションが本当に起きたとすると、宇宙マイクロ背景放射(Cosmic Microwave Background radiation; 以下CMB)に「原始重力波Bモード偏光」と呼ばれる渦巻き状の痕跡を残すと考えられている。この原始重力波Bモード偏光を検出し、インフレーションの



2025年1月に国際チームが宇宙科学研究所に結集し、リフォーメーションに関して集中審議した。

観測的証拠をつかむのがLiteBIRDである。そのために望遠鏡を絶対温度5度(摂氏-268度)に冷却し、さらに絶対温度0.1度(摂氏-273.05度)に冷却した数千個の

極低温検出器を使用する。しかしながら、極低温検出器の担当機関が撤退を決めたため、状況は一転した。2024年9月に宇宙科学研究所は、LiteBIRDの見直し検討を約1年かけて実施し、その後に検討継続の可否を判断すると決定した。

参画機関の撤退は、LiteBIRDチームにとって衝撃的な出来事だったが、逆にこれを貴重な機会と捉え計画の実現性を高めるべく、あらゆる角度から見直しに取り組んでいる。すなわち、インフレーション理論の検証という科学目的は維持しつつ、検出器技術の見直し、望遠鏡の簡素化、極低温冷却システムや衛星バス系の再検討など、広範に及んでいる。また、研究代表者(PI)交代を始めとする組織の若返りを実施。さらには、地上の大型CMB観測計画ともこれまで以上に連携を深めて相乗効果を高める予定である。写真は、この1月に国際チームが宇宙科学研究所に集結し、集中議論を行なっている様子である。

LiteBIRDは現在宇宙機関で計画されている唯一のスペースからのCMB観測計画である。全天広帯域が可能なスペースからの観測は、インフレーション仮説の探索において地上CMB望遠鏡と相補的な知見を与える。同時にミリ波サブミリ波全天マップはインフレーション探索だけに留まらない宇宙論から宇宙物理など広い科学的価値を創造する。参画機関の撤退という困難に直面しているものの、与えられた1年の見直し期間でこの挑戦的な計画を再度軌道に乗せるべく、国際チームが一丸となって最大限の努力を続けている。

(LiteBIRDプリプロジェクト候補チーム長/藤本 龍一)



月面天文台TSUKUYOMI計画

今回は、月面の科学三本柱のもうひとつ、「月面天文台」TSUKUYOMI(ツクヨミ)計画について紹介します。

ツクヨミ計画は、月面に宇宙電波観測アンテナを多数展開し、とくに主要な目的として138億年前の宇宙に星や銀河が誕生する以前、すなわち「宇宙の暗黒時代」における中性水素線(超微細構造遷移: 本来の波長21 cm、周波数1.42GHzの電波に相当)のグローバルシグナルを観測することを目指すものです。ビッグバンから1億年くらいの間(138-137億年前)の暗黒時代にはまだ星も銀河もできていませんが、その材料でもある水素原子の信号を用いることで、この時代の宇宙の姿を知ることができます。空間的な情報を積分した、いわば宇宙の平均的な中性水素の状態を示す周波数スペクトルをグローバルシグナルと呼びますが、背景光となる宇宙マイクロ波背景放射に対して、それぞれの時代での熱的な状態によって吸収または輝線的なスペクトルを示すこととなり、原理的には様々な波長で中性水素線スペクトルを観測することで様々な時代の宇宙の水素ガスの状態や分布を知ることができます。暗黒時代の21 cm線グローバルシグナルは、~15 MHz付近(赤方偏移~100前後)を中心とする微弱(輝度温度で $\Delta T \sim 40$ mK)で数10 MHzの巾をもつ吸収スペクトルとして観測が期待されます(図1)が、星や銀河などの形成の影響を受けていないため、純粋に宇宙論を検証することが可能です。

