

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2022年6月号 No.6

5月の活動

JpGU-AGU セッション開催報告

日本地球惑星科学連合 (JpGU) とアメリカ地理学連合 (AGU) の合同セッション A-OS13Continental Oceanic Mutual Interaction – Planetary Scale Material Circulation セッションが 2022 年 5 月 24 日に開催されました。本セッションは日本海洋学会と水文水資源学会の共催として宇宙への移住につながるコアバイオームコンセプトを掲げた最初の国際学術セッションです。

セッション前半は山敷庸亮センター長と佐々木貴教氏（共に京都大学）が座長を務め、招聘講演一人目の Vladimir Airapetian 博士 (NASA/GSFC、SIC 特任教授) が、TRAPPIST-1 system の大気と、主星の実測の極紫外線 (XEUV) 強度から、長期に渡る照射によりこれらの惑星の大気が保持されていない可能性と、それによる居住可能性について述べました。招聘講演二人目の稲富裕光氏 (JAXA/ISAS、SIC 特任教授) は、月面開発の JAXA の貢献のアウトラインと長期ビジョン、ルテミス計画をはじめとする国際協力について説明されました。次に大野琢也氏 (鹿島建設、SIC 特任准教授) の講演では、月面溶岩孔に人工重力の施設を建設する方法について述べ、人工海洋を積極的に活かした建築物を提示しました。遠藤雅人氏 (東京海洋大学) は、実際の宇宙を想定した魚の養殖と実験について発表され、ティラピアが宇宙養殖の候補魚種であること、微小重力下での魚の挙動について紹介がありました。三木健司氏 (SIC 有人宇宙学研究センター) は成層圏におけるバルーン実験を通じて生物起源粒子の挙動とその生存性について発表しました。最後に斎藤敬氏 (京都大学) が、海洋プラスチックの汚染状況の現状と、海洋で分解可能なプラスチックの開発による海洋汚染の軽減について説明されました。

後半のセッションでは升本幸夫氏 (東京大学) と Behera Swadhin 氏 (JAMSTEC) が座長を務め、招聘講演者の John Adams (Biosphere 2 副所長) により、Biosphere 2 のシステムの紹介、火星を模した侵食地形 LEO、Biosphere 2 の歴史、またオーシャンバイオームの珊瑚育成の問題、人工熱帯雨林生育の問題などについて話がありました。招聘講演者の益田玲爾氏 (京都大学) は、舞鶴・音海・三陸の三海域における長期間の海洋視察調査の状況と温排水の有無や地震津波災害の影響による魚類相の変化とその要因の考察、人工海洋の可能性について講演しました。Behera Swadhin 氏の講演においては、SST (海表面温度) と、伝染病発生との関係についての説明があり、Covid-19 発生についても関係が示されていました。Jayanthi 氏 (JAMSTEC) の講演では、機械学習をつかって IOD から地表温度の予報を行う技術と、AOGCM を用いる予測との関連と適用可能性について解説がありました。小川裕也氏 (自然科学研究センター) は、実際のマングローブ林調査を通じた詳細な生態系構造の調査結果とそれぞれのバイオームの関連性について述べられました。

最後の平嶺和佳菜氏（東京理科大学）と紺谷昌平氏（筑波大学）他 SCB2 の 4 期生は、Biosphere 2 で実際に行った研修内容と屋久島・種子島を通じて学んだ実習のコンセプトから、海洋を上面に配置した新しい火星居住施設 Biosphere 3 について発表しました。コロナ禍を通じて 2 年ほどオンライン開催となった本大会は久しぶりのハイブリッド開催となりましたが、オンラインとあわせて 50 名ほどの参加者が発表を聞き、活発な議論が進みました。

現地ポスター発表では、佐藤啓明氏（京都大学）による琵琶湖に対する GCOM-C を利用した沈水植物の測定結果と、藤井咲花氏（京都大学・清水建設）による、ISS および月面施設における被ばく推定計算の発表がありました。A-OS13 ではオンラインポスターセッションを 6 月 1 日に開催予定です。（山敷庸亮 記）



