

放射線化学の宇宙実験への参画の可能性

大阪大学 産業科学研究所

中川 和道*, 柴田 裕実, 吉田 陽一

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

前川 康成

Various experimental studies are carried out in space environment including material and biological sciences. We try to invite young researchers in radiation chemistry toward experimental studies in space, because the International Space Station ISS will retire on 2024 and the next stage of space experiments will move to the Lunar Orbital Platform-Gateway, LOP-G. We believe that radiation chemistry community can contribute to many problems in space exploration and experiments.

Keywords: ISS, LOP-G, space experiment, radiation chemistry

1 はじめに：宇宙実験の現状と近未来

国際宇宙ステーション ISS での宇宙実験は活発に行われており、中でも公募型が最も身近な存在である。日本の宇宙実験は、ISS の後、月軌道プラットフォーム-ゲートウェイ、月面基地、火星という新たな舞台へと広がることになっており¹⁾、実験テーマの募集が一部、すでに始まっている。

ISS は 1998 年から軌道上の組み立てを開始し 2011 年完成した。日本は有人宇宙実験施設「きぼう」を 2009 年に完成させ多くの宇宙実験を実施してきた。ISS の運用は当初 2016 年に終了予定であったが、その後、2024 年まで延長されることになった。

Invitation to the experimental study of radiation chemistry in space

Kazumichi NAKAGAWA*, Hiromi SHIBATA and Yoichi YOSHIDA (SANKEN, Osaka University), Yasunari MAEKAWA (Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology), 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1
TEL: 06-6879-4285, FAX: 06-6879-4287,
E-mail: knakagawa@sanken.osaka-u.ac.jp

ISS の後、月面に基地を建設する計画が進行中である¹⁾。月面に基地を建設する理由は、地球より小さな表面重力 (0.17 G) を活用して火星など他の惑星などへの探査を試みることである。月面基地では大量の水、食料、居住資材、エネルギー資源、金属資源 (鉄、アルミなど) を現地で調達、加工せねばならない。宇宙実験の規模と水準が画期的に向上するのにもない、居住など生活のあらゆる場面を支えることが必要となってくる。

放射線化学はこの分野に有意義な寄与ができるであろうか？放射線化学の得意分野は何といっても材料科学であろう。その他にも線量測定、食品科学、医科学、生命科学にも広く及ぶので、何らかの分野で参画の可能性は高い。本稿の目的は、放射線化学の活動と宇宙実験を結びつけようとする研究者の新たな挑戦を助けることであり、何らかのヒントとなれば幸いである。

2 宇宙実験の舞台

2.1 ISS

ISS は、高度約 400 km の地球大気の外縁部を周期約 90 分で周回している。円運動に起因して微小重力環境となる。船外の気圧は約 3×10^{-9} hPa で、成分は H (10^5 cm^{-3}), He ($2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$), N₂ (10^5 cm^{-3}) などである。これに加えて原子状酸素 (atomic oxygen: AO, $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$) が多く存在する点が地球周辺の特徴で、月周回軌道には存在しない。AO は合成樹脂や金属との反応性が高くカプトンも損傷する。AO の影響は、近年、後藤・山下ら²⁾によっても調べられている。

ISS 軌道上での太陽光 (電磁波) スペクトル³⁾のうち紫外部を Fig. 1 に示す。太陽光スペクトルを全波長域で積分した照射強度は約 $1350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($= 42 \text{ GJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$) である。Figure 1 のスペクトルは、表面温度 5800 K の黒体放射スペクトル (ピーク波長 500 nm) と、H および He の原子、イオンからの発光線スペクトルを重ね

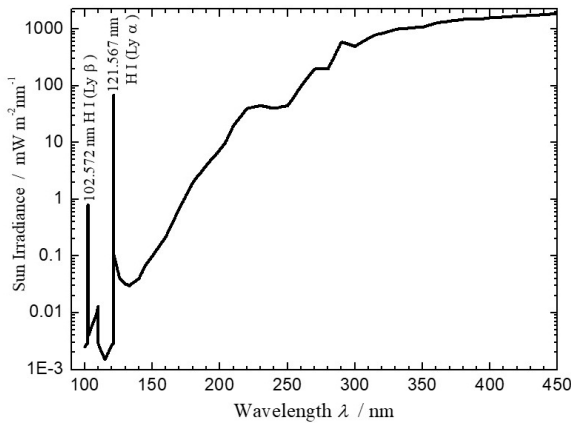


Figure 1. Solar irradiance spectrum calculated in this work based on Lean³⁾.

