

# SIC 有人宇宙学研究センター

## NewsLetter 2026年4月号 No.52

### 太陽系外惑星データベース「EXOKYOTO3D」の公開と拡張版 「EXOKYOTO4D」の発表

京都大学大学院総合生存学館の山敷庸亮教授、大学院理学研究科の佐々木貴助助教、大学院農学研究科の土井隆雄研究員（宇宙飛行士、龍谷大学客員教授）らの研究グループは、太陽系外惑星データベース「EXOKYOTO3D」を公開するとともに、時間軸を導入した拡張版「EXOKYOTO4D」を発表しました。

本研究グループは、2016年に日本語対応の太陽系外惑星データベース「ExoKyoto」を公開し、以降、系外惑星環境の評価や教育・アウトリーチへの応用を進めてきました。特に、恒星フレアに伴う宇宙線環境の評価など、惑星環境研究への展開も行われています。

今回公開された EXOKYOTO3D は、これらの成果を基盤として大幅に機能拡張した次世代データベースであり、太陽系外惑星の位置を三次元星図上で可視化するとともに、恒星スペクトルや軌道条件に基づく惑星環境の推定、惑星表面の三次元想像図の生成、さらには惑星から見た周辺星空の再現など、従来のデータベースには見られない多面的な機能を備えています。

また、本プロジェクトでは、高大連携の一環として滋賀県立守山高等学校と協働し、10年以上にわたり系外惑星の想像図制作に取り組んできました。今回の発表においても、同校の生徒による想像図がシステム内に組み込まれており、教育と研究の連携の成果として位置付けられます。

さらに、記者会見には米国 NASA ゴダード宇宙飛行センターの Vladimir Airapetian 博士（京都大学総合生存学館特任教授）もオンラインで参加し、本プロジェクトの国際的意義および今後の展開について高い評価が示されました。

開発には上記メンバーのほか、記者発表に参加した総合生存学館の村嶋研究員、工学部の深井理央氏らも協力しました。特に村嶋氏は、約10年前の ExoKyoto 開発初期段階から本プロジェクトに関与しています。また、医学部の白樫聖夢氏がテキスト作成に、工学部卒業生の岩戸菜摘氏が3Dシステムへの移行にそれぞれ貢献しています。

拡張版である EXOKYOTO4D では、任意の日時および地球上の任意地点における天体配置の再現、系外惑星のトランジット予測など、時間軸を取り入れた解析機能の実装が予定されており、2026年7月頃の一般公開を目指しています。

本データベースは、系外惑星研究の高度化のみならず、宇宙環境理解やハビタビリティ研究、さらには教育・アウトリーチにおける新たな基盤としての活用が期待されます。

なお、本発表に関する内容は、国内主要メディアにおいても報道されています（下記参照）。

EXOKYOTO3D は現在プレビュー段階にあり、専用ウェブサイトより申請いただいた方に対して順次

提供されています。動作環境は Mac OS を対象としており、Apple Silicon (M1 以降) 搭載機での利用が推奨されます。(山敷庸亮 記)

## ■ 関連リンク (注)

- 日本経済新聞掲載記事

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF2417U0U6A320C2000000/>

- NHK ニュース掲載記事

<https://news.web.nhk/newsweb/na/nb-2010024408>

## ■ 過去のニュース

京都大学大学院総合生存学館、大学院理学研究科および宇宙総合学研究ユニットは、2016 年 8 月 31 日、太陽系外惑星データベース「ExoKyoto (ExoplanetKyoto)」を Web 上で公開しました。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news/2016-09-06>

生命が居住可能な系外惑星へのスーパーフレアの影響を算出 — ハビタブル惑星における宇宙線被ばくの定量化に成功 — (2019 年 7 月 16 日)

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2019-07-16>

# LignoSat 学生チーム活動紹介

## COMM 班

今回の NewsLetter では、LignoSat の軌道データを用いた「衛星の空気抵抗解析および抗力係数の算出」の結果についてご報告します。

木造衛星である LignoSat が、宇宙空間の大気からどのような影響を受けるのか。その特性を明らかにするため、LignoSat および同時に放出された DENDEN-01、YOMOGI の軌道エネルギーの解析を行いました。