このような数10 MHzの電波周波数帯は地球大気のエンドレンジ層のため、地球上での観測は著しく困難です。また、VHFや短波など、地球の強い人工電波やAKR(オーロラ現象に伴う天然の電波雑音)の影響があり、地上や地球周回軌道での精密観測に適しません。ところが、地球が見えない月の裏側であれば、地球からの人工電波の影響を避けて精密な観測が可能であると期待されます。このため、宇宙の暗黒時代の中性水素21 cm線グローバルシグナルの観測は、まさしく月面でこそ実現可能な究極の科学目的のひとつと見なされており、国際的にも多くの注目が集まっています。地球に住む人類にとって宇宙へのアウトポスト(前哨)というべき月の裏側で宇宙のはじまりに目

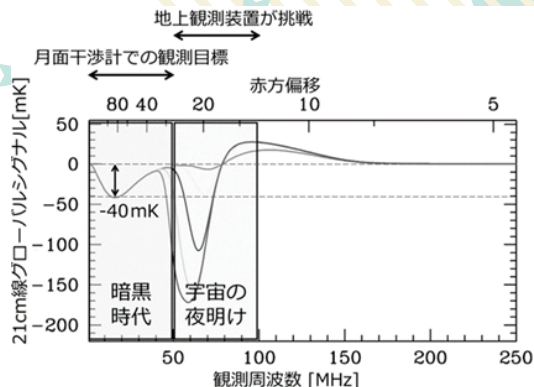


図1: 宇宙初期における中性水素のグローバルシグナルの理論予想。

図2: 月面に展開された自立アンテナ群のコンセプト図。



を凝らす、そんな魅力的な課題のひとつと考えられるわけです。また、このような比較的低周波の電波観測は、太陽・惑星電波ひいては系外惑星系の電波観測や、月面における浮遊ダストの計量や誘電率測定、月の弱い電離層の測定など月の科学、そして月面における電波環境計測の把握などの課題への応用も期待されます。

ツクヨミ計画では、ALMA望遠鏡をはじめとする電波天文学の実績や、「かくや」そしてSLIMをはじめとする月探査における宇宙工学・理学研究の成果、「あらせ」、JUICEなど電波観測を実施する科学衛星、そして、宇宙論理論研究などの実績に基づき、宇宙研の理学(天文学・惑星科学)・工学分野の研究者、国立天文台、東北大学、大阪公立大学、岡山理科大学、熊本大学のさまざまな分野の研究者らが参加して、月面での多素子電波観測システムの段階的な実現を目指す開発研究がすすめられています。暗黒時代の21 cm線グローバルシグナルは、周波数方向に幅広く、また微弱な信号で、その確かな検出には、周波数方向に安定な特性で精密な観測を実現する必要があります。前景放射として卓越する我々の天の川銀河の放射の強さや周波数スペクトルを考慮しつつどのように周波数特性を校正できるかがこの観測の肝になります。アンテナのビームパターンへの月面の影響も考慮する必要があります。これらの検討に基づいて、ツクヨミ計画では、ショート・ダイポールアンテナ案を採用し、低雑音受信システム・データ処理システムについての概念検討・設計や月面から十分な高度にアンテナを展開するための支柱およびその展開機構、そしてアンテナ自体の展開機構の開発研究を進めています。2020年代に月探査促進ミッションとして期待される試作初号機(TSUKUYOMIプロトタイプアンテナ LOPTA)では、月面での宇宙電波受信観測の実証を目指し、次段階では、月面での越夜観測、夜間観測(徹夜観測、と呼んでいます)を可能にする、保温・発電・蓄電・通信機能を考慮したいわば自立アンテナシステムの機能の実証を目指します。これらを踏まえて2030年代の終わりまでに、月面に10基以上からなる自立アンテナ群を展開し、月面電波望遠鏡および干渉計として観測を実現することが目標です(図2)。10基以上のアンテナの展開は、月面の探査における様々な手段・インフラの活用・協力や国際協力もみすえながら、段階的に発展してゆくことができるのも利点のひとつになります。

山田 亨(やまだ とおる)

国境の壁を乗り越えて： 気球回収奔走旅記

名古屋大学 大学院理学研究科

石橋 和紀 (いしばしかずのり)

