

宇宙実験の遠隔化・自動化・自律化に向けて

村谷 匡史（筑波大）

Building remote, automated, and autonomous space experiments

Masafumi Muratani

University of Tsukuba., 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8575

E-Mail: muratani@md.tsukuba.ac.jp

Abstract: Laboratory automation introduced to multi-omics analysis allowed dramatic enhancement of accuracy and reproducibility in space life science. Recent advancements of robotics and artificial intelligence (AI) are expected to contribute to remote, automated and autonomous experiments. This article summarizes automated sample processing in JAXA space life science research. The lessons learned from maintaining the analysis platform provided useful insights on how to promote laboratory automation in low Earth orbit space stations and beyond.

Key words: Laboratory automation, multi-omics analysis, standardization, open science

1. はじめに

国際宇宙ステーションの船内環境は、長期宇宙滞在におけるヒトの生理的応答の理解や、地上では再現できない長期間にわたる安定した微小重力下での科学実験を可能にした。生命科学分野では、生体分子の網羅的測定による大規模データ収集とバイオインフォマティクス的手法を用いたマルチオミックス解析の導入が進められており、宇宙における様々な実験で得られたデータの統合解析を目指している。しかし実際には、実験条件間の差よりも、研究プロジェクト間の差が大きく、多数の宇宙実験を一つにまとめて効果的に再解析を行うことは難しい現状がある。このような状況は、異なる宇宙機関や研究プロジェクトから得られた結果をデータベース化した結果、認識されるようになったものであり、国際的な研究コミュニティとして宇宙実験の標準化の機運が高まっている。本項では、宇宙生命科学分野から見た、地上と宇宙の実験自動化、遠隔化、自律化について、これまでの取り組みと今後の展望を述べる。

2. 地上と宇宙の実験自動化

数年間隔で行われることも多い宇宙実験で、毎回同じ検体処理を行うことは実際に難しい。生き物の扱いに差が出ることは避けられないことは多く、対照群とテスト群の比較によって一つの実験は成り立つ。しかし、検体の前処理やオミックス測定での手技的な差があれば、異なる実験のデータを統合した解釈は困難になる。JAXA のマウス宇宙飼育研究では、複数のプロジェクト間で RNA シーケンス解析の試薬とデータ解析手法の継続性を確保し、さらに実験ロボットによる自動化を進めてきた[1]。これにより、2017年から2020年にかけて解析が行われた複数の宇宙と地上実験の結果を直接比較することができた (Fig. 1)。また、手作業とロボット作業で実質的に差が無い結果が得られていることから、検体処理プロトコルの開発など、これまで手作業で行われてきた実験との整合性も保たれている。オミックス検体の前処理は、マイク

ロピペットとプラスチック容器を用いた、液体のハンドリングが特徴的であり、定型操作を繰り返す作業の自動化であった。近年では産業用ロボットと AI を組み合わせた開発が急速に進んでおり、様々な科学実験作業の要素技術も開発されている。

宇宙分野はこれらの技術を応用するターゲット、パイオニアユーザーとして有利な条件を備えている。一つ目は、宇宙実験と自動化のコストのバランスである。実験自動化に関わる技術開発人材、ロボットの導入と維持には多くの費用が必要となるが、その導入判断を後押しするのが宇宙実験にかかる多大なコストである。これまでに宇宙で多くの生物学実験が行われてきたが、いざデータを再利用しようとしても品質が揃っておらず有効に活用できない事態が見られた。その反省から、いち早く検体前処理作業の自動化を完成させたことで、その後の科学的損失が回避されたとも言えるだろう。さらに、宇宙実験を念頭に進めていた実験自動化が、新型コロナウイルスのゲノム解析の際に活躍したことも、躊躇せず必要な研究基盤整備を進めておくことで回収できる機会があることを示した。将来的な月面での作業なども考慮して、必要性の説明しやすい宇宙分野が、他の生命科学分野を先導する形で

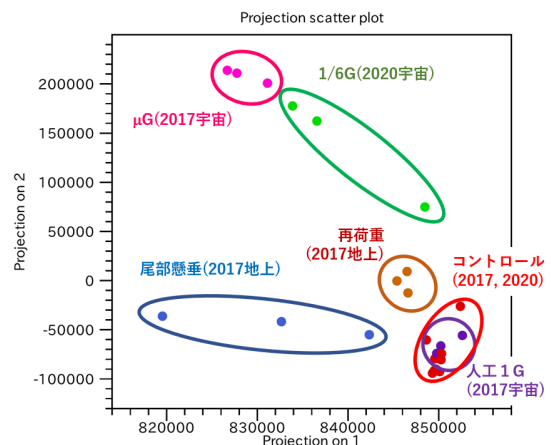


Fig.1 Principal Component Analysis plot of soleus muscle RNA-seq quantification [2].