2022 年度京カレッジリカレント教育プログラム 「宇宙移住の現在・未来について」開催報告

2022年度京カレッジ
リカレント教育プログラム

現代の教養講座
宇宙移住の
現在・未来について

講座概要

「大人だって学びたい!」という、社会人の学び直しニーズに応えるべく、大学コンソーシアム京都ではこの度、「現代の教養講座」を開講する運びとなりました。今年度は「宇宙移住の現在・未来について」と題し、現在世界中が注目する有人宇宙飛行や、月や火星への移住に関する最先端の知見を、食や住などの生存に関する視点から、科学技術や医療や法律まで幅広い視点で学びます。宇宙を知り、あらためて地球環境の大切さを知る。そして地球環境保全や来るべき宇宙時代に、私達に何が出来るかを、参加者全員で考えたいと思います。

※画像はイメージです。

2022 年 5 月から 8 月にかけて、現代の教養講座のシリーズ「宇宙移住の現在・未来について」を開催します。5 月 12 日に開催された第一回では、山敷庸亮センター長が「宇宙移住とコアバイオーム複合体」と題して、月惑星への移住を考える上での「コアバイオームコンセプト」と、今後続く連続講義の役

割と概要と講師の紹介、そして火星への移住を例にした概念と問題点について講演を行いました。概要講座は全8回で、今回紹介されたコアバイオーム概念を通じての宇宙森林、宇宙海洋の実現性についての講演が続き、コアテクノロジーである惑星移住のための技術的課題と惑星条件、技術的課題について学びます。さらにコアソサエティである宇宙法、宇宙医学の講演へと続きます。コアソサエティとして、宇宙社会（コアソサエティ）に不可欠となる宇宙法や宇宙医学という観点からも議論を深めます。なお、すでに今年度の申し込みは終わっていますが、聴講したい学生は、以下にメールアドレスにお問い合わせください。（山敷庸亮 記）

e-mail: envhazards@gsais.kyoto-u.ac.jp タイトル<コアバイオームコンセプト>

「宇宙移住の現在・未来について」資料 URL

https://www.consortium.or.jp/wp-content/uploads/page/39230/recurrent2022_02.pdf

6月の予定の紹介

学ント住友林業 鹿島建設 present 火星に住もう！

民間人が宇宙旅行に出かける様子がTVでも放映されるなど、近年宇宙は大変身近になり、人類が月や火星に移住することも決して夢ではなくなってきました。この講座では、SIC 有人宇宙学研究センターに所属する講師が、6回にわたって、人類が宇宙で快適に暮らせる可能性や実現に向けた最新の研究成果について紹介します。第1回は土井隆雄氏による「有人宇宙活動」、第2回は山敷庸亮氏による「火星に海を～宇宙移住のための海をつくろう～」が開講されました。第3回以降の予定は以下の通りです。申し込み先は、大阪よみうり文化センター <https://www.oybc.co.jp/mananto/> になります。奮って参加をお願いします。

回	日時	講義タイトル 講師 所属
3	6月19日	「宇宙基地を想定した宇宙人材育成」 三木健司 京都大学大学院総合生存学館特定助教
4	7月17日	「宇宙木材プロジェクト（住友林業との共同研究）」 村田功二 京都大学大学院農学研究科准教授
5	8月21日	「宇宙で暮らす～人工重力施設研究～」 大野琢也 鹿島建設関西支店副部長、SIC 有人宇宙学研究センター
6	9月18日	「ロケットで宇宙旅行に出かけよう」 稲谷芳文 宇宙航空研究開発機構名誉教授、SIC 有人宇宙学研究センター

LignoSat 紹介

木造人工衛星学生開発チーム

CDH 班 菊川祐樹

6 回目となります LignoSat 紹介、今回は CDH 班の活動を紹介します。第 1 回目では CDH 班とはどういうことを行っているのかを説明いたしましたので、第 2 回目では現在おこなっております、基板作成と基板評価について説明します。