させたスペクトルである。光化学反応実験に重要な波長 110 nm–400 nm 成分は $4.1 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ とエネルギー的には 9.8 % である³⁾。ISS 船外では大気による熱伝導がないので日陰面は低温、日照面は高温となる。

ISS 軌道上での放射線スペクトル⁴⁾を Fig. 2 に示す。Figure 2 のさまざまな放射線の特性などについては、2.2 項で述べる。ISS での放射線量について述べる。地表の放射線量は $2.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ であるが⁵⁾、3 節で述べる「たんぼプロジェクト」における実測データ^{6,7)}から、ISS 軌道上では約 $250 \text{ mGy}\cdot\text{y}^{-1}$ 、船内では人工的の遮へいの効果で約 $100 \text{ mGy}\cdot\text{y}^{-1}$ と、地上より大きな値であった。これは、ISS 軌道では大気による遮へいがないためである。放射線量の単位 Gy と Sv を混在して用いているので注意されたい。放射線吸収線量 (単位 Gy) を人体影響をあらわす等価線量 (単位 Sv) に換算するには、放射線荷重係数を乗じる。放射線荷重係数は、ガンマ線、X 線、電子線では全エネルギー範囲にわたって 1 であるが、陽子では反跳陽子を除きエネルギー 2 MeV 以下で 5、 α 粒子、核分裂片、重原子核で 20、中性子ではエネルギーによって 5 から 20 の値をとる。銀河宇宙線 (galactic cosmic ray: GCR, 陽子約 85 %, α 粒子約 14 %, 電子約 1 %, その他重原子核) や太陽粒子線 (solar energetic particles: SEP, 大部分が陽子) を受ける ISS や月面などではこれらの効果を考慮する必要がある。

ISS 船外における化学反応としては、紫外線 $4.1 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ による光化学反応と、放射線 $250 \text{ mGy}\cdot\text{y}^{-1}$ による放射線化学反応があげられる。エネルギー密度の単位は紫外線では $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 、放射線では

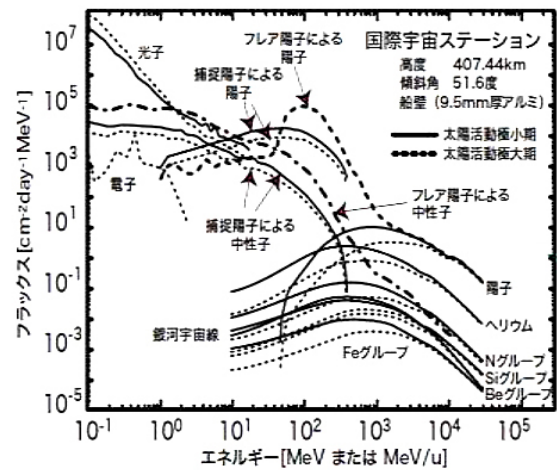


Figure 2. Radiation spectra at ISS orbit⁴⁾. Duplication permitted by JAXA No. 0000028447.

$\text{Gy} (= \text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$ と互いに異なるので、化学反応の収量や分布を論じることは単純ではない。紫外線では波長 λ に依存する (線) 吸収係数 $\mu(\lambda)$ の効果を、放射線では放射線の種類およびエネルギーに依存する線エネルギー付与あるいは (線) 吸収係数 $\mu(\lambda)$ の効果を、問題に応じてその都度検討することが必要となる。

2.2 月軌道プラットフォームゲートウェイ

月軌道プラットフォームゲートウェイ (Lunar Orbital Platform-Gateway: LOP-G) は、月軌道を周回する有人宇宙ステーションで、ここから無人、有人の月探査、月の資源利用技術の開発、有人火星探査の先行試験などに利用される計画である¹⁾。ISS との違いは、(1) 重力が小さいので月周回軌道上には AO がない、(2) 地球のような固有磁場がない、などである。2024 年後半から組み立てが開始されるとの工程が提案されている。ISS と LOP-G との往復に用いられる輸送機の表面に実験試料を設置する実験の計画も議論されているので、最新の情報は JAXA 国際宇宙探査センターホームページ¹⁾を参照されたい。

2.3 月面基地

月には大気がほぼ無く地磁気もないので、月面では、強烈な紫外線、放射線 (線量は平均 $160 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ – $416 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$)、隕石やダストの直接衝突などの危険要因がある。太陽のフレア (恒星に発生する巨大な爆発現象) の際には 1 度に数 Sv もの線量が予測されるとの報告もある⁸⁾。これらの危険を避けるため、月面基

