

(続紙 1)

京都大学	博士（総合学術）	氏名	市村 周一
論文題目	Development of Comprehensive Assessment Tools for Sustainable Human Space Habitation (サステナブルな有人宇宙居住に向けた包括的評価指標の開発)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、将来の有人宇宙活動における「持続可能な人間居住」を、物質循環・リサイクル率という定量的視点から再定義し、それを技術評価に統合する新たな評価枠組みを提示した研究である。特に、これまで暗黙的に扱われてきた「消耗品」「廃棄物」「再利用可能性」を、実際の輸送・運用実績に基づいて整理・算定し、それを評価指標として体系化している。 従来、宇宙開発分野ではTechnology Readiness Level（TRL）が技術成熟度評価の標準指標として広く用いられてきた。しかしTRLは、個別技術の開発段階を示す指標であり、その技術が人間の長期居住を支えうるか、また資源循環型社会を形成できるかといった観点を直接的に評価するものではない。とりわけ、有人宇宙活動において本質的な制約条件となる「地球からの物資補給頻度」「廃棄物処理の限界」「循環システムの維持コスト」といった要素は、従来の評価枠組みでは十分に可視化されてこなかった。 本研究はこの課題意識に基づき、国際宇宙ステーション（ISS）における長年の運用実績、とりわけ物質ごとのリサイクル率・補給量・廃棄量に着目し、現実の有人宇宙活動がどの程度「循環型社会」に近づいているのかを定量的に整理した。その上で、空気、水、食料、衣類、廃棄物といった各要素について、リサイクル率の向上が居住性・持続性に与える影響を分析している。 これらの分析を踏まえ、本論文ではSustainable-space-habitability Readiness Level（SRL）という新たな評価指標を提案している。論文は6章からなり、以下のとおりである。 第1章では、諸論として、現在の有人宇宙活動が地球からの補給に大きく依存して成立していることを整理し、従来のTechnology Readiness Level（TRL）を中心とした技術評価では、人間の長期居住の可否を十分に評価できないという問題意識を提示した。特に、技術成熟度が高くても、物質補給や廃棄に強く依存する場合、居住の持続性やQOLが制約されるという根本的課題を明確にしている。 第2章では、人間居住を成立させる要素を、生命維持機能に加えて、清潔さ、快適性、心理的安定といったQOLの観点から整理した。その結果、水や空気の循環は生命維持の観点では一定水準に達している一方で、洗濯や衣類管理、居住空間の維持といった日常生活要素はほとんど循環しておらず、これがQOL低下の主要因となることが明らかになった。ここから、人間居住の持続可能性は生命維持だけでは評価できないという認識が導かれた。 第3章では、こうした問題意識を踏まえ、国際宇宙ステーション（ISS）における長期間有人宇宙居住における過去の有人宇宙ミッションを評価するための基本的な考え方と評価枠組みを整理した。本章では、物質ごとのリサイクル率、補給依存度、ならびにQOLへの影響を評価軸として設定し、後続章で行う定量分析および評価のための理論的基盤を構築している。この段階では指標の完成形を提示するのではなく、評価構造そのものを明確化している点に特徴がある。 第4章では、ISSの実運用データを用いて、主要物質ごとのリサイクル率を定量的に算定した。その結果、水はおおむね80～90％程度、空気もそれに近い高い循環率を達成している一方で、洗濯物や衣類は実質的にリサイクル率がゼロであり、完全に地球			

からの補給に依存していることが明らかになった。また、これらの高リサイクル率を維持するためには、フィルター、吸着材、反応器部品などの交換・修理が不可欠であり、循環を支えるために大量のメンテナンス用ペイロードが必要であることが定量的に示された。すなわち、高い循環率は同時に新たな非循環物流を伴うという構造的トレードオフが明確になった。

第5章では、第4章の分析結果を踏まえ、評価枠組みを具体的な指標として統合し、Sustainable-space-habitability Readiness Level (SRL) を導入した。SRLを用いることで、TRLが高い技術であってもリサイクル率やQOLへの寄与が小さい場合、居住持続性への貢献は限定的であることが示された。一方で、洗濯や居住環境の維持、心理的快適性に関わる技術はTRLが中程度であっても、長期居住とQOLの観点から極めて重要であることが明らかとなった。

