SIC 有人宇宙学研究センター
NewsLetter 2026 年 11 月号 No.59

OBAMA ルナダイブプロジェクト ― 小浜の海から宇宙へ
若狭高校生 2 名が PADI 公認「スペースダイビング 1」を修了
高校生として初の認定ダイバーに

若狭高等学校主催　海洋実習 2026 年 10 月 11 日　福井県小浜市宇久漁港

2026 年 10 月 11 日、福井県立若狭高等学校の主催により、PADI のディスティンクティブ・スペシャルティ・コース「Space Diving 1（スペースダイビング 1）」の海洋実習を小浜市宇久漁港沖で実施した。参加したのは同校スキューバダイビング部 3 年生の桑田寧々さん（JUDF オープンウォーター）と山口明さん（JUDF アドバンス）の 2 名で、事前のオンライン学科講習と海洋実習を経て、高校生として初めて本コースの認定ダイバーとなった。研修の実施は本センター（京都大学大学院総合生存学館）、AquaNaut Lab、株式会社アムテックが担当し、宇久定置網有限会社、小浜市、喜一工具株式会社、DMG 森精機株式会社の協力を得た。

9 月 26 日・27 日に同校教員 2 名を対象に行ったテストロール（本誌 10 月号参照）で安全性と教育的な効果を確かめたうえで、今回はじめて生徒が受講した。若狭高校は、高校生として初めて JAXA の宇宙日本食認証を受けた「サバ缶」で知られ、その開発を機に本センターとの連携が始まった。本研究の適地を探すなかで小浜の海が最も条件に合うことが分かり、地元小浜市、漁業者、企業との共同研究に至った。プロジェクトは「OBAMA ルナダイブプロジェクト」と名付けられている。

水中で「1/6G 相当」をつくる

月面の重力は地球の 6 分の 1 である。本コースでは、参加者と装備を水中で中性浮力に調整したうえで鉛のウエイトを加え、体重の 6 分の 1 に相当する下向きの荷重をつくる。鉛は水中では表示重量の約 0.91 倍しか効かないため、加える鉛は体重のおよそ 0.18 倍、体重 60 キログラムなら約 11 キログラムになる。鉛は肩・腰・足首の 3 か所に左右対称に配分し、体重ごとの標準表から選ぶ。再現しているのは足の裏にかかる静的な荷重だけで、月面の慣性やレゴリスの挙動、宇宙服の与圧や生命維持装置は再現していない。この線引きは生徒にも最初に伝えた。

今回の実施内容

当日は 9 時に集合してブリーフィングと陸上でのランドドリルを行い、心拍数と心境の調査を実施したのち、宇久漁港から出港した。波の穏やかな水深約 10 メートルの砂地で、生徒はフィンを外して 1/6G 相当の荷重下に入り、海底に立つ、歩く、止まる、姿勢を立て直す、という一連の動作を行った。続いてリールでラインを敷きながらのナビゲーションと試料採取のシミュレーションに取り組み、緊急時の対応（ウ

エイト脱着、フィン装着、マスク脱着、シグナルフロート打ち上げ）を確認した。実習の前後には心拍数と心境の変化を記録し、普段と異なる環境での自己管理について検証する。

荷重をかけるのは 1 名ずつとし、監督者は常に手の届く距離を保った。呼吸の乱れ、耳抜きの不良、姿勢を立て直せない、足裏の接地を失うといった状況では中止する。1/6G 相当をつくることより、安全の操作が常に優先される。

桑田さんは「緊張したが、最終的な達成感は非常に大きかった」、山口さんは「水中を走れる、宙返りできるのは初めてで、新しい世界を体験した」と話した。

役割と体制

PADI ダイビングコースとしての Space Diving プログラムは PADI インストラクター（MSDT）で AquaNaut Lab 代表の藤永嵩秋氏 が提案し作成した。また、海洋実習の実施は PADI コースディレクターで株式会社アムテック代表取締役の久保彰良氏（PADI Asia Pacific Japan 元取締役トレーニング部長）が主に担当した。引率は同校スキューバダイビング部顧問の小畑有海教諭。海域と船は宇久定置網有限会社（浦谷俊晴代表取締役）の協力を得た。

本センターの山敷庸亮（PADI インストラクター（OWSI））は、全体プログラムの統括と、中性浮力を基準に体重の 6 分の 1 の荷重を与える「擬似 1/6 重力」の設定法を提案しコースに組み入れた。

今後

小浜市における宇宙産業や新たな海洋産業の創出につなげ、小浜の海を未来の宇宙研究の基地へと発展させることを目指す。来年度には JAXA 宇宙飛行士による体験を予定している。本コースの設計と荷重の設定法は、第 70 回宇宙科学技術連合講演会（2026 年 11 月、講演番号 1J15）で報告する。



写真 1／実習を終えて、宇久漁港にて（2026 年 10 月 11 日）



写真 2／海底で追加ウエイトを装着する生徒。フィンを外し、1/6G 相当の荷重下に入る

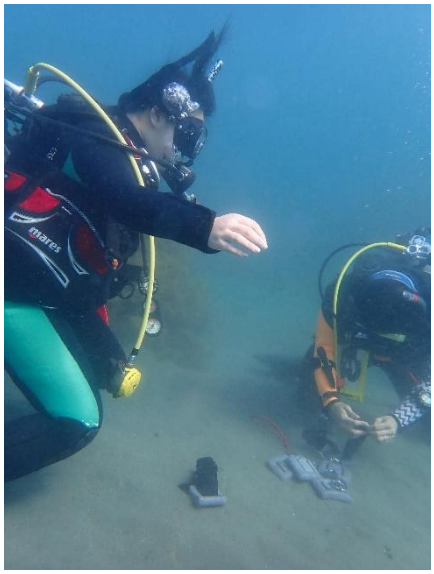


写真 3／海底に並べた追加ウエイト。
インストラクターが手の届く距離で準備し、生徒が受け取る



写真 4／ウエイトを左右対称に取り付ける。
鉛は肩・腰・足首の 3 か所に配分する

主催：福井県立若狭高等学校
実施：京都大学大学院総合生存学館 SIC 有人宇宙学研究センター、AquaNaut Lab、株式会社アムテック
協力：宇久定置網有限会社、小浜市、喜一工具株式会社、DMG 森精機株式会社
関連報道：福井テレビ「小浜の海で月面浮遊を体験できるか？若狭高校生が世界初のプログラムに挑戦 京都大やダイビング企業も連携」（2026 年 10 月 11 日）
参考：若狭高等学校プレスリリース「OBAMA ルナダイブプロジェクト」（令和 8 年 10 月 1 日）／SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2026 年 10 月号 No.58
（京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター長 山敷庸亮 記）

