

ヴァン・アレン帯に挑む生命科学実験

橋本 博文、横堀 伸一、三田 肇、高橋 昭久、吉田 由香里、稲富 裕光

Life Science Experiment to Challenge the Van Allen Radiation Belt

Hirofumi Hashimoto*, Shin-ichi Yokobori, Hajime Mita, Akihisa Takahashi, Yukari Yoshida, Yuko Inatomi

*Japan Aerospace Exploration Agency, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 252-5210

E-Mail: hashimoto.hirofumi@jaxa.jp

Abstract: In the future, when we travel to the Moon or Mars, we will be exposed to very high radiation. To realize interplanetary flight, we must first exceed the Van Allen radiation belt where the particle beam is trapped. Therefore, as a first step of these resistance experiments, we propose a life science experiment in the Van Allen radiation belt using a sounding rocket.

Key words; Life Science, Van Allen Radiation Belt, Sounding Rocket, USB

はじめに

近未来において、必ずや人類は月や火星に進出するであろう。そのとき、国際宇宙ステーション ISS での被ばく量をはるかに上回る放射線にさらされる可能性があり、その積算量は火星往復および滞在の旅全体でおおよそ 1Sv になる。有人惑星間飛行を実現するためには、まず、粒子線がトラップされているヴァン・アレン帯の壁を越えなければならない。その後は長期間、銀河宇宙線に耐える必要がある。そこで、これらの耐性実験の第一段階として、ヴァン・アレン帯を積極的に利用した生命科学実験を提案する。

ヴァン・アレン帯に到達する軌道としては、JAXA で運用中の「あらせ」(ERG)などが参考になるが、規模が大きく実現に時間がかかるので、まずは改良型観測ロケット SS-520 による超小型衛星での実験を考える。超小型衛星では大きさの点で大きな制約があるが、ヴァン・アレン帯における生命科学実験は次世代の有人宇宙活動につなげる大きなインパクトを与えるに違いない。

超 ISS 高度での生物曝露実験

生物曝露実験としては、Horneck らりによる宇宙実験、日本の「たんぼぼ」²⁾ の曝露実験等があるが、その多くは頑強な地球磁場に守られた数百 km 程度の低軌道高度での実験であった。次のステップとしては、ISS 高度よりもはるかに高い位置に存在するヴァン・アレン帯を積極的に宇宙被ばく実験場と捉え、この軌道高度での生物曝露実験を行うことを提案する。ここで得られる知見は、今後の有人惑星間飛行における放射線耐性や放射線防護を検討する上で非常に重要であると考えられる。

ヴァン・アレン帯

ヴァン・アレン帯は、アメリカ初の人工衛星エクスプローラ 1 号により発見された。地球磁場に捕捉された高エネルギー粒子線が構成されていて、地球を 360 度トラス状に取り巻いている。さらに、内帯と外帯との二層構造に

なっており、赤道付近が最も層が厚く、極付近は層が極めて薄い。内帯は赤道上高度 2,000~5,000km に位置する比較的小さな帯で陽子が多いのに対し、外帯は 10,000~20,000km に位置する大きな帯で電子が多い。本提案では、このヴァン・アレン帯をターゲットにする。

参考になる「あらせ(ERG)」の軌道

ヴァン・アレン帯の軌道高度を探索する JAXA のプロジェクトとしては、ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG: Exploration of energization and Radiation in Geospace)があり、衛星の仕様が参考になる。ERG は、2016 年 12 月 20 日に内之浦宇宙空間観測所からイプシロンロケット 2 号機によって打ち上げられた。ERG の諸元は、質量 350kg、高度近地点 440km、遠地点 32,000km、軌道傾斜角 32 度の楕円軌道、公転周期 570 分である。図 1 に ERG の公転面内のおおよその軌道を示す。この図から ERG の軌道がヴァン・アレン帯を貫通しており、本提案の実験に必要な軌道要素を満たしていることがわかる。

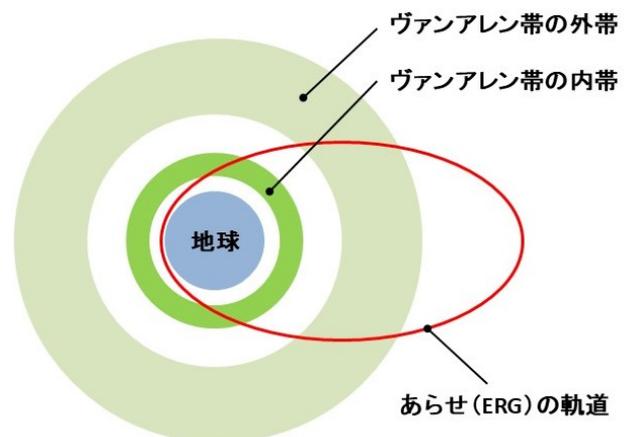


図 1 ヴァン・アレン帯を貫通するあらせ(ERG)の軌道

表 1 実験区の環境条件

| No. | 試料 | 状態 | 空気 | | 紫外線 | | 放射線 | | 備考 |
|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|----|
| | | | あり | なし | あり | なし | あり | なし | |
| 1 | 微生物 | 休眠 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 2 | 微生物 | 栄養 | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 3 | 植物 | 種子 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 4 | 植物 | 幼芽 | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 5 | 小動物 | 休眠 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 6 | 小動物 | 活動 | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 7 | 有機物 | 水あり | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 8 | 有機物 | 水なし | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |

