（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和５年度　海外派遣研究員研究報告書

令和　６年　９月　２日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　理工学部　（理工学研究所）
資格・氏名　　准 教 授　　中　根　　昌　克

■本報告書の内容を公表することは，了承しております。
□本報告書の内容を公表することは，差し控えください。
※いずれかにチェックし（■）提出すること

令和　５年度海外派遣研究員（　長期　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　長　期
２　研 究 課 題

環境制御・生命維持システムの数値シミュレーションに関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦 2023 年９月 16 日　～　2024 年　９月　１日
４　派　遣　先　　アメリカ合衆国
５　研 究 目 的

宇宙居住の中で最も重要な要素である環境制御・生命維持システム（ECLSS）の最新の研究動向を探り、その問題解決を行う。特に生物処理による再生・循環技術を適用する上で問題となる事柄を、数値シミュレーションを通じて明らかにし、その解決方法を探る。利用する数値シミュレーションソフトウェアは、関連研究で広く使われているものを選定し、ECLSS の開発を行う他研究者・企業が利用できるモデルとすることに留意する。

（ 様式D－２ ）

6　研 究 概 要

① 研究の方法

環境制御・生命維持システム（Environmental Control & Life Support System; ECLSS）は宇宙など極限環境において人間が生存するために必須の技術である。この ECLSS 技術は既に国際宇宙ステーション等で実現されているが、地球からの補給にかなり依存している。今後向かうであろう火星以遠では、補給のコストから、系内物質を再生し循環させる必要がある。そのためには現在実用化されている物理化学的な処理のみならず、生物を用いた物質処理が重要になると考えられている。

私が訪問した University of Colorado at Boulder (CU Boulder)は ECLSS 技術に関して多くの研究が行われ、ECLSS 研究に関する最重要な研究拠点の 1 つであり、様々な情報が集まっていた。現地にて、以下のような研究を行った。

１．　様々な生物処理の方法の研究が行われており、その文献調査を行った。当初は空気再生と廃棄物処理の分野の調査を行う予定であったが、CU Boulder における世話人である Dr. James Nabity 准教授との相談の結果、植物を用いた空気再生の調査に注力することになった。

２．　上記の生物処理（食物栽培）を ECLSS 全体の物質循環数値シミュレーションモデルに適用し、問題点を探った。

② 渡航先での活動内容

項目 1 である文献調査に関しては、私が持っていた日本（青森県六ケ所村）で行われた実験をまとめた文献の他に、過去に NASA で行われた植物栽培実験および ESA（European Space Agency）で行われている The Micro-Ecological Life Support System Alternative（MELiSSA）プロジェクトで行われた植物栽培実験データおよびその数学モデル化の文献を調査した。また、過去の関連学会（International Conference on Environmental Systems; ICES）の文献を精密に調査することで、現状の ECLSS 技術の詳細を確認した。

項目 2 に関して Nabity 准教授との相談の結果、the Virtual Habitat（V-HAB）Simulation System を数値シミュレーションソフトウェアとして採用した。V-HAB はドイツの Technische Universität München で開発されたソフトウェアで、ECLSS の物理化学処理装置の挙動やクルーの代謝、その相互作用などを動的にシミュレートする、MATLAB®ベースのオブジェクト指向モデリングおよびシミュレーションツールであり、そのソースコードは公開されている。V-HAB は CU Boulder をはじめとして ECLSS 要素技術を開発している現場で使用され始めているが、システム全体をシミュレーションするツールとしてはまだあまり利用されていないため、システム全体への適用例としても新規性がある。

項目 2 に関して、「V-HAB のプログラムの理解」、「物理化学処理装置のみを用いた ECLSS 物質循環モデルの作成と V-HAB による実装」、「植物モデルの選定と V-HAB による実装」、「植物栽培を含む ECLSS 物質循環モデルの作成と V-HAB での実装」、「V-HAB による植物栽培開始時の問題点の明確化」である。

7　研究結果・成果

（１） 植物に関する実験や数学モデル、物理化学処理装置の現状

環境制御・生命維持システム(ECLSS)や生物処理の現状を把握するために、主に文献調査を行った。当初は生物処理全般にわたって調査を行う予定であったが、CU Boulder の James Nabity 准教授と相談の結果、生物処理に関しては植物栽培に絞って調査することになった。バイオマス生長のみを主眼とする一般的な植物生長のモデルと異なり、ECLSS システムで必要となる数学モデルは、酸素交換や二酸化炭素交換、蒸散や栄養分吸収など、全ての相互作用を追う必要がある(J. Cavazzoni 2004)。具体的に調査した文献は以下の通りである。