開催報告

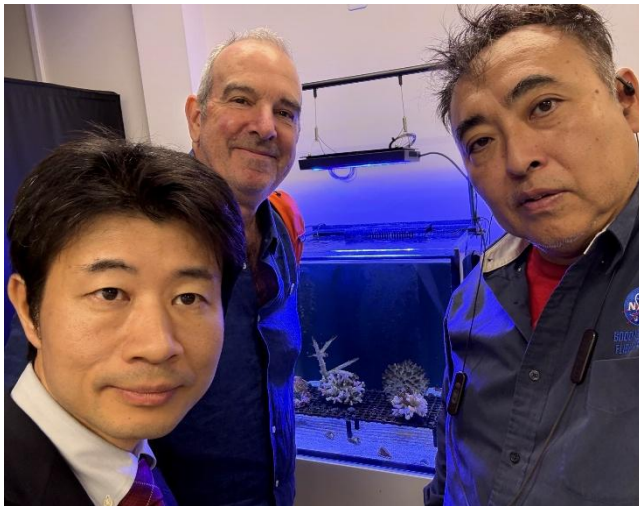
Virgin Galactic 宇宙飛行士 Ron Rosano 氏 特別講演
「無重量の宇宙へ ― サブオービタル宇宙飛行から見た地球」

2026 年 10 月 8 日（木）、京都大学 東一条館において、Virgin Galactic の商業宇宙飛行士 Ron Rosano（ロン・ロサノ）氏による特別講演「Weightless in Space: Perspectives of Earth From A Suborbital Space Flight」を開催しました。主催は京都大学 SIC 有人宇宙学研究センターと環境災害研究会で、会場とオンラインの併用で行いました。

開会にあたり、Astraporta 株式会社 代表取締役 CEO の稲波紀明氏が Rosano 氏を紹介しました。稲波氏自身も Virgin Galactic の宇宙旅行を待つ一人で、Rosano 氏とは約 20 年来の友人です。



講演後の記念撮影（後方のスクリーンは ExoKyoto で表示した系外惑星 Kepler-452 b）



サンゴ水槽の前で（中央が Rosano 氏）

民間の宇宙飛行は、どこから始まったか

講演は、民間宇宙飛行の歴史から始まりました。1927 年、リンドバーグは賞金に挑んで大西洋を無着陸で横断しました。それと同じように、2004 年には民間の宇宙船「スペースシップワン」が賞金レース「アンサリ X プライズ」を制し、民間でも宇宙へ行けることを示しました。これに触発されて生まれたのが Virgin Galactic です。

Rosano 氏は、ワシントンのスミソニアン博物館でスペースシップワンを目にしたとき、初めて「普通の人でも宇宙へ行ける」と信じられたといいます。2010 年にチケットを購入し、2023 年 10 月 6 日、Galactic 04 ミッションで宇宙へ到達しました。人類で 668 人目の宇宙到達者です。

3 日間の訓練と、十数年のイメージトレーニング

飛行前の訓練は、わずか 3 日間でした。宇宙船と母機の見学、座席の確認、曲技飛行による加速度への慣れ、実物大の客室模型での動きの練習、そして管制と一体の本番通りのリハーサルです。乗客は宇宙船を操縦しないため、この期間で十分だといいます。

その代わりに Rosano 氏が長年続けてきたのが、頭の中での予行演習でした。床に寝て足を上げ、打ち上げの姿勢をとり、実際の飛行の音声を聞きながら、各場面を何度も思い描いたそうです。アポロ 15 号の宇宙飛行士デイヴィッド・スコットの「人は、見ると思っているものしか見ない。心を開きなさい」という言葉を、大切にしてきたと語りました。

15 分間の宇宙飛行

Virgin Galactic の飛行は二段式です。宇宙船は母機に抱えられて高度 1 万メートルを超えるところまで上がり、そこで切り離されます。ロケットが約 1 分間燃焼し、宇宙船は音速を超えて急上昇します。乗客は胸に約 3G の力を受け続けます。最も高い点で無重量を体験したのち、再突入では反対向きに約 4G を受け、最後は滑空して滑走路へ戻ります。切り離しから着陸まで、およそ 15 分間の旅です。

当日の録画映像を交えながら、Rosano 氏はこの体験を四つの段階で語りました。長年の夢がかな

った瞬間。言葉にできないほどのロケットの加速。体が浮かび上がる、魔法のような無重量。そして、窓の外に広がる地球の姿です。

地球を包む、薄い大気の層

最も心に残ったのは、宇宙から地球の大気の層を見たときのお話でした。

漆黒の宇宙を背に、地球の縁には青く細い一本の線が見えます。それが大気の層です。地球の大きさに比べれば、驚くほど薄く、はかなく見えたといいます。人類の歴史も、海も、地球上のすべての生命も、この薄い層の内側にあります。そしてその中のすべてが、互いにつながり、支え合っている。地球は、本当にかけがえのない、尊い環境なのだ――。Rosano 氏は、そう語りました。

当センターは、人類が宇宙で暮らすための研究と教育を進めています。宇宙へ出ることは、地球を離れることではありません。地球がどれほど得難い環境であるかを、外側から見つめ直すことでもあります。私たちが大切にしてきたこの視点を、実際に宇宙へ行った方の言葉で聞けたことは、大きな喜びでした。

尽きない質問

講演の後は、会場とオンラインの双方から、多くの質問が寄せられました。

「地上で想像していた無重量と、実際はどう違ったか」という問いには、こう答えました。以前に放物線飛行で無重量を経験していたので、体はすでにその感覚を知っていた。だからこそ本番では、景色と気持ちに心を向けることができた。