「そんな大きな貨物の空輸は、この辺の輸送会社では無理だよ」と異国の地で言われたら、皆さんどうしますか？

このお話は、国際気球実験ミッションXL-Caliburが2度目のフライトに成功 (ISASニュース2024年10月号^{*1}参照) し、カナダに着地した2024年7月14日から始まりました。2年前の最初の打上げの時に機器回収メンバーとしてカナダに派遣され、その過酷さから「もう二度と回収には行かぬえ」と明言していた私。しかし、気がついた時にはまたカナダの試される大地に足を踏み入れておりました。ただし、今回の着地点が北極海に面するKugluktukという村の近隣であったこと、そして、熟練した回収チームであったことから、着地点での全作業はたった2日で完了し、カナダでの中間基地であるYellowknifeへの機材の輸送とNASAへの搬送の準備も着地から2週間というスピードで完了できました。その時は「7月内に帰国できるな」と軽口を叩く余裕すらあったのですが、、試練の大地はそんなに甘くはないのです。

諸々の問題が発生し、前から準備していた望遠鏡の輸送手段を使えないことが判明。望遠鏡を日本に送り戻す手段が無くなり、まさに“Let's panic”です。なお、通常の観測機器類はNASAの手配により陸路にてアメリカへ輸送されるので、この問題は起こりません。しかし、我々の望遠鏡は高温側での温度管理が重要となり、夏の米国の炎天下に晒すような陸路での空調なしのコンテナ輸送はご法度なのです。よって、温度管理が為された空路輸送を行うには、日本側が独自で対応せねばなりません。

問題解決に必要なのは新規の輸送手段。私はレンタカーを借上げ、そして2日程かけてYellowknifeにある数多の貨物輸送会社に飛び込み訪問し、輸送依頼の可能性を模索して回った結果、全てお断りでした(涙)。とはいえ、無碍に扱われたわけではなく、相談する度に「あの会社ならやってくれるかも」とか、「この会社の〇〇さんに相談してみるといいよ」とか、非常に親身になって対応してくれた方々ばかり。本当にカナダ人の優しさには心が救われました。

しかし、心は救われても、状況は改善しません。その後、NASAのロジスティック担当の先人達の伝手を頼り、様々な輸送の方法を模索したのですが、どれも実現困難という顛末。国境の壁は高いなとつくづく実感した次第でした。しかし、そんな時です、日本側で別途調整していた輸送会社の方から「輸送の手配はできますよ」との朗報があったのは。そこから、日本とカナダの両サイドにて時差を超えた連携を行い、数多の電話とネットでの調整を行った結果、あっさり輸送手配が完了。ここ数日の努力はなんだったのかと、喜び半分、嘆き半分の気分でした。

ただ、「なんて無駄な日々、無駄な旅費を浪費したんだ」とお考えの貴方！ここからの話を聞けば、その日々も無駄でなかったことが理解できます。



ヘリによる回収作業の風景(望遠鏡トラスは左下、搬送されているのは検出器)。遠方の山火事のせいで夕方の方のように見えていますが、まだお昼時です。

輸送の手続きも完了し、いよいよ貨物集荷予定日になりました。長い待機のせいもあってか中々寝付けず、ちょっとマナー違反かなとも思いつつも、集荷を行う輸送会社に朝一番に集荷予定時刻を尋ねに伺ってみたところ、「そんな集荷の予約入ってないね」と返答。

がーん。

私の悲壮な顔を見つ「いや、よくあるんだ、こういうこと」と慰めてもらっても喜べません。でも、その担当の方は、ここ数日の私の苦勞を見てきていた方だからか、次の救いの言葉を投げてくださいました。「今日暇だから、今から集荷してやろうか?」と。

あなた、天使ですか？

この輸送会社、実は冒頭の「空輸は引き受けられないよ」と言った会社ですが、何度か顔をだして色々相談しているうちに、親身になって助けようとしてくれたのです。もう当然“Yes, please!”と即答でした。色々が無駄と思われた苦勞が報われた瞬間でした。