LignoSat 製作の中で、FAB、OBC/EPS、COMboard という基板が存在します。これらの基板は企業に作成を依頼しており、その基板が本当に使用可能かどうか、衛星組み立ての際に調べる必要があります。この時基板単体を評価する単評価基板と、基板間のやり取りを評価する相互評価基板の 2 つの基板が必要となります。使用時期は EM 作成の際の、各基板の相互評価の前の段階、FM 作成の際の FM 基板が納品された後です。

単評価基板は右図 1 のような基板となっており、各基板の 50PIN 出力をそのまま別の PIN に出力するものとなっています。用途としては FAB、OBC/EPS 基板、COM 基板がきちんと単体で動作しているかを確認するもので、電力線と信号線で配線の太さを調整し、できるだけ配線同士が交わらないようにしました。この単評価が完了したら、次の相互評価の段階に入ります。

相互評価で使う相互評価基板は右図 2 のようになっており、これは実際に LignoSat に使用される BPB 基板を基にして設計し、各電力ラインが外部から出力できるようにしています。相互評価では各基板の相互通信と衛星の放出時に重要となる、放出感知スイッチの確認も行い、九州工業大では行われていない太陽光基板とアンテナ基板の相互評価も行えるようにしました。

このように現在 CDH では衛星に使われる基板の評価を主に行っており、各ソフトウェアの作成も引き続き行い、7 月の基礎設計完了に向けて尽力していきます。(菊川祐樹 記)