木材という素材が、衛星の軌道運動（空気抵抗）にどう影響するかを調査するために衛星の空気抵抗解析を行いました。方法としては、LignoSat および同時期に放出された衛星（YOMOGI、DENDEN-01）の軌道エネルギー減少量を比較しました。その結果、表面積の大きい DENDEN-01 が最大のエネルギー損失を示した一方、LignoSat と YOMOGI はほぼ同等の結果となりました。図 1, 2 に、解析に用いた衛星の消費エネルギーと「高度」「日数」の関係を表したグラフを示しています。

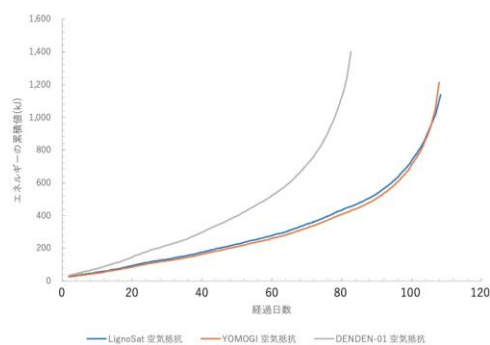


図 1 各衛星の消費エネルギーと日数の関係

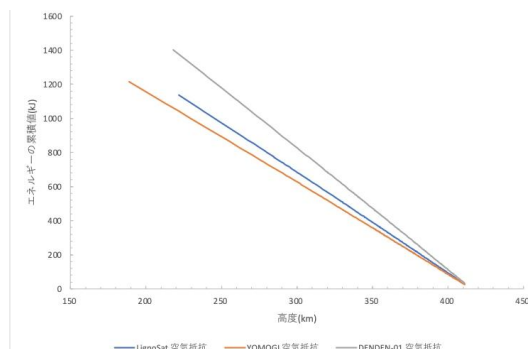


図 2 各衛星の消費エネルギーと高度の関係

質量やサイズに左右されない、形状・表面特性そのものの「空気の受けやすさ」を評価するために抗力係数（Cd 値）の逆算による純粋評価を行いました。解析手法としては、TLE（2 行軌道要素形式）データから高度変化を割り出し、エネルギー減少量から抗力係数を逆算。結論として、LignoSat と YOMOGI の抗力係数の変動傾向は酷似していました。図 3 に表しているのは、LignoSat と YOMOGI の効力係数の変動傾向です。なお DENDEN-01 は太陽光パネルを展開する機構があり、現状、抗力係数を求めるのに必要な表面積を正確に計算することができないため図には反映しておりません。

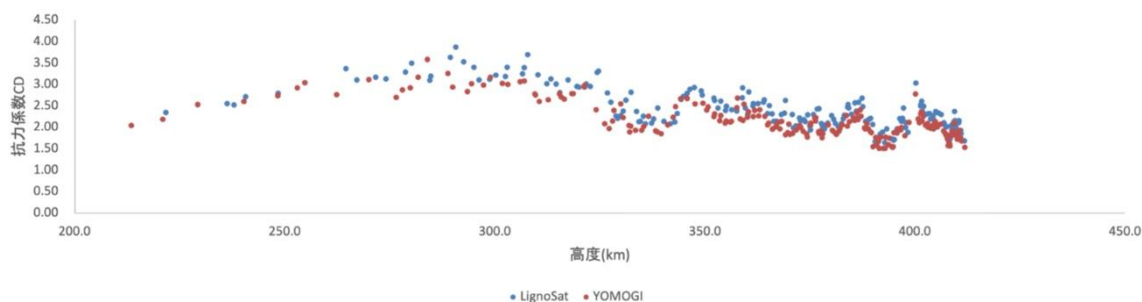


図 3 各衛星の高度と抗力係数の関係

これら二つの解析結果から、衛星運用において木造だからといって空気抵抗による大きな損失は見られず、「木造衛星が空力的にも既存の衛星と同等の実用性を持つ」ことが示唆されました。

さらに現在は、2029 年打ち上げ予定の「LignoSat-2 号機」を見据えたパッチアンテナの開発や 2028 年内打ち上げ予定の LignoSat-1R 用のアンテナ基盤の作成にも着手しています。そのため、今後より打ち上げに向けて忙しくなると思いますが、打ち上げを楽しみに、一つ一つのタスクを確実に完了できるようにメンバー全員で協力していきたいと思っています。（細川了 記）