「宇宙から地球を見て、考え方は変わったか」という問いには、小さなことにこだわらなくなり、物より自然の中で過ごす時間を大切にするようになったと答えました。いまでも空を見上げると、宇宙はすぐそこにあり、自分はその向こう側に行ったのだと感じるそうです。

「各国の指導者は宇宙へ行くべきか」という問いには、強くうなずきました。宇宙から見た地球には国境がない。私たちは一つの惑星という宇宙船に乗り合わせた一つの種であり、争うのではなく、力を合わせなければならない、と。

ほかにも、健康診断や訓練の中身、費用と、自費でなくても宇宙へ行ける道（研究者としての搭乗や懸賞など）について、質問が続きました。Rosano 氏は一つひとつに丁寧に答えてくださいました。

謝辞

遠く京都までお越しいただき、ご自身の体験を惜しみなく語ってくださった Rosano 氏に、心より御礼申し上げます。また、講演の実現にご尽力いただいた Astraporta 株式会社の稲波紀明氏、そしてご参加いただいた皆様に感謝いたします。

当日の様子は、Astraporta 株式会社のウェブサイトでも紹介されています。

https://astraporta.jp/news/item-1719/

（京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター長　山敷庸亮　記）

OSIRIS-REx から OSIRIS-APEX へ―小惑星ベンヌの砂を持ち帰り、アポフィスへ向かう ExoKyoto4D ツアー

NASA の探査機 OSIRIS-REx は、小惑星ベンヌの砂を地球に持ち帰ったあと、名前を OSIRIS-APEX に変えて、次の小惑星アポフィスへ向かっている。ExoKyoto4D のツアーは、2016 年の打ち上げから 2029 年 4 月 13 日のアポフィス地球接近までを、実際の軌道どおりに一本の映像でたどる。 探査機の位置は NASA JPL の軌道データ（JPL Horizons、DE440）から、ベンヌとアポフィスの位置は小惑星の公式カタログ（Minor Planet Center）から計算している。

ベンヌ―直径 500m の瓦礫の山

ベンヌ（101955 Bennu）は、直径約 500m の小惑星である。炭素を多く含み、約 6 年ごとに地球に近づく。NASA が 2021 年に計算したところ、2300 年までに地球にぶつかる確率は約 1,750 分の 1 だった。最も危ない日は 2182 年 9 月 24 日で、その日の確率は約 2,700 分の 1 である。小さな確率だが、ゼロではない。OSIRIS-REx の目的は二つあった。一つは、太陽系ができたころの物質を持ち帰り、生命の材料がどこから来たかを調べること。もう一つは、地球にぶつかるかもしれない小惑星の軌道を正確に知ることである。ツアーでは、ベンヌに近づく探査機の位置と、探査機が実際に撮ったベンヌの写真を同じ画面に並べる。ベンヌはそろばん玉のような形をしている。速く回っているため、表面の砂や石が赤道のほうへ集まったと考えられている。

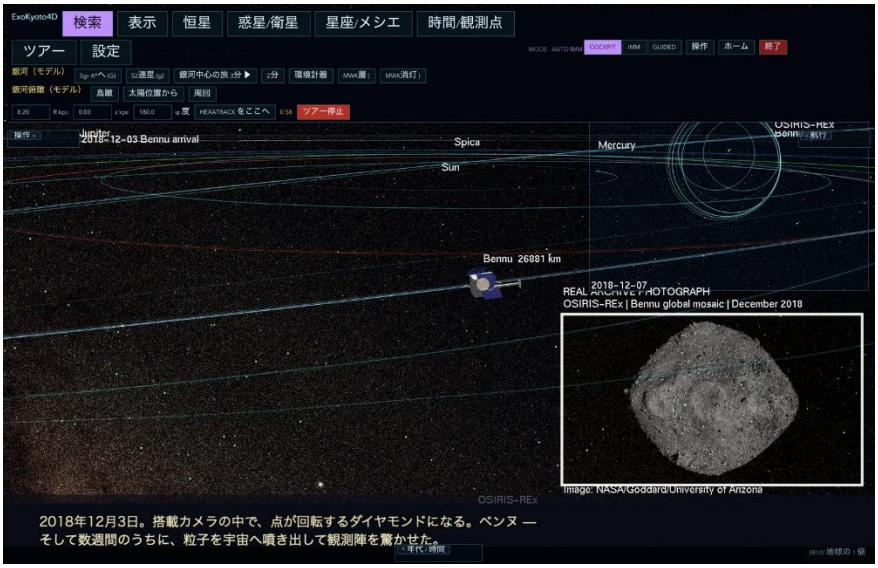


図 1: 2018 年 12 月、ベンヌに近づく。中央が探査機、右下が実際に撮影されたベンヌの写真（NASA/Goddard/University of Arizona）。ExoKyoto4D「OSIRIS-REx → APEX ツアー」より。

地球スイングバイ―はやぶさと同じ技

OSIRIS-REx は 2016 年 9 月 8 日、フロリダのケープカナベラルからアトラス V ロケットで打ち上げられた。1 年後の 2017 年 9 月 22 日、いったん地球のそばに戻り、南極の上空約 1 万 7,000km を通り過ぎた。地球の重力を使って進路を曲げる「スイングバイ」である。ベンヌは地球とは約 6 度傾いた軌道を回っている。探査機は燃料を使わずに、地球の重力でその傾きに乗り換えた。

ツアーの画面では、このときの速さを二通りに表示する。地球から見ると、探査機は秒速 6.2km で近づき、同じ秒速 6.2km で離れていく。速さは変わらず、向きだけが 35 度曲がる。ところが太陽から見ると、秒速 29.6km が 31.1km に上がっている。地球は太陽のまわりを動いているので、その動きの一部を探査機がもらったのである。画面の中で、軌道の色が黄色から緑に変わるところが、その瞬間にあたる。