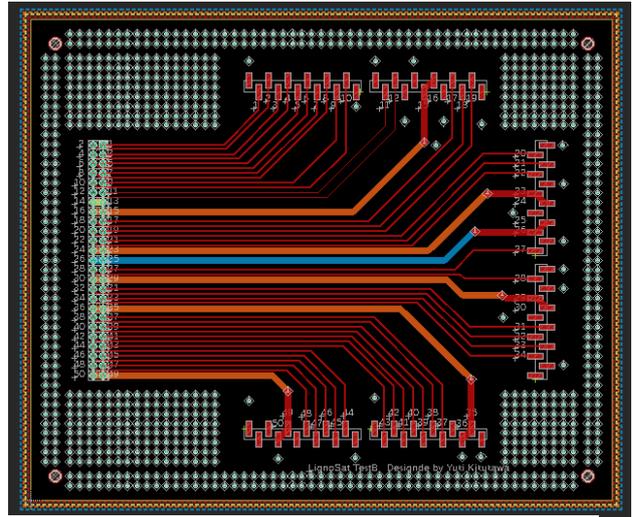


図 1 単評価基板

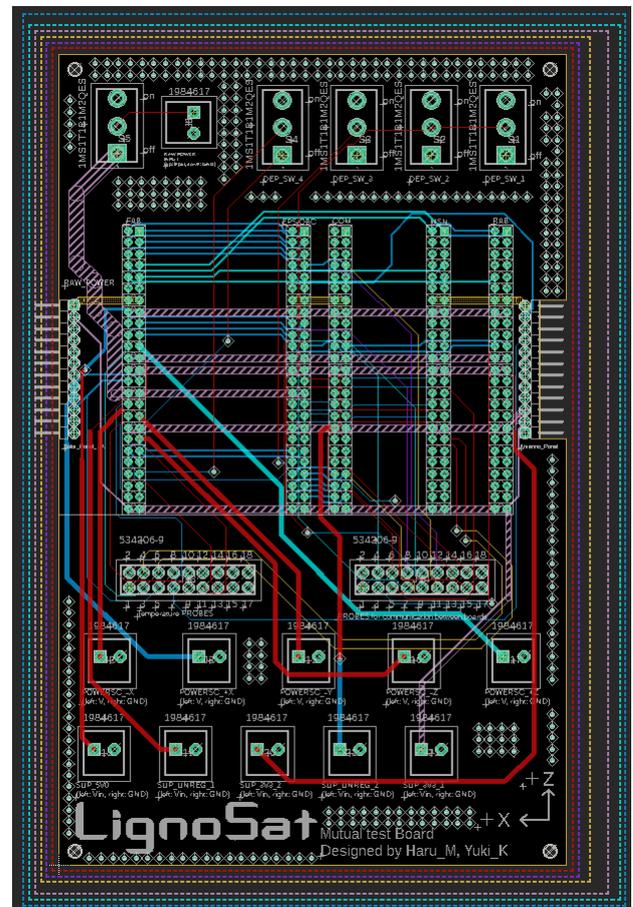


図 2 相互評価基板

低圧下樹木育成プロジェクト紹介

樹木育成学生チーム

今月号から何回かに分けて現在私たちが実験に使用している低圧樹木育成実験システムについて説明しよう。図1に実験システムダイアグラムを示す。樹木育成チャンバは、直径30センチ、高さ50センチの亚克力製である。育成チャンバは低圧環境保持のために真空ポンプに接続されているのと同時に、各種計測用センサーが内在されている。現在は、チャンバ内の温度、湿度、CO₂、及び真空度を測定している。それらの測定データはAD変換器によりデジタルデータに変換され、マイクロコンピュータに送られ、事前に設定された値に環境制御される。低圧育成実験では2つのチャンバを使用し、ひとつが低圧用、もうひとつが大気圧（コントロール）用である。約10センチの高さの苗木（*Populus alba*）が低圧チャンバの天井に到達するまでの約3週間を1実験サイクルとしている。

CO₂は光合成により苗木に消費されるので、設定値（500ppm）よりも低くなると自動的に電磁バルブが開き、新しいCO₂がボンベから供給される。同様に苗木に消費される水給液系も必須である。チャンバ内が低圧になるために、その低圧が給液タンクに及ばないようにする工夫が必要となる。マイクロコンピュータとしてArduinoを使っている。Arduinoは安価なマイコンであるが、各種計測センサー用のライブラリーが充実しており、プログラムもC言語で作れるので扱いやすい。照明はLEDライトを使用し、昼14時間、夜10時間の昼夜サイクルを用いている。（土井隆雄 記）