## 低圧下樹木育成プロジェクト活動紹介

### 第 19 回宇宙学シンポジウムでの発表

2026 年 2 月 24 日に龍谷大学瀬田キャンパスで開催された「第四回宇宙木材利用シンポジウム」の「宇宙における樹木の育成」のセッションで樹木育成チームがこれまで取り組んできた「火星での森林確立に向けた低圧下樹木育成実験」の概要と、そこから得られた最新の成果について報告しました。

成長の早いギンドロ（ポプラの一種）の挿し木苗を閉鎖系チャンバー内で育成しました。閉鎖系チャンバー内の環境条件は気圧を大気圧（1 気圧）から超低圧（0.75, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 気圧）までの 6 段階と湿度、CO<sub>2</sub> 濃度を Arduino（マイコン）で制御しました。苗育成期間は約 25 日間としました。

0.1 気圧の環境下でも、成長特性は大気圧下（1 気圧）と有意な差は認められませんでした。これは、将来の火星基地において、環境制御コストを大幅に抑えることができる低圧環境でも樹木が生育可能であることを示唆する重要な知見です。また、低圧下で成長した葉は厚く小型化し、単位面積あたりの葉乾重が増大しました、これは樹木特有の可能性があることを示唆しています。

今後は、0.1 気圧以下での育成実験や、長期育成、空気組成、特に酸素に注目をし、さらなる実験を進める予定です。宇宙での森林・林業の確立という目標に向け、今回のシンポジウムでいただいた多様なフィードバックを糧に、チーム一丸となって研究を継続してまいります。（西川愛子・水田航介 記）

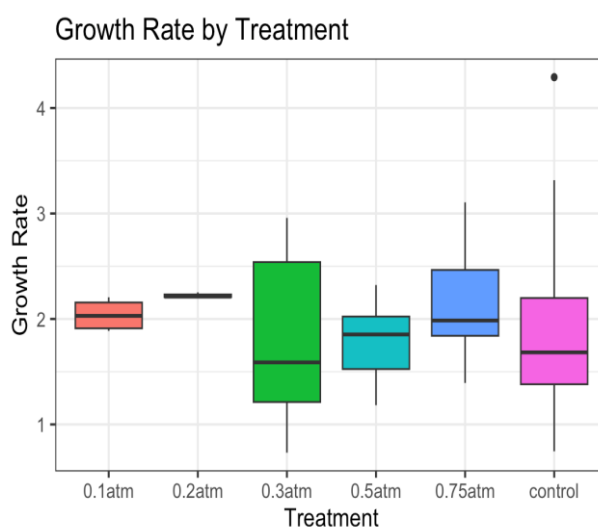


図 4 雰囲気気圧が苗の成長におよぼす影響

## 研究紹介

# EXOKYOTO3D / EXOKYOTO4D : 系外惑星研究を拡張する統合可視化プラットフォーム

総合生存学館総合生存学専攻教授 山敷庸亮

### 要旨

EXOKYOTO3D / EXOKYOTO4D は、系外惑星データベース、ハビタブルゾーン評価、恒星スペクトル補完、恒星近傍空間の三次元可視化、さらに惑星表面からの視界再現を統合した研究・教育基盤である。本システムの特徴は、観測データを一覧するだけでなく、居住可能性評価、放射環境、星図、惑星表面視点、時間進行を一つの操作系にまとめ、研究者や学習者が「その惑星環境をどのような枠組みで理解するか」を自ら選び直せる点にある。本稿では、初期 2D 版 ExoKyoto の問題意識と独自性を起点に、3D/4D 版で追加された研究機能、とくに SEAU と Kopparapu モデルによるハビタ

ルゾーン評価、MUSCLES / Mega-MUSCLES を背景とする恒星スペクトル補完、三次元可視化と時間発展表示の意義について概説する。

## 1. 開発の背景

2000 年代以降、Kepler や TESS、さらに地上からの視線速度観測によって、数千を超える系外惑星候補・確認惑星が蓄積された。しかし、惑星半径、質量、公転周期、主星温度といった基本パラメータが与えられていても、それだけで惑星環境の全体像を把握することは難しい。とくに、居住可能性議論に必要な放射環境、恒星活動、紫外域・XUV 域の情報、複数惑星系の幾何学的関係は、数表や散布図だけでは直観的に理解しにくい。