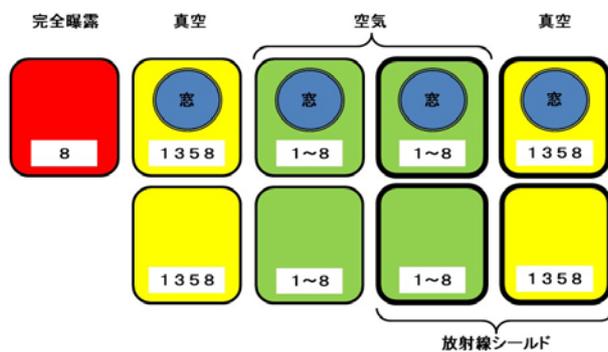


図 2 実験区概念図

曝露実験試料と実験区

曝露実験に用いる試料としては、微生物、植物、小動物、有機物を想定している。今までの生物曝露実験がほとんど孢子や休眠状態であったのに対し、今回は活動状態のものも実験できるようにしたい。曝露環境条件としては、空気、紫外線、放射線の有無について考える。空気の有無というのは与圧または真空中で、紫外線ありは MgF₂ の窓を設け、放射線なしは鉛の箱による遮蔽をそれぞれ考える。これらの実験区の環境条件を表 1 に、その概念図を図 2 にそれぞれ示す。図 2 のようにこれらの環境条件を満たす実験区は 9 種類に分けられることがわかる。

実験装置の設計仕様

まだ、具体的な議論はあまりできないので、おおよその実験装置の設計仕様を考える。温度はすべての実験区で制御可能とする。空気がある実験区では湿度も制御する。また、休眠中の影響を再生により確認するため、真空実験区でも締切・与圧後、給水可とする。窓材は短波長紫外線を透過する MgF₂ を使用する。そして、各実験区のビデオ画像、温度、湿度、光量、スペクトル、放射線量、紫外線量、加速度を測定し、テレメトリで地上送信する。これらの実験装置をペイロードに搭載するにあたり、前述の ERG の諸元が参考となるが、ERG の質量が 350kg であることを考えると十分であることがわかる。

インパクト重視の展開戦略

ここまで、ERG と同じ規模の衛星に実験装置を搭載することを前提に話を進めてきたが、これらを実現するためには衛星の基本設計から予算取り、広報活動を経て、運が良ければ採択、実行となる。仮に順調にいても、近年の科学衛星の大型化により順番待ちの列は長く、その実現は数十年後になるであろう。そこで、まずは改良型観測ロケット SS-520 を用いた超小型衛星により、前述の構想を凝縮させたコンパクトな生命科学実験を実行し、一般社会や JAXA に対してインパクトを与え、次世代につなげる戦略を考える。

観測ロケットと超小型衛星

SS-520 は 2 段式観測ロケットで、直径 520mm、打上げ時の質量 2,600kg で、140kg のペイロードを 800km の高度まで打上げる能力を持つ。さらに、小型の第 3 段ロケットを付け加えることによって地球周回軌道に超小型衛星を打上げることも可能である。そこで、この SS-520 を使って東京大学で開発された超小型衛星 TRICOM-1R (トリコムワンアール)³⁾ を打ち上げる予定がある。

TRICOM-1R は、地球を周回しながら地上端末から送られるデータを収集し、衛星が管制局上空に来た時にコマンドにより地上局にデータを転送する Store and Forward ミッション⁴⁾ や、搭載したカメラを用いた地球撮像ミッション、また、打上げ・軌道投入後ただちに自律的に地球撮像を実施して、地上との最初の通信で観測データを地上へ送る即時観測ミッションを行う。その諸元は、寸法 116mm×116mm×346mm (アンテナ以外)、質量 3kg、軌道は近地点 180km、遠地点 1,500km、軌道傾斜角 31 度の楕円軌道である。

衛星規模を考慮した生物曝露実験の見直し

この超小型衛星を参考にして、前述のヴァン・アレン帯における生物曝露実験を実行することを考える。TRICOM-1R の遠地点は、1,500km であるが、これではヴァン・アレン帯の内帯 (2,000~5,000km) にも届かないので、もう少し軽量化して 3kg の質量を 2kg まで減らすと、力学的考察から図 3 のような遠地点が 2,000km を超える軌道に変えることが可能になると思われる。これで、何とかヴァン・アレン帯をかすめる軌道に衛星を打ち上げることが可能となるが、衛星の質量は 2kg に制限され、大きさも TRICOM-1R と同じ 116mm×116mm×346mm 程度に収める必要がある。

そこで、曝露環境条件を見直す。まず、空気に関しては生物の活動状態を観察するため、与圧のみとする。次に、紫外線に関しては、窓を設けるスペースがないので、窓無しとする。さらに、放射線の関しては、鉛箱の使用は質量を増やすので、遮蔽無しとする。これらをすべて考慮すると実験区は一つだけになり、大きさや質量の制約をクリアすることができ、実現性が一段と高まる。