ちなみに、空輸は無理というのは事実だったようで、実際にはYellowknifeという街からEdmontonという大都市までは陸路^{*2}で輸送したことを後日に知りました。何気にその陸路移動中は貨物のトラッキングができず、それ故にカナダ側の調整員の方からは「えっと、貨物を紛失した模様ですね、すみません」などという誤報をいただいたりもしましたが、あんな大きな貨物をそう簡単に失くすはずはないと皆で信じ、根強く再確認を待った結果、我々の望遠鏡は順調に日本に向けて移動していることを確認、そして、お盆休みに成田へ到着。無事に国境の壁を乗り越えることが出来たのでした。輸送成功に至るまでの努力は、広島大の高橋 弘光さん、宇宙研の前田 良知さん等、そして、現地カナダでの輸出の手助けをしてくださったADL社のブライアン・ラザリッチさんなど、多くの方々の助力がなければ実現できませんでした。この場を借りて皆様に御礼申し上げます。

*1 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews523.pdf

*2 カナダの夏の気温はアメリカの気温ほどではなく、温度管理上のリスクは低いです。



宇宙科学研究所 元所長
JAXA 名誉教授

小野田 淳次郎

(おのだじゅんじろう)

内之浦の思い出

ISASニュース編集委員会から本欄に一文を書くように依頼されました。内容は宇宙に係るものなら何でもよいとのことでした。いも焼酎と宇宙と言えば頭に浮かぶのは内之浦。ここで言う内之浦とは1962年から400機を超える宇宙科学目的のロケットを打ち上げてきた射場、内之浦宇宙空間観測所とその所在地の街のことです。ここでは内之浦にまつわる思い出を書かせていただきます。

私は1969年の大学院入学時に、当時の東大宇宙航空研究所(宇宙研)の森 大吉郎教授の研究室に受け入れていただきました。翌1970年にL(ラムダ)-4S-5号機により日本初の人工衛星「おおすみ」の打上げに成功すると、科学衛星を打ち上げられる、より大きいM(ミュー)ロケットの開発が急ピッチで行われました。

学部生時代の見学旅行を除き、内之浦に初めて行ったのは、恐らく1971年のM-4S-3号機の打上げの頃でした。院生の立場で手伝いをしながらロケット打上げの何たるかを学ぶ目的でした。先輩の院生だった若原 洋一氏に連れられて、丸一日以上をかけて内之浦に到着しました。夕食時に若原氏が見当たらないので焼酎を飲みながら待っていたところ、気が付くと翌朝でした。聞けば昨夜は夕食もきちんと食べて寝たとのこと。これが内之浦の芋焼酎との出会いでした。

打上げのためには宇宙研と各メーカーからのメンバーで「実験班」なるチームを編成して内之浦での作業に当たりました。班員は内之浦の旅館の1つを定宿にすることが多く、私も福の家さんに30年以上お世話になりました。夕食時の食堂には名前を書いた焼酎の一升瓶を各々抱えて夕食を楽しむ姿が定着していて、私もその一人になっていました。

大学院卒業後、宇宙研の助手に採用していただきました。この時、森教授から、ロケットと衛星の構造分野を担当するよう指示されました。私には、「構造分野の落ち度でロケットや衛星のミッション達成を損なうようなことがあってはならない」と聞かされました。

科学観測への実用が急がれたMロケットは、科学観測に使用しながら適宜最新技術を導入して高度化を図る方針で

開発され、M-4SからM-Vまでの6バージョンが開発されました。そして、最後のM-Vの場合はロケットの頭からつま先まですべて新規設計となり、全段固体燃料のロケットとしては世界最大級となりました。新しいロケット開発にはよくあることではありますが、M-Vの開発も予期しない、しかも構造関係の課題に直面し、約2年計画が遅れました。開発が山場を越えた1996年、松尾 弘毅教授の跡を継いでMロケット計画主任(プロジェクトマネージャの様な役)を仰せつかりました。