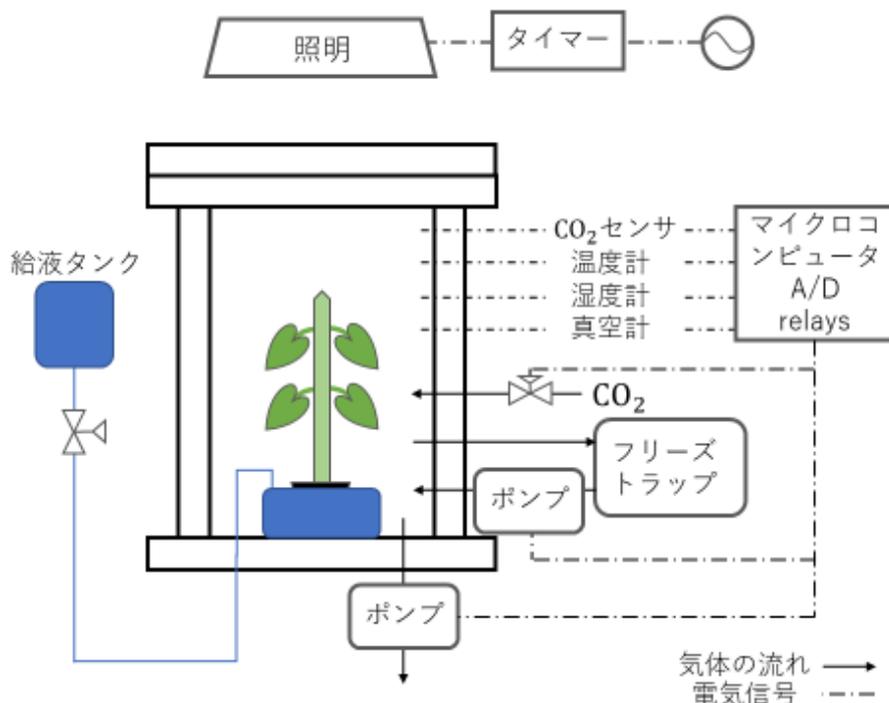


図1 低圧樹木育成実験システムダイアグラム

育成チャンバ：亚克力製 直径：30cm 高さ：50cm

育成条件：照明： $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ （14時間）

室温：20～25℃、湿度：50±5%、CO₂濃度：500±50ppm

研究紹介

宇宙空間での木材の劣化

村田功二（京都大学農学研究科森林科学専攻 准教授）

1. はじめに

宇宙木材プロジェクト（通称：LignoStella Project）では、2023年に木造人工衛星（LignoSat）の打上げを計画している。人工衛星の設計にあたり、構造設計や基本機能に必要な機器（バス機器）、ミッションに関わる機器、通信システムなどは京都大学学生チームによって精力的に開発が進められている。この人工衛星の特徴は、なによりも衛星構体に木材が使われていることである。これまでにロケットエンジンの断熱材として利用された例はあるが⁽¹⁾、構造要素として木材が使われた例はない。宇宙空間で予想される劣化要因および問題には主に下記が考えられる。



図1 木造人工衛星 LignoSat モデル

- ① 高真空 (Ultra-High Vacuum, UHV)
- ② 熱劣化 (Thermal degradation)および熱伝達(Heat transfer)
- ③ 真空紫外線 (Vacuum Ultra Violet, VUV)
- ④ 原子状酸素 (Atomic Oxygen, AO)
- ⑤ 宇宙線 (Cosmic Ray)

2. 真空や熱の影響

宇宙木材プロジェクトでは2017年7月より、高度100kmに相当する大気圧環境（0.1 Pa）で木材の真空曝露試験を実施している。針葉樹材および広葉樹材を含む複数の木材試験体の曲げヤング率を継続的に測定した結果、現段階では劣化は確認できていない。木材は高分子材料の一つではあるが、真空環境での数年の使用では劣化はないと予想される。

木材の物性と温度の関係を図2に示す。人工衛星の投入を計画している地球低軌道（LEO）で想定される温度帯では急激な弾性率の低下はない。しかし、-100℃付近および80℃付近で損失正接の増加がみられ、それはヘミセルロースの側鎖やリグニンなどの非結晶構造の緩和と考えられている。高分子材料の熱劣化には酸素や水が影響するとされるが、酸素不在下での熱劣化として、①主鎖の切断反応、②側鎖の反応がある⁽²⁾。粘弾性の特性からLEOでは側鎖の反応が考えられ、木材の脆性化や繊維直交方向の熱膨張係数

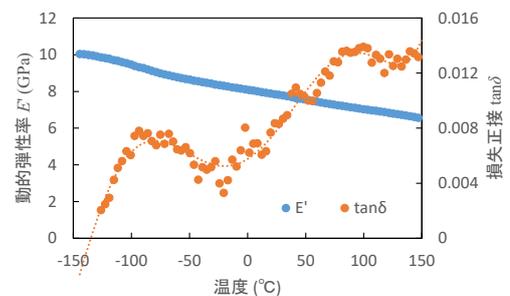


図2 気乾状態のポプラ繊維方向の動的弾性率および損失正接と温度の関係（1Hz）

の変化が予想される。また、木材は多孔質体であるため木材実質と空気が熱の伝達経路とされ、Siau によって提唱されたモデル解析により真空中での熱伝導率の予測は可能である⁽³⁾。真空中では空気への熱伝達はないために、人工衛星が機能するためには熱解析は非常に重要である。木造人工衛星の打上げによって、熱劣化による熱膨張係数の変化、およびモデル解析で予想された熱伝導率による熱解析の妥当性の検証が期待できる。

3. 真空紫外線 (UVU) と原子状酸素 (AO)

片岡⁽⁴⁾によると、紫外線での木材の光劣化では、波長が短くなると浸透深さは浅くなる。針葉樹では紫外線 (250-400nm) で厚さ 75 μ m 以上には浸透しない。光劣化によってリグニンは分解して表面強度は低下し、雨水や砂塵による浸食作用を受けやすくなる。宇宙空間でも光劣化によってリグニンは分解して表面強度は低下する。しかし風雨による浸食がないので、光劣化に強い結晶性のセルロースは残るため浸食は遅いと予想される。