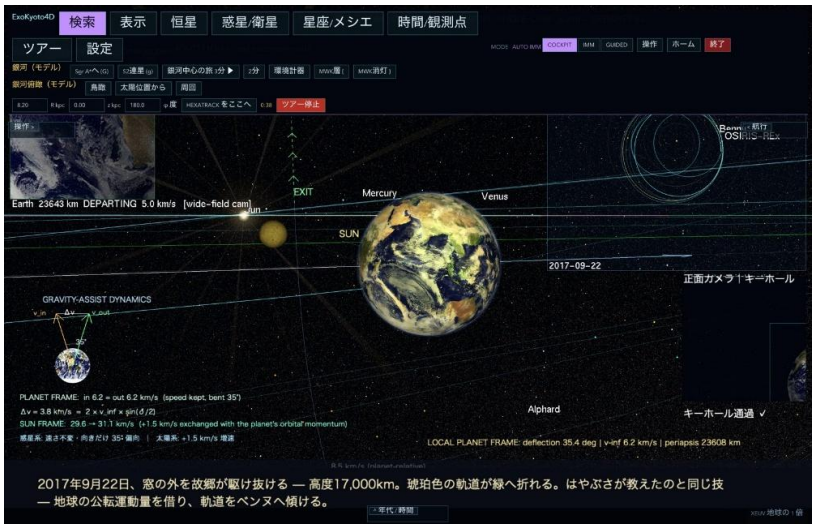


図 2: 2017 年 9 月 22 日の地球スイングバイ。左下に、地球から見た速さ（変わらない）と太陽から見た速さ（秒速 1.5km 増える）を並べて表示している。

いちばん小さな天体を、いちばん近くから回る

2018 年 12 月 3 日、OSIRIS-REx はベンヌに着いた。すると数週間のうちに、思いがけないものが見つかった。ベンヌの表面から、小石ほどのかけらが宇宙へ飛び出していたのである。こうした放出は 300 回以上観測され、その多くはベンヌに落ちて戻った。ベンヌは止まった岩の塊ではなく、いまも表面が動いている小惑星だった。2019 年 6 月、探査機はベンヌの表面から約 680m の高さを回り始めた。これほど小さな天体を、これほど近くから回った探査機はほかになく、ギネス世界記録にも認められた。低く回るほど、天体の重力のわずかなむらが分かる。翌年の着地に備えて、ベンヌの重力の地図を作るためだった。

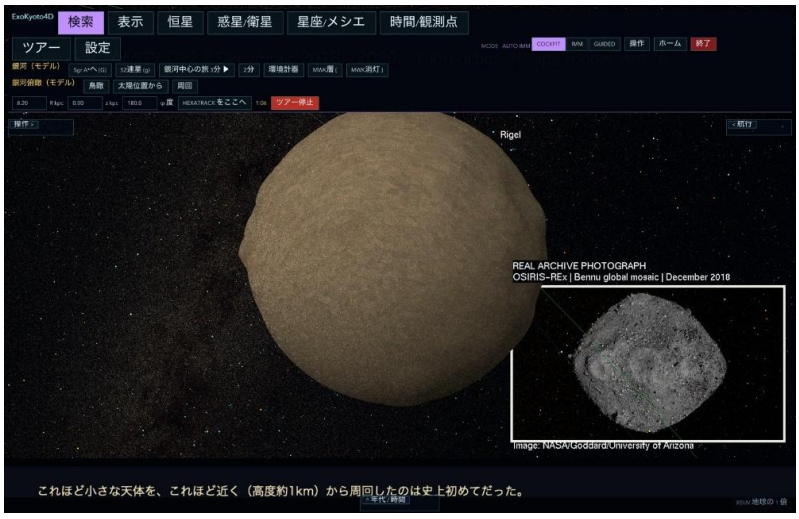


図 3: ベンヌのそばを回る場面。左の大きな天体は ExoKyoto4D が描いたベンヌの形の模型、右下は実際の写真。模型の表面の模様は見やすくするためのもので、本当の岩の配置ではない。

6 秒間のタッチ

2020 年 10 月 20 日、探査機は長さ 3.4m の採取アーム「TAGSAM」を伸ばし、ベンヌの北半球にあるクレーター「ナイチンゲール」に降りた。表面に触れていたのは約 6 秒間である。窒素ガスを吹き付けて砂や石を舞い上がらせ、それを容器に取り込むと、すぐにエンジンを噴いて離れた。あとで分かったことだが、ベンヌの表面は思っていたよりずっと柔らかかった。すぐに離れなければ、探査機は表面に沈み込んでいた。

砂や石は予想より多く採れた。多すぎて、石がふたのすき間にはさまり、中身が少しずつこぼれ出した。そこで運用チームは予定を早め、急いで帰還用のカプセルにしまった。地球で量ると 121.6g あり、目標の 60g の約 2 倍だった。



図 4: 2020 年 10 月 20 日、試料を採る場面。ベンヌは形の模型で描いており、大きさの比は実際と同じではない。

地球へ帰り、ユタの砂漠へ

2021 年 5 月 10 日、OSIRIS-REx はベンヌを離れ、地球への帰り道についた。帰りには約 2 年半かかったが、ツアーではこの部分を縮めて見せる。

2023 年 9 月 24 日、探査機は地球の手前でカプセルを切り離した。カプセルは朝のユタ州の砂漠に着地した。探査機の本体は地球には降りず、エンジンを噴いて地球のそばを通り過ぎた。このときから、探査機は新しい名前「OSIRIS-APEX（アポフィス探査機）」で呼ばれている。

持ち帰った砂の分析結果は、2025 年 1 月に発表された。地球の生き物がタンパク質を作るのに使うアミノ酸 20 種類のうち 14 種類と、DNA と RNA の材料になる核酸塩基 5 種類のすべてが見つかった。アンモニアも多く含まれていた。さらに、ナトリウムを含む塩（えん）の結晶が、塩水が干上がるときと同じ順番で積み重なっていた。ベンヌのもとになった大きな天体には、かつて液体の水があったことになる。

ただし、生き物そのものの跡は見つかっていない。アミノ酸には、右手と左手のように形が鏡写しになった 2 種類がある。地球の生き物は片方だけを使うが、ベンヌの砂では 2 種類がほぼ同じ量だった。生命の材料はそろっていたが、生命がいた証拠はない。