1997年2月12日、M-V初号機の打上げを迎えました。この頃、初号機の打上げであることを踏まえ、成功確率を少しでも上げるために計画主任にできることは、失敗モードの見落としを無くすることと考え、寝ても覚めても失敗モードのことばかりを考えた毎日でしたが、結果的には電波天文衛星「はるか」を正常に打ち上げることができました。同時に、新規に開発したロケットの初号機の打上げが如何に大変なことであるか、痛感させられました。

2000年2月10日、4号機を打ち上げました。第1段燃焼末期に、管制室のモニターに映るM-Vロケットの姿勢が乱れ、横腹が見えたものの、第一段切り離し後は一見正常に復しました。しかしやがて電波誘導班の前田 行雄氏が指令電話で「速度がたりない」と悲鳴を上げ始め、結果的にはX線天文衛星ASTRO-Eを失う事となりました。原因は第一段ロケットモーターのノズルスロットと言う部品の破損だとすぐに同定できましたが、その対策には3年を要しました。

この対策に加え、もともと予定していた第2段ロケットモーターの性能向上等のための改良を行い、5号機は2003年5月9日に「はやぶさ」の打上げに成功しました。これが私が打上げに直接関与した最後のロケットでした。M-Vロケットが飛翔に復帰した好機に、Mロケット計画主任は森田 泰弘教授に引き継いでいただきました。この6年余の間に、初号機の成功、打上げの失敗、飛翔への復帰の全てを体験したことは、良くも悪くも貴重な経験でした。

ロケットの射場から遠くない位置に長坪観音と呼ばれる小さな祠があり、ロケットの打上げに当たり、実験班代表が芋焼酎の一升瓶を携えて成功祈願にお参りするのが習慣となっていました。祠は小さいが霊験あらたかで、多くの打上げを成功に導いていただきました。M-V-4号機の打上げの時だけは、内之浦の街を見下ろす丘の上の叶神社の行事があったことから、叶神社にもお参りしました。失敗したときには、「神頼みが過ぎる。甘えるな」との声が聞こえた気がしました。

M-Vロケット打上げ時には、200名余の実験班員が内之浦に集結し、ことに当たりました。多くの百戦錬磨の指導者のもと、誰もが自分の担当分野をよく理解し、必要なときに適切な行動をとれる集団でした。写真はM-V-5号機打上げ前の実験班員の集合写真です。素晴らしいチームでした。



》電源系の挑戦は続く

宇宙用太陽電池の品質評価方法を革新

——専門を教えてくださいませんか？

電源系と呼ばれる宇宙用の太陽電池やバッテリーの研究開発をしてきました。現在は、深宇宙探査技術実証機DESTINY+プロジェクトで、プロジェクトエンジニアとして工学側の責任者をしています。

——どのような経緯で宇宙研に？

大学では工学部電気工学科に進み、大学院では高電圧工学の研究室に所属しました。宇宙とは関わりがなく、就職も電力系の研究所を考えていました。そんな折、宇宙研で高電圧や放電を専門とする研究者を募集していることを耳にしたのです。

——どのような研究開発に携わってきたのでしょうか？

私が宇宙研に入ったのは金星探査機「あかつき」と水星探査機「みお」の開発が本格化するタイミングで、それらの太陽電池の開発を担当しました。私が所属していた研究室の田島 道夫先生は、シリコン結晶にレーザー光を当てることで励起された電子が、基底状態に戻る際にエネルギーを光として放出するフォトルミネッセンスという現象を利用した半導体評価研究の第一人者です。放出される光の相対強度が結晶中の不純物濃度に比例することを発見し、国内外の半導体評価基準として採用されました。また、非破壊で結晶中の欠陥の二次元分布を可視化することもできます。

一方、宇宙分野では、太陽電池を人がルーペで見て、クラック(割れ)などの異常がないか検査していました。この作業には高度な技術を要し、熟練者にしかできません。そこで私たちは、フォトルミネッセンスを太陽電池の検査に導入しました。クラックなどの異常が素人でも一目で判別できます。フォトルミネッセンスを宇宙用太陽電池の検査に使ったのは世界初で、国際会議で発表した際には大きな反響がありました。この経験を通じて、私は研究と開発の橋渡しの重要性を強く意識するようになりました。