地は、月の溶岩洞など地下に建設される可能性が高い。その場合の放射線環境に関する研究が盛んに行われている⁹⁾。月面基地の建設には月面の岩石やそれを覆う堆積層（レゴリスと呼ばれる）を建材および放射線遮へい材として利用する。月面に降り注ぐ一次放射線は、SEPとGCRである。月の岩石やレゴリスの成分は50%近くがSiO₂であるが、その他にも重金属の酸化物が多く含まれているため、GCR照射によって生じる二次放射線では、中性子とγ線が主体となる¹⁰⁾ことも考慮する必要があり、現地調達可能で効果の高い遮へい体の研究が盛んにおこなわれている¹¹⁾。月面基地に関して、月にとどまらず惑星にも対象を広げて人類が居住する場面を想定し、「宇宙惑星居住科学」という総合的な研究分野が拓かれつつあり、興味をそそられる¹²⁾。

月に関する興味ある課題のひとつに、極地域の永久影における水素蓄積の科学と活用がある¹²⁾。月の回転軸は傾斜が小さいので、月の極域の凹面には永久的に日光が当たらず、低温（約25 K）の環境が維持される。さらに太陽からは太陽風として水素が照射され、それが極域に蓄積されているという。分光学的探査によればこれらの水素が水あるいは氷として存在するかどうかは必ずしも明らかでなく、さまざまな水素化合物である可能性もあるとされている¹²⁾。水素（H, D, T）はトンネル反応を含め多彩な化学反応を起こすので、水素化合物の生成・蓄積・変遷は、宇宙の物質進化、太陽系の生成過程の研究などの基礎科学から、水の挙動など応用にわたる幅広い興味の対象となる。さらに、水素化合物の活用は、人類の生存や食料の生産に欠かせない水の生成、ロケットの燃料の生成など実用的にも極めて重要である。

3 中川の経験

放射線耐性細菌が宇宙紫外線に耐えて惑星間を移動する可能性を調べるプロジェクトで、中川は真空紫外線量の実測を担当した。具体的には、アラニン放射線線量計¹³⁾をヒントにしてアラニン蒸着膜を用いた積算型の紫外線線量計を開発し、日本の「たんぼぼプロジェクト」（2015–2017）^{4,6)}、「たんぼぼ2プロジェクト」（2020–2021）に積載した。さらに、溶液照射実験を想定した封じ切り型の液体セルと循環型の液体セルの試作を行った。星間分子雲におけるアミノ酸合成においてはラジカル反応の寄与が重要であり放射線化学の立場から重要と考えられる¹⁴⁾。

4 半導体の重イオン照射リスクの研究例

宇宙飛行体に搭載した半導体デバイスが宇宙環境における放射線照射効果によって機能低下を起すことが知られており、量子科学技術研究開発機構などにおいてその実態が鋭意研究されてきた。半導体デバイスの放射線効果の代表的なものに、「はじき出し損傷効果」、「トータルドーズ効果」、「シングルイベント効果」がある。コンピューターCPU、パワー半導体、太陽電池など、重要な機能を果たす半導体を対象に長年の研究が蓄積されており、研究の現状とこれからの課題が総説^{15,16)}にまとめられている。

5 材料研究の例

宇宙空間に置かれた材料は、真空、熱、紫外線、放射線、AOなどの複合的なストレスにさらされる。この複合的な効果は、地上試験では模擬できないことが多い。国際宇宙ステーション材料曝露実験（The Materials International Space Station Experiment: MISSE）において、2001年以来1500種以上の試料が用いられてきた。スーツケース状のコンテナに収納し、宇宙でふたを開いて数年間、曝露する。MISSE-8（2011年打上げ）では、宇宙曝露環境において初めて能動試験（引張り試験）が行われた。Web検索“MISSE”などでその現状を追跡することが可能である。日本における材料の宇宙環境試験の事例を列举すると、圧電素子¹⁷⁾の特性（印加電圧-発生変位性能およびその交流応答、キャパシタンスなど）の変化、複合材料の集合体を用いて熱変形を打ち消すことを目指す反射鏡の支持構造体¹⁸⁾の特性変化など、文字どおり枚挙にいとまがない。