EXOKYOTO の出発点は、2016 年に発表された 2D / X Window 版においてすでに明確であった。すなわち、既存の欧米主体の系外惑星データベースを単に追認するのではなく、日本語で読める独自のデータベースを構築し、独自のハビタブル判定基準を持ち、さらに惑星の見え方や想像図まで自前で提示することである。初期版 ExoKyoto では、既存データベースとの比較参照、トランジット惑星の質量推定、Stellar Window を用いた主星・周辺恒星・メシエ天体の表示、Google Sky と連動した天球位置の可視化などがすでに実装されていた。ここで重要なのは、「発見された系外惑星を並べる」こと自体ではなく、「どのような基準で理解するか」を研究者自身が選び直すことにあった。

その意味で、EXOKYOTO3D / EXOKYOTO4D は 2D 版の単なる描画強化ではなく、完全改訂版である。初期 ExoKyoto が持っていた日本語化、独自テキストチャ、独自ハビタブル判定、主星・惑星・メシエ天体を統合した表示系といった思想を引き継ぎつつ、それを三次元・時間発展・表面視点・スペクトル評価・検索支援まで拡張した研究プラットフォームが現在の EXOKYOTO3D / EXOKYOTO4D である。

## 2. ハビタブルゾーン評価 : SEAU と Kopparapu モデル

EXOKYOTO におけるハビタブルゾーン評価の特徴は、単一の閾値に依存せず、複数の定義を並べて比較できる点にある。第一の軸が SEAU である。SEAU は Solar Equivalent Astronomical Unit の略で、太陽系における地球相当の日射条件を基準に、中心星の光度に応じて軌道半径を換算する考え方である。すなわち、太陽系での内縁・外縁基準を各恒星へ写像することで、観測値から比較的直観的に「地球型の放射環境にどれだけ近い」かを整理する。

EXOKYOTO では、この SEAU を二段階で扱っている。SEAU strict は、内縁  $R_{rI}$  と外縁  $R_{rO}$  の間に軌道長半径  $a$  が入り、かつ半径が概ね 1.9 地球半径以下の岩石惑星候補を優先する条件である。SEAU broad は外縁側をやや広げ、 $R_{rI} < a < 1.1 \times R_{rO}$  のような条件で候補を拾う。これは厳密な居住可能性判定というより、観測データの不確実性や大気条件の幅を考慮した探索的な候補抽出として機能する。初期 2D 版で「太陽系の金星・地球・火星に対応する線を表示し、感覚的に比較できるようにする」という思想は、3D/4D 版ではより定量的で比較可能な評価系に整理された。

第二の軸が、Kopparapu らによるハビタブルゾーン気候モデルである。EXOKYOTO では Ravi Kumar Kopparapu らの主系列星まわりのハビタブルゾーン推定式を採用し、Recent Venus、Runaway Greenhouse、Moist Greenhouse、Maximum Greenhouse、Early Mars とい

た代表的境界を表示できるようにしている。さらに、地球サイズ・スーパーアースサイズ・火星サイズの惑星に応じて内縁側境界を切り替え、保守的ハビタブルゾーンと楽観的ハビタブルゾーンの双方を比較できるようにしている。これにより、同じ惑星でも「放射条件としては有望だが、気候安定性の観点では厳しい」といった、より研究的な読み分けが可能になる。

このように EXOKYOTO では、SEAU を直観的・探索的な指標、Kopparapu 系を気候モデルに基づく理論的評価軸として併置し、両者の一致点と不一致点そのものを研究対象として扱う設計になっている。

### 3. 恒星スペクトル補完と放射環境の可視化

居住可能性評価において、最も大きな不確実性の一つは恒星スペクトル、とくに紫外線から極端紫外線、さらに X 線に至る高エネルギー放射の欠測である。可視光・近赤外だけでは表面温度や受光量の概略は分かっても、大気散逸、光化学反応、フレア環境まで含めた議論には不十分である。EXOKYOTO では、この問題に対し、ブラックボディ近似だけに依存せず、観測スペクトル、テンプレート、補間モデルを組み合わせて、恒星スペクトルの統合的再構成を行う。