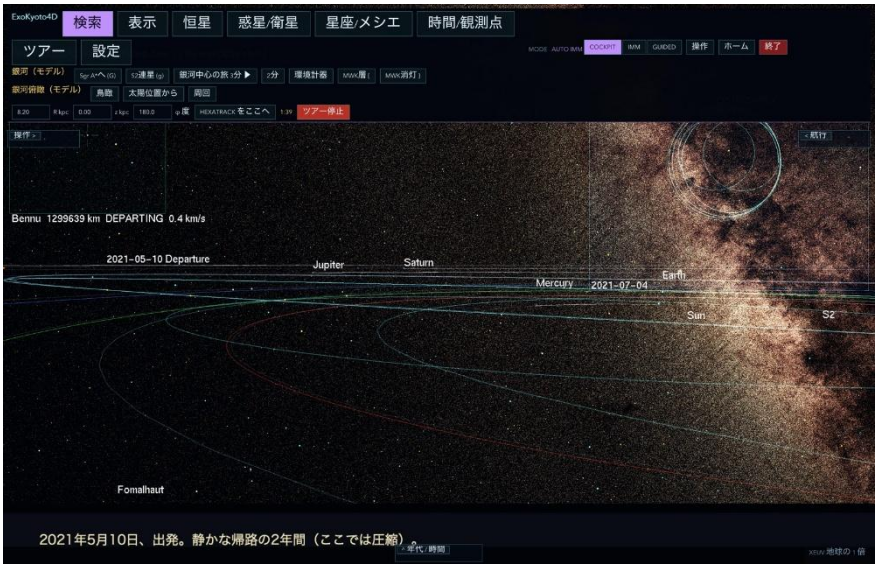


図 5: ベンヌを離れ、地球へ向かう探査機。背景は天の川。帰り道の約 2 年半は、ツアーの中では縮めて見せている。

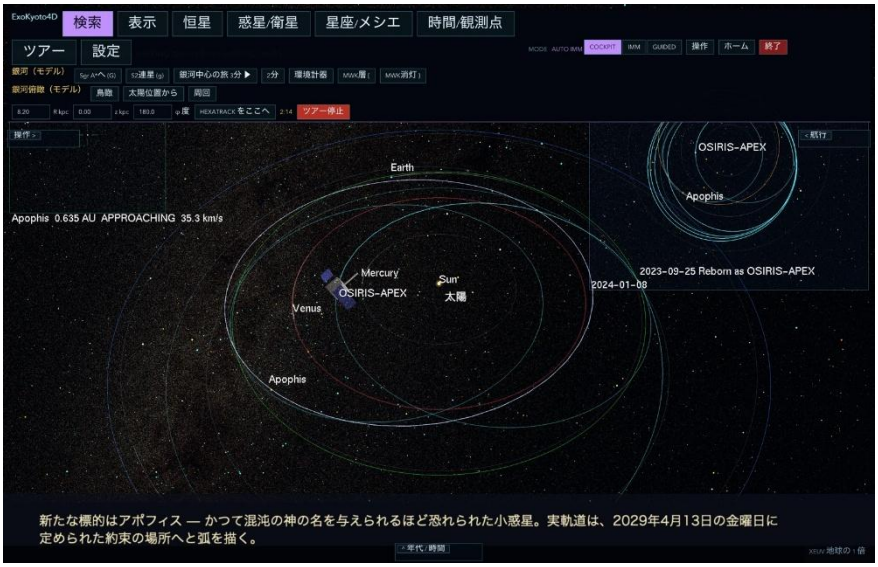


図 6: 2024 年 1 月、OSIRIS-APEX として新しい軌道を進む。太陽系を真上から見た図で、アポフィスの軌道と探査機の位置を示している。

アポフィス―2029 年 4 月 13 日の金曜日

次の目的地アポフィス（99942 Apophis）は、2004 年に見つかった直径約 340m の小惑星である。見つかった直後は、2029 年に地球にぶつかる確率が一時 2.7%と計算された。そのため、エジプト神話の混沌の神アペプ（ギリシャ語でアポフィス）の名前がつけられた。その後の観測で、少なくとも今後 100 年はぶつからないことが分かっている。

それでもアポフィスは、2029 年 4 月 13 日、地球の表面から約 3 万 2,000km のところを通る。気象衛星や放送衛星がいる高さ（約 3 万 6,000km）より内側である。ヨーロッパやアフリカなどでは、肉眼でも見えるはずだ。この大きさの小惑星がここまで地球に近づくのは、約 7,500 年に一度とされる。

ツアーは、この接近に向かう軌道をたどり、「2029 年 4 月 13 日の金曜日」の字幕で終わる。実際の OSIRIS-APEX は、接近の少し前から遠くでアポフィスをとらえ、接近のあとに追いついて、2029 年 6 月

の初めにアポフィスのそばに着く予定である。地球の重力に引っぱられたことで、アポフィスの回り方や表面がどう変わったかを調べる。最後には、自分のエンジンの噴射で表面の砂を吹き飛ばし、その下を観察する。地球の重力が小惑星の姿を変える様子を、すぐそばで見るのは初めてになる。

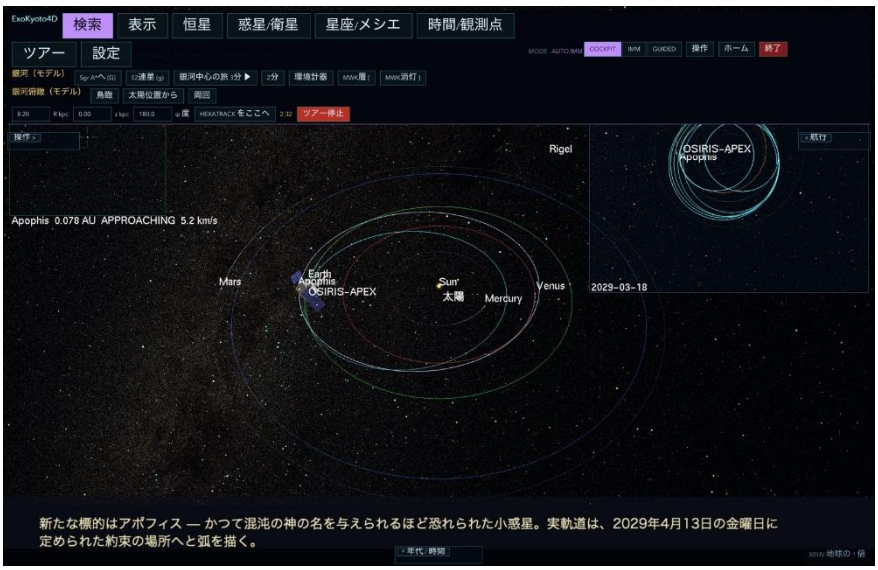


図 7: 2029 年 3 月 18 日の太陽系。地球、アポフィス、OSIRIS-APEX が一か所に集まってくる。このときアポフィスまで約 1,170 万 km。