6 課題募集と応募・関与の仕方

JAXAは毎年、研究課題を募集している¹⁹⁾。過去にどのような採択があったかも記載されている。毎年1月頃には、宇宙理学、宇宙工学が一堂に会する宇宙科学シンポジウム²⁰⁾が開催される。また、最近、月サイエンスブックが公開された²¹⁾。これらが参考になる。

〈参考文献〉

- 1) 例えば、JAXA 国際宇宙探査センターホームページ、
<https://www.exploration.jaxa.jp/program/index.html>,
および NASA のアルテミス計画、

- https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf
- 2) 後藤 亜季, 山下 真一, 田川 雅人, 第 63 回放射線化学討論会講演要旨集 (2020) 46.
 - 3) J. Lean, *Rev Geophys.*, 29 (1991) 505.
 - 4) 宇宙航空研究開発機構, きぼう 船内実験室利用ハンドブック, 2009 年 7 月,
<https://iss.jaxa.jp/kiboexp/participation/application/documents/pm0202/pmhandbook.pdf>
 - 5) 新生活環境放射線, 原子力安全研究協会 (2011).
 - 6) A. Yamagishi, Y. Kawaguchi, H. Hashimoto, H. Yano, E. Imai, S. Kodaira, Y. Uchihori, K. Nakagawa, *Astrobiology*, 18 (2018).
 - 7) S. Kodaira, M. Naito, Y. Uchihori, H. Hashimoto, H. Yano, A. Yamagishi, *Astrobiology*, 10.1089/ast.2020.2427.
 - 8) 込山 立人, 松本 晴久, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 平成 18 年度宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部宇宙科学研究本部研究成果報告書 (2006) 157.
 - 9) M. Naito, N. Hasebe, M. Shikishima, Y. Amano, J. Haruyama, J. A. M. Lopes, K. J. Kim, S. Kodaira, *J. Radiol. Prot.*, 40 (2020) 947.
 - 10) J. A. Adams Jr, D. H. Hathaway, R. N. Grugel, J. W. Watts, NASA/TM-2005-213688, 2005.
 - 11) 後藤 亜希, 島崎 一紀, 木本 雄吾, 松本 晴久, 永松 愛子, 宇宙航空研究開発機構特別資料: 第 13 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集 (2017) 19.
 - 12) 石川 正道, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 34 (2017) 340205.
 - 13) T. Kojima, S. Kashiwagi, Y. Zhang, *Appl. Radiat. Isot.*, 48 (1997) 965.
 - 14) 柴田 裕実, 宇宙と放射線化学, *Radioisotopes*, 66 (2017) 617.
 - 15) T. Makino, T. Ohshima, *Radioisotopes*, 68 (2019) 423.
 - 16) 大島 武, パワー半導体デバイスの放射線劣化・破壊, 電気評論, 2020 年 12 月号, 1.
 - 17) 田中 宏明, 小木曾 望, 池田 忠繁, 石村 康生, 藤垣 元治, 後藤 優太, 田川 雅人, 岩田 稔, 樋口 健, 勝又 暢久, 岩佐 貴史, 坂本 啓, 岸本 直子, 波多 英寛, 仙場 淳彦, 第 34 回宇宙構造・材料シンポジウム: 講演集録 (2018).
 - 18) 西堀 俊幸, 神谷 友裕, 石田 良平, 真鍋 武嗣, 石村 康生, 永井 康史, 落合 啓, 菊池 健一, 中村 信幸, 中村 和行, 村瀬 允弘, 宮崎 謙一, 宗村 知治, 久米 将実, 原 憲一, 松本 隆之, 日本航空宇宙学会誌 67 (2019) 133.
 - 19) 宇宙航空研究開発機構, 「きぼう」利用のご案内, <https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/>
 - 20) 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学シンポジウム, <https://www.isas.jaxa.jp/researchers/symposium/spacescience/>
 - 21) 月サイエンスブック 編集委員会, 月サイエンスブック (第一部), 2021 年 8 月.

〈著者略歴〉

中川 和道: 大阪大学 産業科学研究所 産業科学ナノテクノロジーセンター 招へい教授. 専門: 量子ビーム物性.

柴田 裕実: 大阪大学 産業科学研究所 産業科学ナノテクノロジーセンター 特任研究員. 専門: 原子分子物理学, 量子ビーム科学.

吉田 陽一: 大阪大学 産業科学研究所 産業科学ナノテクノロジーセンター教授. 専門: 量子ビーム科学.

前川 康成: 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 副所長. 専門: 放射線化学.