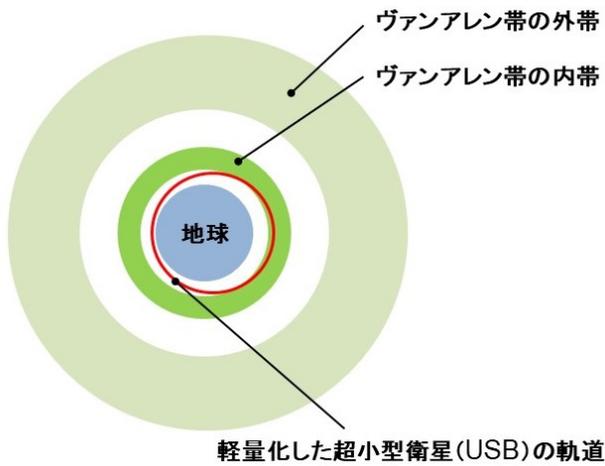


図3 軽量化した超小型衛星 (USB) の軌道

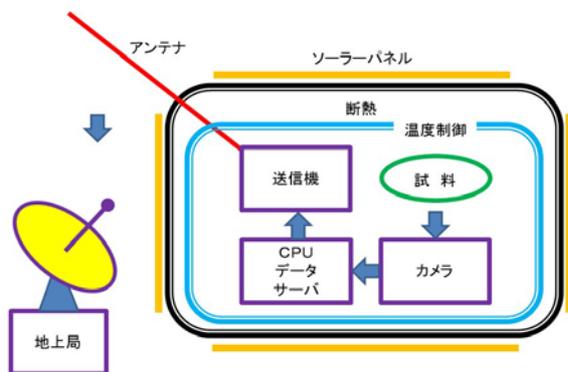


図4 USB の概念図

USB (Ultra-Small Bio-Satellite)

この生命科学実験を行う超小型衛星、および、このプロジェクトを下記のように呼ぶことにする。

和名：超小型バイオ実験衛星

英名：Ultra-Small Bio-Satellite

通称：USB

USB は、試料として植物や小動物等を用い、打ち上げ直前にレイトアクセスで給水し、実験を開始してから打ち上げる。軌道上では、植物が発芽して成長する様子や小動物が動き回る様子をビデオカメラで撮影し、データを蓄積、近地点で地上局へダウンロードする。この USB の概念図を図 4 に示す。可動部なしのシステムで、衛星の機能としては、参考にした超小型衛星 TRICOM-1R とほとんど変わらない。つまり、現存の技術ですべて可能な状態にある。

USB の展開戦略

この USB に関しても、3 段階の展開戦略を考える。

まず、1 号機は、可動部なし、既存の技術だけで手堅く臨む。失敗すると再開は困難なので、確実に成功する形で挑む。インパクト重視である。

次に、2 号機では、衛星をスピンさせて、人工重力を発生させ、1G コントロールを実現し、対照とする。仮に、回転半径 10cm の位置において 1.6rps で 1G の遠心力が得られる。この対照と比較することにより、微小重力の放射線被ばくへの影響を調べることができる。

さらに、3 号機では USB を回収型カプセルにして、地上回収し、より詳細な試料解析を可能にする。ここまでできると遺伝子解析等、かなり高度な解析が期待できる。

そして、これらのシリーズ実験により蓄積した技術やデータを次世代となる ERG 規模のバイオ衛星に生かす。

おわりに

ヴァン・アレン帯の中を周回する人工衛星の中で、植物が発芽して育ち、小動物が動き回る姿をビデオ画像でリアルタイムに観察する。この実験の科学的な成果はささやかであるとしても、一般社会や JAXA に与えるインパクトは大きい。このインパクトにより生物科学衛星による実験が軌道に乗れば、戦略としては大成功であろう。このように USB は戦略優先のプロジェクトであるが、将来的には新しい大きな宇宙科学成果をもたらすに違いない。

参考文献

- 1) Horneck, G., Klaus, D.M., and Mancinelli, R.L., Space microbiology, *Microbiol Mol Biol Rev* 74, 121–156 (2010).
- 2) Kawaguchi, Y., Yokobori, S., Hashimoto, H., Yano, H., Tabata, M., Kawai, H., and Yamagishi, A., Investigation of the Interplanetary Transfer of Microbes in the Tanpopo Mission at the Exposed Facility of the International Space Station, *ASTROBIOLOGY*, 16-5, ©Mary Ann Liebert, Inc. DOI: 10.1089/ast.2015.1415 (2016).
- 3) 青柳賢英, 松本健, 中須賀真一, 3U-CubeSat 「TRICOM-1」衛星バスの開発, 第61回 宇宙科学技術連合講演会講演集, 1118 (2017).
- 4) 松本健, 青柳賢英, 中須賀真一, 超小型衛星 TRICOM-1 における Store and Forward ミッション, 第61回 宇宙科学技術連合講演会講演集, 1K15 (2017).