- T. Volk et al. 2015: "An Approach to Crop Modeling with the Energy Cascade," *Life Support & Biosphere Science*, pp. 119-127.
- T. Volk 1996: "Considerations in Miniaturizing Simplified Agro-ecosystems for Advanced Life Support," *Ecological Engineering*, Vol. 6, pp. 99 – 108.
- J. Cavazzoni 2004: "Using Explanatory Crop Models to Develop Simple Tools for Advanced Life Support System Studies," *Advance in Space Research*, pp. 1528–1538.
- G. Boscheri et al. 2012: "Modified Energy Cascade Model Adapted for a Multicrop Lunar Greenhouse Prototype," *Advance in Space Research*, pp. 941–951.
- L. Poulet et al. 2020: "Development of a mechanistic model of leaf surface gas exchange coupling mass and energy balances for life-support systems applications," *Acta Astronautica*, pp. 517–530.

他　多数

これらの文献のうち、T. Volk の文献群および Boscheri 2024 は NASA が宇宙開発ミッションを計画する際に利用する"Life Support Baseline Values and Assumptions Document" (BVAD, NASA TP-2015–218570)で使われている植物モデル The Modified Energy Cascade (MEC) model について説明している。このモデルは現在最も一般的に使われているモデルであり、蒸散量などに誤差が生じる条件もあるが、長期的な予測を立てる上では問題ないようである。

一方、L. Poulet et al. 2020 は、ESA が行っている MELiSSA (The Micro-Ecological Life Support System Alternative) プロジェクトの一環として行われた植物栽培とそのモデル化、検証実験に関する論文であり、L. Poulet 氏の博士論文により詳細に書かれている。このモデルはパラボリックフライトによる検証も行っており、現在最も信頼性の高いモデルといえる。一方で、モデル化の粒度が非常に細かく、葉面上の呼吸速度やその境界層の影響まで考慮しており、非常に計算コストが高い。そのため、長期的なシミュレーションを行う目的で利用することは極めて難しい。

（２） V-HAB を用いた物質循環シミュレーションモデルの作成と植物栽培の導入

文献調査と並行して、ECLSS シミュレーションで近年広く使われ始めている the Virtual Habitat（V-HAB）Simulation System の導入と解析、および V-HAB を利用した物質循環シミュレーションモデルの作成、計算を行った。ECLSS シミュレーションは個人レベルで作成しているものから、NASA の BioSim、日本の宇宙システム開発株式会社で開発されている SICLE などがある。それらの中で V-HAB は、近年、広く ECLSS 要素開発で利用されており、オープンソースであるため処理内容を理解することが可能であり、また CU Boulder の Nabity 准教授がその開発者と近しい関係にあることから、疑問点を解決しやすいために利用を決めた。

始めて利用するシミュレーションソフトウェアであるので、2 カ月程チュートリアルの試行およびコード内容の理解に費やした。その後、生化学量論（T. Volk and D. Rummel 1987）に基づく人間と植物の代謝モデルを作成した。この際、人間モデルは VBAD と比較することで較正し、植物モデルは Y. Tako et al. 2007 を加味したモデルとした。その後、物理化学処理装置のみで構成し、食料と水素を外部から補給する ECLSS 物質循環モデルと、植物栽培を行うことで外部からの補給を行わない ECLSS 物質循環モデルを作成した。そしてこれらのモデルを V-HAB 上に実装し、物質循環シミュレーションを行った。これらの結果、V-HAB でのシミュレーションが可能となった。またシミュレーション結果から、物理化学処理装置のみで構成された ECLSS から植物栽培を含む ECLSS への移行の時期に問題が発生することが明らかになった。これらの結果を M. Nakane and J. Nabity 2024 として 2024 年 7 月に行われた 2024 International Conference on Environmental Systems (ICES 2024), Advance Life Support System Control のセッションにて発表した。

今後の展開として、問題が発生した移行時期にどのような制御方針を立てることで問題を解消できるかを明らかにすることになった。また、その際に項目（１）で調査した植物モデルの適用も視野に入れることになった。

参照文献

- T. Volk and D. Rummel 1987: "Mass Balances for a Biological Life Support System Simulation Model," *Advance in Space Research*, pp. 141-148.
- Y. Tako et al. 2007: "Circulation of Water in Addition to CO_2, O_2 and Plant Biomass in an Artificial Ecosystem Comprised of Humans, Goats and Crops during Three 2-Weeks Closed Habitation Experiments Using CEEF," *SAE Technical Paper Series* 2007-01-3091.
- M. Nakane and J. Nabity 2024: "Effects of Transitioning to Physicochemical and Biological Hybrid System on ECLSS Material Circulation," ICES-2024-32.

以　　上