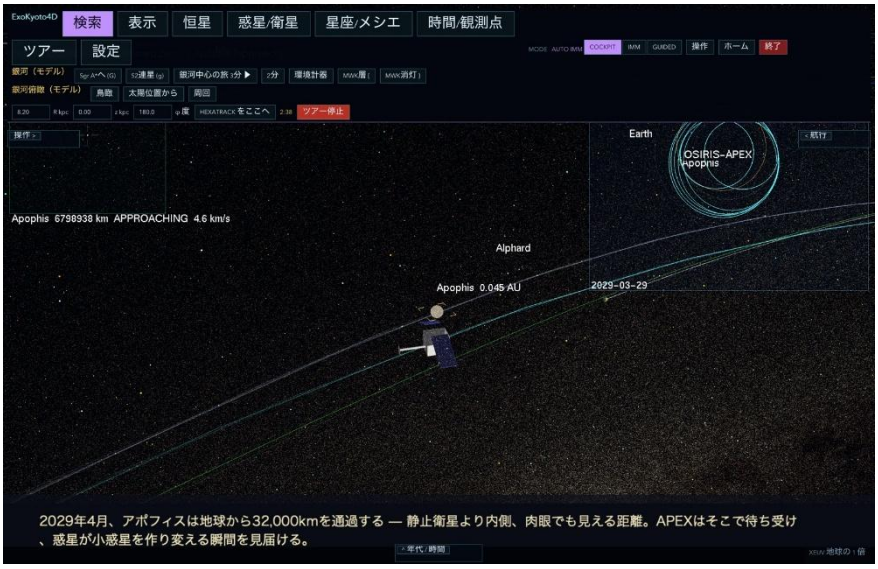


図 8: 2029 年 3 月 23 日、アポフィスまで約 680 万 km。画面の左上に、アポフィスまでの距離と近づく速さを表示している。

いまの OSIRIS-APEX

アリゾナ大学が 2026 年 10 月に発表したところでは、OSIRIS-APEX は順調に飛んでいる。2025 年 9 月 23 日に地球のそばを通って進路を曲げ、次は 2027 年 3 月に、もう一度地球のそばを通る。もとの設計で想定していたよりも太陽に近づく場面を、これまでに 3 回乗り越えた。そのたびに太陽電池のパネルを傾け、熱に弱い部品を陰に入れて守った。ベンヌの砂ぼこりをかぶった観測機器もあるが、観測には支障がない。アポフィスに着くのは 2029 年の春の終わりごろの見込みである。

一機の探査機が、ベンヌでは太陽系の材料を持ち帰り、アポフィスでは地球の重力が小惑星を変える瞬間を見る。ExoKyoto4D のツアーは、この二つの任務を、実際の軌道でひと続きに見せている。

YouTube で公開中のツアー動画

オシリス・レックスからアペックスへ | OSIRIS-REx → APEX ― ベンヌのサンプルを地球へ、そしてアポフィスへ（約 3 分）：YouTube で視聴

公開チャンネルは KyotoU Space & Earth Futures SIC 有人宇宙学研究センター（@envhazards）。

資料: NASA「Asteroid Bennu Facts」／NASA「Apophis Facts」／DellaGiustina et al. (2023) OSIRIS-APEX, PSJ／University of Arizona「Three years into its second mission, NASA's OSIRIS-APEX sets its sights on 2029」(2026 年 10 月 12 日)／Smithsonian「Traces of Ancient Brine Discovered on the Asteroid Bennu」／NASA SVS「OSIRIS-REx Earth Gravity Assist」／Planetary Society「OSIRIS-REx Sets Low-Orbit Record」

有人宇宙学講義（10 月）の紹介

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センターでは、毎週水曜 5 限に有人宇宙学の講義を開講しています。本講義では、人類が宇宙において持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのかを、自然科学的視点および人文社会科学的視点の双方から解説しています。

10 月 7 日「宇宙環境工学」（京都大学　山敷庸亮）

人類が宇宙で持続的に居住するためには、生態系・技術・社会の 3 つの要素を総合的に考える必要があります。講義では、地球の生態系を宇宙環境に導入する「テラウィンドウ」の考え方や、人類が居住可能な系外惑星を探索する「ExoKyoto」の取り組みが紹介されました。また、生命維持に必要な技術だけでなく、制度や文化などの社会的基盤を構築する重要性について解説されました。

10 月 14 日「宇宙探査工学」（京都大学　清水幸夫）

宇宙機の設計には、ソフトウェアからハードウェアまで多様な工学的要素が関係しており、それらを統合するシステム設計が重要です。講義では、小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ 2」を例に、宇宙探査技術と科学的ミッションの関係が紹介されました。また、小惑星リュウグウから発見されたアミノ酸などの有機物が、生命の起源を解明する手がかりとなることが解説されました。

10 月 21 日「有人宇宙活動」（京都大学・龍谷大学　土井隆雄）

有人宇宙活動の歴史と日本の宇宙開発への貢献について、宇宙飛行士としての経験を交えながら紹介されました。講義では、宇宙ミッションに伴う危険性や、国籍・文化の異なる宇宙飛行士同士の信頼関係の重要性が解説されました。また、有人宇宙学が目指す、自然科学と人文社会科学を融合した持続可能な宇宙社会の構築について、その展望が語られました。

11 月には宇宙木材工学、宇宙霊長類学などの講義を実施予定です。本講義は聴講可能ですので、聴講を希望する学生は、講義時間に直接講義室（東一条館 201 大講義室）へ来てください。（三本勇貴　記）