木本ら⁽⁵⁾は原子状酸素が衝突すると材料表面に酸化物層が形成され、酸化物が気体 (高分子材料では CO や CO₂) である場合や、剥離しやすい物質 (例えば AgO) であれば、徐々に表面材料の消失が進行するとした。木材の高分子材料の一つであり、質量の半分を占める炭素原子が AO と反応して CO や CO₂ になって消散すると考えられる。

国際宇宙ステーションでは 3.95 年間のポリマーの宇宙曝露実験 (MISSE 2) がなされている⁽⁶⁾。この報告ではカプトン H の曝露より求めた AO の衝突は 3.95 年間で 8.43×10^{21} atoms/cm² であった。木本ら⁽⁵⁾によれば、高度 400 km の AO 密度は、 8×10^{13} atoms/m³ で、秒速 8 km で動く宇宙機に衝突する AO は、 6.4×10^{13} atom/cm²/s になるとしている。MISSE-2 の実験結果からは 6.77×10^{13} atom/cm²/s となり近い値である。

AO が木材に衝突して下記の反応が生じたとする。ここではセルロースを構成する基本単位であるグルコースを想定する： $6O + C_6H_{12}O_6 \rightarrow 6CO + 6H_2O$

ホオノキ (0.48 g/cm³) の半分が炭素として単位体積 (1cm³) 当たりの元素数を計算すると

$$0.48 \div 2 \div 12 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.2 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$$

原子状酸素 1 個につき炭素原子が 1 個反応すると仮定して、半年間で消失するホオノキの体積は下記で見積もられる。

$$1.0 \times 10^{21} \div 1.2 \times 10^{22} = 8.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$$

これは単位面積当たりのエロージョン量なので、消失する深さは以下になる。

$$8.3 \times 10^{-2} \times 1 = 0.083 \text{ cm}$$

以上は、衝突した AO が全て反応したと仮定している。実際には衝突する AO の速度の影響⁽⁷⁾や UVU による励起の影響も考えられる。実際に宇宙空間での衝突の影響を調べる必要がある。

4. 宇宙線の影響

真空の宇宙空間では高エネルギーの宇宙線 (cosmic ray) が飛び交っている (図 3)。銀河系を起源とする銀河宇宙線 (GCR) は約 90% が陽子 (水素イオン) であり、約 10% が α 線 (ヘリウム) である。重粒子が 1% で、頻度は少ないが炭素イオンや鉄イオンなど質量が大きく高エネルギー粒子も含

まれる。太陽を起源とするものは太陽粒子線（SEP）と呼ばれ、陽子とベータ線（電子）からなる。太陽フレアによって発生し、磁気嵐等を引き起こし、通信障害・電波障害の原因となる。太陽風で発生した荷電粒子は地球の磁場で補足され、補足放射線帯粒子と呼ばれる。放射線帯には平均高度が3600kmの内帯（IRB）と18000kmの外帯（ORB）がある。内帯には陽子が、外帯には電子が補足されている。

Dachev⁽⁸⁾はISSの欧州宇宙機関EXPOSE-R2プラットフォームで測定した放射線量を報告した。測定された放射線量を4つのソースカテゴリーに分けた：(i) 銀河宇宙線（SEP）、(ii) 内部補足放射線帯（IRB）、(iii) 外部補足放射線帯（ORB）、(iv) 太陽エネルギー粒子（SEP）イベント。442日間の測定でIRBの陽子が最も多い線量であり、またORBの電子とSEPが1日あたりで最大の線量を示した。SEPイベントは観測期間中に11回測定されている。

宇宙線が木材に与える影響を調べた研究はないが、殺菌を目的としたガンマ線照射実験の報告はいくつかある。Severianoら⁽⁹⁾は彫刻用の木材であるセンダン科のCedro-Rosa (*Cedrella fissilis*) やクスノキ科のImbuia (*Ocotea porosa*) にガンマ線を照射し、圧縮強度の変化を調べた。吸収線量が100kGyに達しても圧縮強度には明確な低下は確認できなかった（図4）。