研究の自動化、遠隔化、自律化を進めることが期待される。

二つ目は、比較的小さい研究コミュニティ規模と、JAXA を中心として取りまとめが行える連携構造である。宇宙研究は個別の研究グループや学会、企業が担えるものではなく、船内環境を利用した生命科学研究であれば、JAXA を通した国際宇宙ステーションへのアクセスが必要になる。この枠組みは、今後も宇宙実験の規格整備や検体のバンキング、研究計画の策定に重要であり、個々の研究者では導入が難しい自動化プラットフォームの仕様に関するコンセンサスをまとめやすいと考えられる。民間宇宙ステーションへの移行やゲートウェイ・月面の活用も視野に、宇宙環境利用の仕組みを議論する上でも宇宙での様々な作業の遠隔化、自動化、自律化は重要な要素である。このような意味で、JAXA が GEMPAK プログラム等を通して ISS における実験自動化を先導している状況は、地球低軌道での科学研究の推進のみならず、貴重なクルータイムの活用法の検討と宇宙環境利用の推進に大きなインパクトを持つ。

3. 研究インフラ整備と科学テーマの連動

軌道上での実験作業の遠隔化、自動化、自律化は宇宙研究の様々な制約の緩和やデータ品質の向上をもたらすと期待されるが、分野を挙げた大きな取組みとはなりにくい。その要因の一つとして、研究自動化の要素技術に関わる研究者と宇宙研究者のコミュニティの重なりが小さいことが挙げられる。ロボットや AI の開発に携わる研究開発人材は、もともと宇宙研究には関係しない人が大部分であろう。逆に、宇宙生命科学分野の研究者でロボット開発の高い専門性を持つ人も少ない。研究インフラ整備と科学テーマの連動が人材の交流や育成を促進するカギと思われる。

まず研究自動化に関わるロボットやソフトウェアの仕様策定では、実際に科学テーマに沿って実験を計画する立場からの要求と、技術的な可能性のすり合わせが必要になる。マルチオミックス測定では、最も幅広い実験要求に応えられる検体処理プロトコルを策定し、ロボットに実装する一方で、宇宙生命科学分野の研究者にも、特別な実験要求が無い場合はロボットに実装済みの「解析メニュー」からプロトコルを選ぶように働きかけることで、実験手法の標準化を進めている。ロボット実験の検証には大量のリアルな実験検体と消耗品費の供給が必要であり、自動化側はロボットなどの設備と自動化に関わる人材、科学テーマ研究者側は検体と試薬コストの負担を受け持つ仕組みを確立している。このような仕組みは、研究支援サービスでもあり、民間企業との連携により、ビジネスモデルの検証や人材育成とのカップリングによる継続性が高まる。研究開発事業としてのプラットフォーム整備とやや競合する面もあるが、各研究者の研究費からプラットフォーム利用料と消耗品費を支払うことで、市場性の無いサービスの淘汰による制御が効く利点がある。

4. オープンサイエンステーマ

上記の研究インフラ整備と科学テーマ研究の連動をさらに促進し、同時に成果を最大化するには、多くの研究者を巻き込む興味深い科学テーマの設定と研究の共有が重要である。筆者らは、GeneLab データベースに付随する研究者のコミュニティ、解析ワーキンググループを拠点に、生物の宇宙環境応答の背景にある意義やメカニズム、その知識の応用の可能性に、地球生命の進化の視点からアプローチするテーマ「Space, Adaptation and Evolution」を進めており、2024 年の米国のアストロバイオロジー会議「AbSciCon2024」において新しいセッションを立ち上げるに至った。この研究は、ヒト、動物から光合成生物を含む様々な実験系のマルチオミックスデータの共有を基盤としており、統合解析に必要な実験プロトコルの共有と自動化を同時に推進している。

深宇宙への有人探査に必要な宇宙医学研究分野でも、宇宙飛行士の生体サンプルのマルチオミックス測定と本人の iPS 細胞由来アッセイ系を比較する、「デジタルツイン」研究を提案し、JAXA フラグシップテーマとして採択後、国際共同研究チームでの取り組みを始めている。安定した幹細胞培養やオルガノイド形成には熟練した実験者の技術が必要とされており、ここでもロボットによる自動化を取り入れている。また、海外で行われる模擬宇宙線照射実験などでの細胞培養系の使用には、細胞培養の自動化や遠隔化が検討されており、これらは宇宙ステーションでの遠隔、自律実験の実現に向けた技術開発とそれを利用する研究者のマインドセットの準備にもつながる。

筆者は宇宙オミックス研究標準化の国際コンソーシアム「International Standards for Space Omics Processing (ISSOP)」の共同代表も務めており、地上と宇宙実験の自動化の推進を円滑に行うための活動を行っている [3]。民間宇宙ステーションへの移行に向けた環境整備に関係者のご協力を頂ければと思う。

参考文献

- 1) 宇宙生命科学におけるオミックス解析の標準化・自動化と国際連携; Rutter L, 村谷匡史, *医学のあゆみ* 279:623 (2021)
- 2) Hayashi T, Fujita R, Okada R et al.; Lunar gravity prevents skeletal muscle atrophy but not myofiber type shift in mice. *Commun Biol.* 6:424 (2023).
- 3) Rutter L, Barker R, Bezdán D et al.; A New Era for Space Life Science: International Standards for Space Omics Processing. *Patterns.* 1(9):100148 (2020).

利益相反開示

筑波大学のクロスアポイントメント制度により、LSI メディエンス社のシニアリサーチフェローを兼任しています。また、ロボティック・バイオロジー・インスティテュート社のリサーチアドバイザーを務めています。