LignoSat 学生チーム活動紹介 MISSION 班
LignoSat-2「自由木板」の概要

MISSION 班では現在、LignoSat-1R の製作と並行して、次世代衛星「LignoSat-2」の設計を進めています。今回は、LignoSat-2 のミッションにおける目玉機能の一つ、「自由木板（仮称）」についてご紹介します。「自由木板」は、木材の「熱膨張率（温度変化によって材料がどれだけ伸び縮みするか）」を正確に測定するための装置です。実は地上で木材の熱膨張率を測る工夫は非常に困難です。なぜなら、空気中の水分（湿度）による膨張・収縮の影響のほうが、温度変化による影響よりもはるかに大きいからです。そこで私たちは、水分も空気もない宇宙空間を利用して、木材本来の熱膨張率を測定することを目指しています。前身の LignoSat / LignoSat-1R でも、衛星の外枠に使われる「構体木板」で熱膨張率を測る計画を立てていました。しかし構体木板は、衛星の外枠にあるアルミフレームや内部の金属シャフトと接しているため、それらの金属から力を受け、変形してしまいます。これでは「木材そのものの変化」だけを正確に測ることができません。そこで LignoSat-2 では、他からの力や拘束を一切受けない（無視できる）独立した木板「自由木板」を搭載し、真の熱膨張率をクリアに計測することに挑戦します。

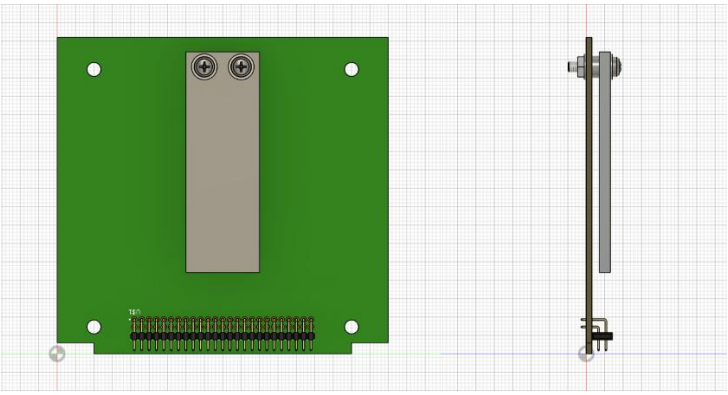


図 1　自由木板 3D CAD モデル

現在、「自由木板」とその固定具の設計を進めています。図 1 は現時点での 3D CAD モデルです（左：正面図、右：側面図）。左側の図の中央にある灰色の物体が「自由木板」です。「自由木板」はネジとナットを用いて基板に固定されます。基板と木板の間にはスペーサーがあり、接触しないようになっています。基板下部の 50 ピンコネクタを介して BPB（基板）に固定する予定です。木板はネジの留め具周辺以外はフリーな状態（拘束がない状態）に保たれます。この伸び伸びと変化できる部分にひずみゲージと温度センサを貼り付け、精度高く熱膨張率を測定します。

現在は、より多くのデータを集めるために「木板の搭載枚数」を増やす設計変更を行っています。今後は、ロケット打ち上げに耐えられるかを検証する振動シミュレーションや実機試験、測定データの精度評価、専用の測定回路の設計などを順次進めていく予定です。（殿西覚弥・中澤拓人　記）

研究紹介

樹木の耐凍性

池田武文（京都大学宇宙木材研究室研究員）

はじめに

北半球ではこれから一年で最も寒い季節に移って行きます。そのあいだ皆さんは暖房の効いた部屋で過ごされることでしょう。窓の外に目を向けると、樹木や草本など植物は寒い冬を乗り越えて、来る春に向けて着々と準備を進めています。このことについては、NewsLetter No.37, 38, 41, 46 で樹木のフェノロジー（生物季節）として解説しました。本稿では、冬の低温に対する樹木の対応、特に氷点下の気温低下に対する応答、適応について解説します。

多くの草本植物は一年生ですから、晩秋には種を落とし枯れてしまいます。多年生草本も秋には地上部を枯らし、地下部が越冬して春に再び地下部から芽吹きます。一方、樹木は長い年月にわたって生き続けますので、樹木全体が寒い冬をいかに越すかは重要です。なお、現在自然に分布している植物はその地域の冬の低温に適応しているため、低温が原因で植物が枯れることはありません。ところが、ある地域に人が栽培、植林のために植物を導入すると、冬の低温に耐えられず、枯れることもあります。導入しようとする植物がその地域の低温に対応できるのか、事前に知る必要があります。

植物の氷点下の温度に対する対応

温度が氷点下に下がり細胞内の水が凍ると、細胞内の構造や膜系が損傷し、凍死します。それを避けるため、植物は細胞、組織、器官レベルで、氷点下の温度に次の二つの方法で対応します。

１．低温回避：そもそも気温が氷点下にならない地域で生活する。生存に不可欠な組織や器官を被覆して寒さを防ぐ、例えば冬芽を毛や粘液物質で覆う。

２．低温耐性：樹体温度が氷点下に下がることは受け入れるが、細胞本体の凍結（凍死）を避ける能力である耐凍性と、樹体内の重要な組織や器官が凍結することを避ける凍結回避の二つのプロセス。

耐凍性の程度は、植物が何度までの低温に耐えられるかを示す数値、耐凍度で評価します。耐凍度が低いほど耐凍性が高いことを表します。耐凍性は、秋から冬へと季節が進み気温が低下するにつれて徐々に高まります。つまり、より低い温度にも耐えられるようになり、冬季の気温が低い地域に分布する樹木ほど耐凍性は高まります。なお、熱帯に分布する植物はそもそも耐凍性を備える必要はありません。耐凍性は次のようなプロセスで高まります。葉を構成する組織（光合成を行う葉肉細胞）は隣り合う細胞同士の間に小さなすき間（細胞間隙）があります（図１）。細胞間隙には水蒸気が充満しています。気温が氷点下に下がると細胞間隙の水蒸気が細胞壁に霜となって凍り付きます。これを細胞外凍結と呼びます。すると細胞の外（細胞間隙）にできた氷に引っ張られて細胞内の水が外に出ます、つまり、細胞は脱水されます。脱水が続けば続くほど細胞