第6章では、本研究の成果を総括し、現在の有人宇宙活動は水や空気に関しては高い循環率を達成しているものの、生活物資やQOLを支える要素に関しては依然として「非循環型居住」に近い状態にあることを示した。以上より、持続可能な有人宇宙居住を実現するためには、生命維持系の循環に加え、日常生活とQOLを支える物質循環を評価・改善する枠組みが不可欠であるという結論に到達した。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、将来の人類の宇宙居住という未踏かつ高度に学際的な課題に対し、従来の技術中心的評価枠組みを根本から問い直し、物質循環およびリサイクル率という定量的・現実的視点を中核に据えた新たな評価概念と体系的枠組みの構築に関する研究成果がまとめられ、評価できる点は次のとおりである。

1. 本研究の学術的意義は、従来広く用いられてきた**Technology Readiness Level (TRL)**を中心とする技術成熟度評価が、人間の長期居住という観点では本質的な限界を有していることを、論理的かつ実証的に明らかにした点にある。TRLは個別技術の完成度を評価する上では有効であるが、物質補給や廃棄への依存度、さらには人間の生活の質への影響を評価する枠組みを持たない。本論文は、技術的に成熟していても、物質循環が不十分であれば居住の持続性は成立せず、月や火星を含む深宇宙での有人宇宙活動が不可能になる、という事実を、有人宇宙活動の実態に即して示しており、この点に明確な問題提起と独創性が認められる。
2. 本論文は、概念的議論にとどまらず、国際宇宙ステーション (ISS) の実運用データを用いて、物質ごとのリサイクル率を定量的に算定している点において、高い実証性を備えている。特に、水や空気といった生命維持に直結する物質については高いリサイクル率が達成されている一方で、洗濯物や衣類といった生活物資については実質的にリサイクル率がゼロであり、地球からの補給に完全に依存していることを明らかにした点は重要である。これは、有人宇宙活動が部分的には循環型でありながら、生活全体としては依然として非循環型であるという実態を初めて体系的に示した成果である。
3. 本研究は、物質循環の定量化にとどまらず、その循環構造が人間のQOLにどのような影響を及ぼしているかを評価対象に含めている点に特徴がある。清潔さ、快適性、心理的安定といった要素は、従来の宇宙工学的評価では周辺的に扱われがちであったが、本論文はこれらを人間居住の成立条件として正面から位置づけている。その結果、洗濯や居住環境の維持が循環していないことが、QOL低下の主要因となり得ることを明確に示しており、有人宇宙居住を人間中心の視点から再定義した点は高く評価できる。
4. 本論文は、物質循環とQOLという複数の評価軸を統合するための枠組みとして、後段において**Sustainable-space-habitability Readiness Level (SRL)**を導入している。SRLは、単なる新指標の提案ではなく、第3章で整理された評価構造と、第4章で得られた実証結果を踏まえて構築されており、理論と実データの接続が明確である。このように、分析結果から評価指標を立ち上げる構成は、博士論文に求められる方法論的成熟度を十分に満たしている。
5. SRLを用いた評価により、従来のTRL評価では見落とされてきた重要な知見が得られている。すなわち、TRLが高い技術であっても、リサイクル率やQOLへの寄与が小さい場合、居住持続性への貢献は限定的である一方、洗濯や居住環境の維持、心理的快適性に関わる技術は、TRLが中程度であっても長期居住にとって不可欠であることが示された。この結果は、将来の月・火星居住計

画における技術開発の優先順位を再考する必要性を示すものであり、学術的のみならず実践的意義も大きい。

6. 本研究は、工学、生命科学、環境科学、さらには人間工学や社会的側面を横断する総合的視点を有しており、総合学術（総合生存学）分野の博士論文として極めて適切な内容となっている。有人宇宙活動を単なる技術開発の延長ではなく、「人間が生き続ける環境」として捉え、その成立条件を定量的に評価した点は、本分野における基盤的貢献と位置づけられる。

以上のように、本論文は現在までに行われてきた有人宇宙活動について現実の輸送実績を元にリサイクル率を算定し、持続可能な宇宙開発を行う上で注目すべき技術を選定し、さらに、今後のプロジェクト評価において持続可能な宇宙開発を実現するための指標(SRL)を提案し従来指標と比較・評価したものであり、今後の宇宙開発、特に有人宇宙活動の継続の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（総合学術）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。