この基盤として重要なのが MUSCLES および Mega-MUSCLES 系列の研究である。MUSCLES Treasury Survey は、低質量星まわりの惑星大気研究に必要な紫外～可視～赤外のスペクトルエネルギー分布を整備することを目的とし、France et al. (2016, ApJ, 820, 89) が survey の動機と全体像を示し、Youngblood et al. (2016, ApJ, 824, 101) が Lyman-alpha と EUV の再構成、Loyd et al. (2016, ApJ, 824, 102) が紫外フレア環境の評価を進めた。さらに、より低温・高活動な恒星系に対しては Mega-MUSCLES が拡張を担い、Wilson et al. (2021, ApJ, 911, 18) は TRAPPIST-1 に対する  $5 \text{ \AA}$  から  $100 \text{ \mu m}$  にわたる統合スペクトルエネルギー分布を提示している。

また、EXOKYOTO が重視しているのは、放射平衡や可視光スペクトルだけでなく、恒星活動に伴う高エネルギー環境を含めて惑星環境を評価する視点である。Yamashiki et al. (2019, ApJ, 881, 114) は、近接した地球型系外惑星に対する stellar superflares の影響を定量化し、表面線量や大気条件の違いが居住可能性議論に本質的であることを示した。EXOKYOTO のハビタブルゾーン表示やスペクトル可視化は、このような「静的な受光条件」だけでなく「時間変動する宇宙天気環境」まで含めて理解するための入口として位置づけられる。

ただし、宇宙放射線や高エネルギー粒子環境を踏まえたハビタブルゾーン改訂は、現段階では EXOKYOTO3D に本格実装されておらず、今後の重要な拡張課題である。

EXOKYOTO のスペクトル表示は、こうした観測・再構成研究を背景に、恒星ごとにスペクトル型、温度、観測データの有無、近縁テンプレートの利用可能性を組み合わせ可視化する。結果として、単なる「恒星の色」ではなく、可視光・赤外・紫外のバランス、赤色矮星に特有な放射環境、惑星表面や大気散乱の見え方への影響を、研究者や学生が同一画面上で比較できる。これは、初期 ExoKyoto が独自テキストと想像図によって「惑星をどう見せるか」を重視していた流れを、観測・半経験的スペクトルモデルへと押し広げた拡張でもある。

### 4. 3D/4D 化によって追加された研究機能

EXOKYOTO は NASA Exoplanet Archive、Exoplanet.eu、HYG、Gaia、各種補助カタログ、文献情報を統合し、恒星系単位でデータを再編成している。ここで重要なのは、単にデータを集約することではなく、恒星、惑星、衛星、ハビタブルゾーン、スペクトル、星図、表面視界を一つの操作系の中で接続している点である。ユーザーは、近傍恒星からある惑星系へ移動し、ハビタブルゾーンを確認し、さらに惑星表面視点に切り替えて、見える恒星配置や空の色調まで比較できる。

この三次元可視化は教育用の演出ではなく、仮説生成のための認知インターフェースとして機能する。多惑星系における軌道配置、潮汐固定が疑われる惑星の表面視界、主星スペクトルの違いが散乱光や平衡温度に与える影響などは、数表よりも立体的な表示の方が理解しやすい。EXOKYOTO は、この「視覚化によって考える」プロセスを、研究支援の一部として位置づけている。

とくに 3D 版では、恒星系全体の立体配置、惑星・衛星の切替、メシエや星座線を含む背景星図との接続、ハビタブル候補の検索、恒星スペクトル表示、データウィンドウと解説ウィンドウの統合など、初期版で分離していた機能群が一つの対話的畫面に再編成された。さらに 4D 版では、時間進行、公転・自転の制御、惑星表面視点、惑星から見た星空、月飛行や軌道イベントの可視化など、時間方向の自由度が加わった。これにより EXOKYOTO は「データを読む」段階から、「時空間的に体験しながら比較する」段階へ進んだといえる。

## 5. 将来展望

EXOKYOTO3D は恒星系と惑星環境の空間構造を扱う基盤であり、EXOKYOTO4D はそこに時間変化を加えた拡張版である。時間軸を含む 4D 化によって、公転・自転・視点遷移・地上視界・表面レンダリング・月飛行のような時系列イベントを統合的に扱えるようになり、惑星系のダイナミクスや観測タイミング、見かけの変化を一つのプラットフォーム上で検討できる。これは、初期 ExoKyoto における「データベース」「表示モジュール」「解説記事」「想像図」を別々に改善していた段階から、それらを一つの研究インターフェースへ統合する試みの延長線上にある。