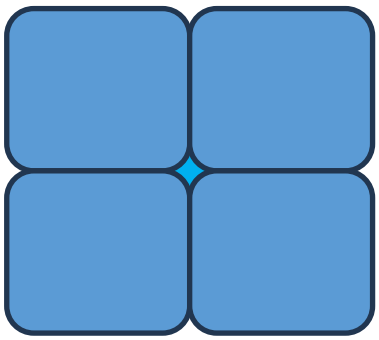


図１　隣り合う四つの細胞
（中央の水色部分が細胞間隙）

内の水は減少して、濃度（溶質濃度）は濃くなり（凝固点降下による過冷却）、凍りにくくなります。並行して、細胞内の高分子物質であるタンパク質やデンプンがアミノ酸や単糖に分解されることで、より一層溶質濃度が上昇し、耐凍性が高まります。ハクサイやホウレンソウ、ダイコンが霜に合う、野菜を雪の下で保存すると甘くなることが知られています。このような現象は野菜が耐凍性を高めた証です。

凍結回避は樹木の木部柔細胞や冬芽の成長点で起こります。木部柔細胞は樹体全体に水を運ぶ道管や仮道管に接しています。冷温帯や亜寒帯に分布する樹木は厳冬期、道管と仮道管の中の水は氷点下になると凍ります。一方、木部柔細胞や冬芽の成長点の細胞は厚く硬い細胞壁で囲まれていますので、道管と仮道管の中の氷が細胞に侵入するのを防ぎます。

では、樹木は何度の低温まで耐えることができるのでしょうか。以下に、樹木の厳冬期の耐凍度を示します。広葉樹では、台湾から関東以西に分布する照葉樹（常緑広葉樹）の冬芽の耐凍度は-7～-17℃なのに対して、北海道や本州中部に分布する落葉樹では-50～-70℃に耐えることができます。スギやヒノキなど温帯性の針葉樹の耐凍度は冬芽、葉ともに-20～-30℃ですが、日本の亜寒帯や亜高山、高山の針葉樹、例えばシラビソ、トウヒ、エゾマツ、トドマツなどの耐凍度は、葉で-70℃、冬芽で-35～-40℃、アラスカやシベリアの針葉樹では冬芽、葉ともに-70℃と耐凍度はとても高いです。

ここまでに、ある樹種はマイナス何℃までの低温に耐えることができるかの数値を示しましたが、これらの値は枝や葉、冬芽それぞれについて室内実験で得られた値です。実際に野外で生育している植物で体温を測定した例はあまり多くありません。では、冬季に樹体の温度は何度まで低下するのでしょうか。図２は北海道十勝地方足寄町で１月下旬の厳冬期に測定されたニオイヒバ（ヒノキ科）の葉の表面温度です。この場所は日本で一番ではないですが、ベストファイブに入る寒い地域です。雪の覆われていない日向の葉の温度は夜明け直前に-26℃まで低下し、晴れた日の日中は 5℃近くまで上昇します（気温は氷点下です）。一方、日陰で雪に覆われた葉の夜明け前の温度は−24℃ですが、日中でも-7℃のままです。日陰で雪に覆われた葉の温度は、夜明け前で-23℃、日中は-10℃です。これら全ての葉が枯れることはありません。日向で雪に覆われていない葉は一日の間で 30℃近い温度変化を経験し、日陰の葉は一日中氷点下に閉じ込められたままで厳冬期を過ごしています。これらの葉を手で触り、その感触を確かめると、氷点下の葉はすべて硬いですが、0℃以上の葉は柔らかくなります。この感触から何がわかるでしょうか。まず、全ての葉は枯れていないので、細胞内凍結は起こっていないことがわかります。次に、硬い手触りの葉は、細胞外凍結が起こっていること、日中、柔らかな手触り葉は、細胞外凍結していた細胞間隙の水が融解したことを表しています。さらに、より低い温度にさらされる日向で雪に覆われない葉ほど細胞内の溶質濃度が高い、つまり耐凍度が高まっていることがわかっています。

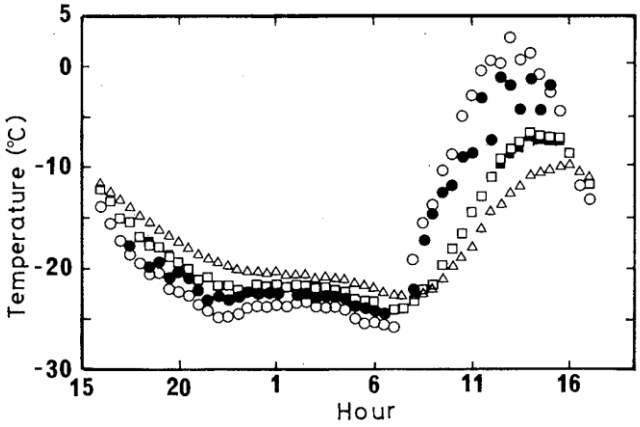


図２　葉温・気温の日経過（1 月 21 日～22 日）
●、○：日向で雪に覆われない場所の気温と葉温；
■、□：日陰で雪に覆われない場所の気温と葉温；
△：日陰、雪下の葉温

ここに示したニオイヒバの例は亜寒帯の寒冷地での事例です。京都辺り温帯で普段ここまで低温になることはありませんが、常緑樹の葉も冬になると溶質濃度が高めることで、低温対策をとっています。以上のような植物の営みを思いながら、冬の植物を観察してはいかがでしょう。

参考文献

池田武文・紺野康夫 (1990) 北海道の厳冬期におけるニオイヒバの葉の水分特性と生育環境の関係. 日林誌 72: 154-157
丸田恵美子（2012）冬の樹木の生理生態学 岩波出版サービスセンター
酒井昭（1995）植物の分布と環境適応 朝倉書店
酒井昭（2003）植物の耐寒戦略 北海道大学図書刊行会

NewsLetter 配信希望アンケート

購読者の皆様に今後の NewsLetter の定期購読希望調査を行っております。
以下の Google フォームにて回答をよろしくお願いいたします。

◆ Google フォームの URL
https://forms.gle/vasHmRHykM1k8YFc7

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター
https://space.innovationkyoto.org/
〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町 1 京都大学東一条館 2 階 208 号
編集人：宇宙木材研究室 三本勇貴、豊西悟大、大谷壮生
Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp
SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.59
2026 年 11 月 1 日発行