SLIMの想定外の月面着陸を支えたバッテリーと太陽電池

——宇宙用バッテリーの研究開発についても教えてください。

宇宙飛行工学研究系の大山 聖さんから、火星探査用の飛行機のバッテリーについて相談を受けました。従来の宇宙用バッテリーは、真空中で膨張しないように、また打上げ時の衝撃や振動にも耐えられるように、外装に金属缶を使った頑丈なつくりになっています。とても重いので、火星飛行機に搭載できません。

軽量化のよいアイデアがないか考えた末、バッテリーの外装の強度はそこそこでよいとして、翼の中に入れるなど構体と合わせて必要

宇宙機応用工学研究系 助教

豊田 裕之 (とよた ひろゆき)

1977年、神奈川県生まれ。東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2005年より現職。DESTINY+プロジェクトチーム、専門・基盤技術グループを併任。



な強度を持たせることを考えたのです。そして、古河電池と協力し、外装にSUS(ステンレス)の0.1mmの薄板を用いたラミネート型電池を開発しました。このSUSラミネート電池は、火星飛行機より先に小型月着陸実証機SLIMに搭載されました。

——SUSラミネート電池は期待通り機能しましたか？

SLIMは月面ピンポイント着陸に成功しましたが、想定外の姿勢だったため着陸直後は太陽電池に光が当たらず、発電ができませんでした。その状況でもSUSラミネート電池の電力を使うことで、データを地上に送信し、マルチバンド分光カメラによる初期観測もできました。よし!と思いましたし、今でも月を見ると、SLIMがあそこにいるんだなと感慨深いです。

SLIMは、太陽電池も画期的でした。シャープが開発した3接合型太陽電池で、非常に薄くて軽く、曲げることもできます。宇宙でよく使われている3接合型太陽電池の厚さは150μmほどです。SLIMの太陽電池の厚さはわずか13μm。薄くなると熱暴走のリスクがありますが、それを抑制し製品化に成功しているのは世界でシャープだけです。月の夜は地球の時間で約14日間続き、マイナス180℃にもなります。SLIMは夜を超えられないと考えられていたのですが、夜が明けて太陽電池に光が当たると発電が始まり、再起動しました。そして、夜をなんと3回も越えられました。これは、この太陽電池の性能がいかに高いかを示しています。

低温で充放電可能な電池、ワイヤレス充電、温度差発電……

——ほかにも開発中のものがあれば、教えてください。

超小型火星着陸機に搭載する低温で充放電が可能なバッテリーや、ワイヤレス充電技術の開発にも取り組んでいます。さらに、氷の下に海を持つ木星の衛星エウロパや土星の衛星エンケラドスでは温度差や海流を利用し、火山活動が活発な木星の衛星イオでは地熱を利用し、磁場が強い木星や土星では放射線帯の高エネルギー粒子を利用するといった、新しい発電手法を模索しています。

——研究開発を行う中で心掛けていることはありますか？

絶対にこれをやりたい、と決めて進むタイプではありません。そのときの環境で、自分が何をやれば自分も周りの人も楽しく、そしてプロジェクトが成功するかを考え、それに全力で取り組むことを心掛けています。

宇宙探査において電力は不可欠で、常に新しい技術開発が求められます。でも実現して探査機に搭載されたとき、電源系は前面には出できません。そういう立ち位置も、自分に合っていて心地よく感じます。

編集後記

さまざまな人・衛星・探査機がさまざまな場所で活躍し、太陽系史や宇宙開闢までも見通す。そんなバラエティ豊かな記事を今号もお楽しみいただけたでしょうか。編集担当も2回目となりました。さらに素敵な記事をお届けしていきたいと思います。

(鳥海 森)



ISASニュース No.527 2025年2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/JAXA 宇宙科学研究所長 國中 均
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