5. ISSでの船外曝露実験

2022年2月20日(日)午前2時40分(日本時間)に米国バージニア州NASAワロップス飛行施設からシグナス補給船運用17号機(NG-17)がアンタレスロケットで打ち上げられた。このミッションのJAXA搭載品に簡易材料曝露実験ブラケット(ExBAS)があり、宇宙木材プロジェクトの木材試験体もNG-17に積載された(図6)。木材試験体は3月4日にロボットアームで運び出されて船外曝露実験が開始された。一定期間の曝露後に回収し、AOによるエロージョンと宇宙放射線による木材の劣化の検証をおこなう予定である。

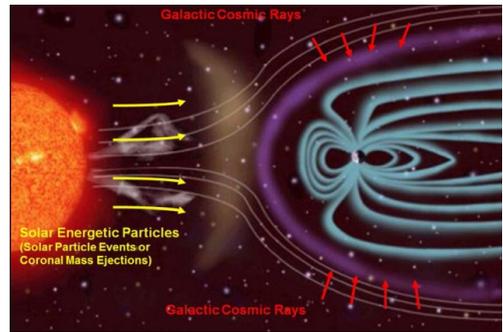


図3 惑星間空間における電離放射線

https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia16938.html ©NASA

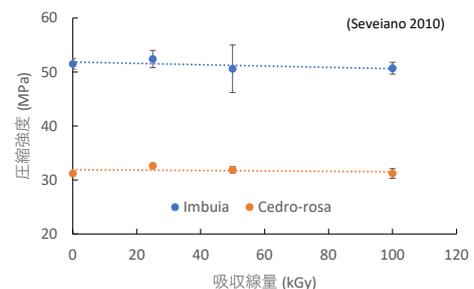


図4 ガンマ線の吸収線量と圧縮強度の関係⁽⁹⁾



図5 シグナス補給船運用17号機



図6 ExBAS用木材試験体(京都大学)

参考文献

- 1) JE Pavlosky, LG St. Leger, "Apollo Experience Report – Thermal Protection Subsystem", NASA TECHNICAL NOTE D-7564, 1974.
- 2) 大澤善次郎 (1996) 高分子の熱劣化. マテリアルライフ 8(4), 165-175.
- 3) J.F. Siau (1983) Transport Processes in Wood. Springer, 132-139.
- 4) 片岡 厚 (2008) 木材の光劣化とその深さ分析. 木材学会誌 54(4): 165-17
- 5) 木本雄吾 (2009) 低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価. 真空. Journal of the Vacuum Society of Japan 52(9): 475-483.
- 6) B.A. Banks, J.A. Backus, M.V. Manno, D.L. Waters, K.C. Cameron, K.K. de Groh (2009) Atomic Oxygen Erosion Yield Prediction for Spacecraft Polymers in Low Earth Orbit. NASA Technical Memorandum (TM) 20090034484
- 7) M. Tagawa, K. Yokota, K. Kishida, A. Okamoto, T.K. Minton (2010) Energy Dependence of Hyperthermal Oxygen Atom Erosion of a Fluorocarbon Polymer: Relevance to Space Environmental Effects. ACS Applied Materials & Interfaces 2(7): 1866–1871. <https://doi.org/10.1021/am100201k>.
- 8) TP Dachev, NG Bankov, BT Tomov, YuN Matviichuk, PIG Dimitrov, DP Hader, G Hrneck, "Overview of the ISS Radiation Environment Observed during the ESA EXPOSE-R2 Mission in 2014–2016", Space Weather 15, pp.1475-1489, 2017.
- 9) LC Severiano, FAR Lahr, MAG Bardi, AC Santos, LDB Machado, "Influence of gamma radiation on properties of common Brazilian wood species used in artwork". Progress in Nuclear Energy, 52, pp.730-734, 2010.

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター

<https://space.innovationkyoto.org/>

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室

編集人：木造人工衛星製作チーム 菊川祐樹 筒井涼輔

Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

SIC 有人宇宙学研究センター News Letter No.6

2022 年 6 月 1 日発行