加えて、地球からの太陽系外惑星観測を支援する機能として、トランジット時刻の予測や周辺星図の作成なども視野に入れた開発を進めている。現在は 4D 版に原型が組み込まれた段階であり、今後は実観測への適用可能性を検証していく必要がある。

今後、恒星活動、フレア、XUV 環境、さらには新しい観測データとの接続が進めば、EXOKYOTO は「居住可能惑星候補を理解するための可視化基盤」から、「比較惑星学・系外惑星環境評価のための研究基盤」へと発展していくと期待される。

## 参考文献

- Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., et al. 2013, \*Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates\*, ApJ, 765, 131.
- Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., SchottelKotte, J., et al. 2014, \*Habitable Zones around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass\*, ApJL, 787, L29.
- France, K., Loyd, R. O. P., Youngblood, A., et al. 2016, \*The MUSCLES Treasury Survey. I. Motivation and Overview\*, ApJ, 820, 89.

- Youngblood, A., France, K., Loyd, R. O. P., et al. 2016, \*The MUSCLES Treasury Survey. II. Intrinsic Ly $\alpha$  and Extreme Ultraviolet Spectra of K and M Dwarfs with Exoplanets\*, ApJ, 824, 101.
- Loyd, R. O. P., France, K., Youngblood, A., et al. 2016, \*The MUSCLES Treasury Survey. III. X-Ray to Infrared Spectra of 11 M and K Stars Hosting Planets\*, ApJ, 824, 102.
- 山敷庸亮, 2017, 「EXOKYOTO 太陽系外惑星データベース開発について」, 遊・星・人, 26 巻 4 号, 152-158.
- 日本惑星科学会 J-STAGE, 「EXOKYOTO 太陽系外惑星データベース開発について」, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/26/4/26\\_152/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/26/4/26_152/_article/-char/ja)
- Wilson, D. J., Froning, C. S., Duvvuri, G. M., et al. 2021, \*The Mega-MUSCLES Spectral Energy Distribution of TRAPPIST-1\*, ApJ, 911, 18.
- Yamashiki, Y. A., Maehara, H., Airapetian, V., et al. 2019, \*Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability\*, ApJ, 881, 114.

## 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今号で行います。

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>

## 宇宙木材プロジェクト学生募集説明会開催

2026 年度においても、宇宙木材プロジェクトでは学生を募集します。その説明会を近日中に開催予定です。奮ってご参加ください！本研究室では木造人工衛星開発プロジェクトや低圧条件下での樹木育成実験、系外惑星の観測プロジェクトなどが進行しており、様々な角度から宇宙に関わることができます。以下に木造人工衛星開発プロジェクトの募集ポスターを掲載します。（豊西悟大 記）

宇宙を目指せ

# 宇宙木材プロジェクト

土井隆雄宇宙飛行士と共に、京都大学 × 龍谷大学で先陣を切って、超小型木造人工衛星 LignoSat を開発しています。

- ・ LignoSat-1R を 2028 年打ち上げ予定
- ・ 新たなミッションを搭載した衛星研究開発



HP



公式 X

## 各班紹介

### CDH 班：

衛星の全体システム設計、管理  
C 言語を用いた衛星コード作成

### EPS 班：

衛星の電力系設計、管理  
新規太陽光パネル基盤の木材への接着

### COMM 班：

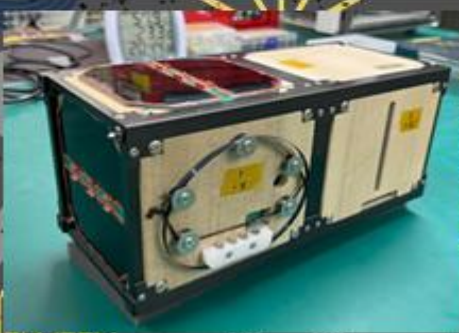
衛星通信の地上局の設計、管理  
LignoSat2 号機のアンテナ設計

### MISSION 班：

木材利用の可能性の追求、地磁気を利用した姿勢制御  
C 言語を用いた衛星制御コード作成

### STRUC 班：

3DCAD を用いた木造人工衛星の図面作成、制作  
シュミレーションによる構造解析



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](mailto:spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp)

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.52

2026 年 4 月 1 日発行