

3I07 日本独自の月面拠点を想定した 生命維持システムのトレードスタディ

宮嶋宏行 (東京女学館大)

Trade Studies of Life Support Systems for Japanese Lunar Outpost
Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key Words: Breakeven Point, Closed System, Equivalent System Mass (ESM), Open System

Abstract

I developed a life support sizing analysis tool to support Regenerative Life Support System (RLSS) design and studies. It consists of the mass balance and sizing models and can assist the engineer in performing RLSS preliminary design and trade studies combining different life support configurations and technologies. In this paper, I conducted trade studies comparing different life support systems for Japanese lunar outpost to consider impacts to cost, which is described as an Equivalent System Mass (ESM) using this tool.

1. はじめに

近年、世界各国で国際宇宙ステーション(ISS : International Space Station)に続く有人宇宙活動として月探査計画が注目を集めている。特に、生命維持システムの分野では米国の有人宇宙船(CEV : Crew Exploration Vehicle)の開発に続き、月面着陸機、月面拠点の生命維持システムの検討が始まっている。国際宇宙ステーションの設計以後、有人探査のシステムスタディの対象は有人火星探査ミッションが主流であったが、2004年の米国による新宇宙探査ビジョンの発表以降、有人月探査に関するシステムスタディが盛んに行われるようになった。その成果は、ESAS (Exploration Systems Architecture Study)¹⁾として2005年に発表され、現在CxP (Constellation Program)²⁾として有人月探査を含む有人宇宙探査計画が進められている。一方、欧州は、米国の新宇宙探査ビジョンよりも先にあった独自の惑星探査計画 AURORA計画の見直しを2005年に行っている³⁾。そして日本でも米国の新宇宙探査ビジョンの発表以後、有人月探査構想⁴⁾、月への有人輸送システム⁵⁾、HTV(HII Transfer Vehicle)の有人宇宙船化⁶⁾などが検討されている。

さて、生命維持システムのシステムスタディに目を向けた場合、数ヶ月程度の月探査では再生型生命維持システムがコスト面では不要であると考えられてきた。実際、ISSでは気体も水も未だ再生されていない。しかし最近では、再生型が供給型の質量コストを下回る損益分岐点が意外に早い時期になるという研究事例も見られるようになった。シャワー用水、食器洗浄水、洗濯用水の使用を想定した場合(36.11kg/

Crewmember-day(CM-d))には、損益分岐点は水再生9日目、CO₂の還元78日目になるとの報告もある⁷⁾。また、同じ報告ではシャワー用水、食器洗浄水を最小限しか使用しない場合(6.41kg/CM-d)には、損益分岐点は水再生93日目、CO₂還元223日目となっている。つまり期間や乗組員の生活方法によっては月面拠点でも再生型生命維持システムの導入が質量コスト面で有利になる。再生型生命維持システムの設計のためには様々な条件でのコンフィギュレーションや技術をシステム全体として検討することが必要である。そこで過去に開発した有人火星探査ミッション解析ツール⁸⁾を改良し再生型生命維持規模解析ツールを開発した。

本論文では日本の持つ輸送系の延長線上に考えられる有人月探査ミッションを想定し、そこで利用される再生型生命維持システムのコンフィギュレーションと技術の候補について示し、再生型生命維持規模解析ツールを用いた月面拠点生命維持システムの検討について報告する。

2. 生命維持システムの検討

2-1 ミッション概要

日本の持つ輸送系の延長線上に将来考えられる有人月探査ミッションが報告されている⁹⁾。これを参考に作成したミッション概要を図1に示す。貨物と乗組員は複数回に分けて打ち上げられ、地球周回軌道および月周回軌道でドッキングする方式を用いる。この方式によるミッション期間は、ドッキングのためのLEO滞在7日間、地球-月移動7日間(往復)、月滞在7日間~6ヶ月程度と設定する。乗組員は月

周回軌道までは3人、月面までは2人と設定する。このとき生命維持システムが関係するシステムは、コマンドモジュール(CM)、サービスモジュール(SM)、月面着陸機(LSAM)、月面拠点(LSS)である。

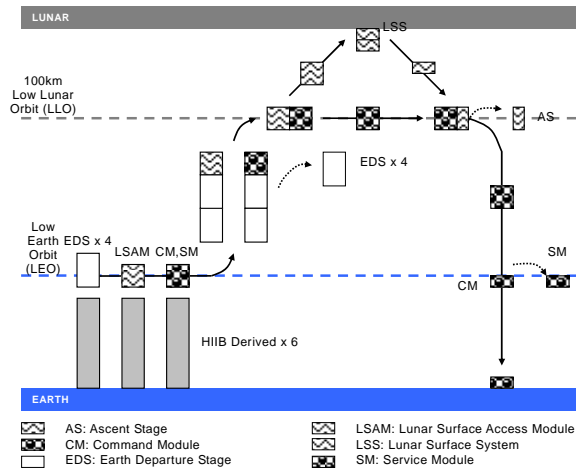


図1 ミッション概要

2-2 コンフィギュレーション

物質再生の点から生命維持システムのコンフィギュレーションを3つに分けて表1に整理する。Shuttle型はスペースシャトル、ISS型は国際宇宙ステーションに近いタイプである。閉鎖型はすべての物質を再生するタイプである。このうちコマンドモジュール、サービスモジュール、月面着陸機は Shuttle型をベースにして、月面拠点は ISS型をベースにして検討する。ただし、ISS型については計画にありながら実現していない気体や水の再生、および計画にない衣類の再生(洗濯)も含む。

2-3 技術

表1に示した機能を実現する技術を物質循環に係る部分のみ表2に示す。ただし、閉鎖型の技術の組み合わせは候補の一例でしかない。

表1 物質の再生に関するコンフィギュレーション

機能	供給・処理物質	Shuttle型	ISS型	閉鎖型
空気処理系	CO ₂ 処理	除去	除去・再生	除去・再生
	O ₂ 供給	供給	再生・生産	再生・生産
	N ₂ 供給	供給	供給	供給
水処理系	水供給	燃料電池	燃料電池・再生	再生
	排水処理	廃棄	再生	再生
廃棄物処理系	尿処理	貯蔵	再生	再生
	便処理	貯蔵	貯蔵	再生
食料系	食料供給	供給	供給	生産
居住系	衣類供給	供給	再生(洗濯)	再生(洗濯)

表2 機能ごとの利用技術

機能	サブ機能	Shuttle型	ISS型	閉鎖型
空気処理系	CO ₂ 除去	LiOH	4BMS	4BMS
	CO ₂ 還元	—	サバチエ	作物栽培
	微量有害物除去	活性炭、フィルタ	活性炭、フィルタ、酸化剤	活性炭、フィルタ、酸化剤
	空気貯蔵	N ₂ /低温 O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク
	空気供給	N ₂ /低温 O ₂ タンク	CO ₂ 還元、水電気分解	作物栽培
	温湿度制御	CHX	CHX、排水へ凝縮	CHX、排水へ凝縮
水処理	飲料水貯蔵	タンク	タンク	タンク
	水供給	タンク	タンク、水再生	作物栽培
	水精製	ヨウ素、MCV	ヨウ素	ヨウ素
	排水処理	放出	多重ろ過	多重ろ過
	排水貯蔵	タンク	タンク	タンク
廃棄物処理系	尿処理	排水タンクへ	VCD	湿式酸化
	便処理	便バッグ	便バッグ、乾燥圧縮	湿式酸化
食料系	食料生産	—	—	作物栽培
	食料供給	—	冷蔵/冷凍	冷蔵/冷凍
居住系	洗濯	—	洗濯	洗濯

4BMS: 4ベッドモレキュラシーブ, CHX: 凝縮熱交換, LiOH: 水酸化リチウム, MCV: 微生物チェックバルブ, VCD: 蒸気圧縮蒸留

3. 計算方法

システムの比較には等価システム質量(ESM : Equivalent System Mass)⁹⁾を用いる。ESM は生命維持システムのコストを式(1)のように質量、体積、電力、熱負荷、労働時間で表し、サブシステム $i=1$ から n まで合計して ESM を計算する。

$$ESM = \sum_{i=1}^n \left[(M_{li} \cdot SF_{li}) + (V_{li} \cdot V_{eqi}) + (P_i \cdot P_{eqi}) + (C_i \cdot C_{eqi}) + (CT_i \cdot D \cdot CT_{eqi}) + (M_{TDi} \cdot D \cdot SF_{TDi}) + (V_{TDi} \cdot D \cdot V_{eqi}) \right] \quad (1)$$

- M_{li} : サブシステム i の初期質量[kg]
- SF_{li} : サブシステム i の初期質量貯蔵係数[kg/kg]
- V_{li} : サブシステム i の初期体積[m³]
- V_{eqi} : サブシステム i の与圧体積質量等価係数[kg/m³]
- P_i : サブシステム i の必要電力[kW_e]
- P_{eqi} : サブシステム i の電力質量等価係数[kg/kW_e]
- C_i : サブシステム i の冷却要求[kW_{th}]
- C_{eqi} : サブシステム i の冷却質量等価係数[kg/kW_{th}]
- CT_i : サブシステム i の労働時間要求[CM-h/y]
- D : ミッション期間[y]
- CT_{eqi} : サブシステム i の労働時間質量等価係数[kg/CM-h]
- M_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量[kg/y]
- SF_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量貯蔵係数[kg/kg]
- V_{TDi} : サブシステム i の時間依存体積[m³]

それぞれのサブシステムの質量、体積、電力、熱負荷、労働時間を ISS の仕様データ¹⁰⁾を基にスケリング¹¹⁾により見積もる。

生命維持システムの規模推算と ESM の計算には再生型生命維持規模解析ツールを利用する。本ツールは Excel で作成され、図 2 に示すように基準要求データシート、基準技術データシート、コンフィギュレーションシート、マスバランスシート、結果表示シートの 5 つのスペッドシートからなる。

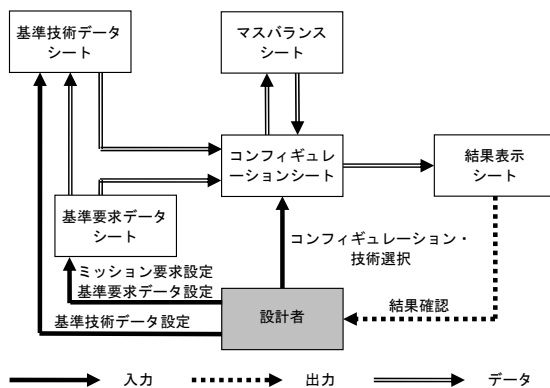


図 2 再生型生命維持規模解析ツールの構成

4. 計算結果

再生型生命維持規模解析ツールを利用した月面拠点の生命維持システムの検討結果を示す。人間の要求を表 3 に示すように設定し、人数を最大 3 人で計算した。月面拠点のサブシステムの基準技術を ISS 型に設定した生命維持システムを図 3 に示す。この構成について供給型(OPEN)、ISS 型(ISS)、ISS 型で空気再生を行わない(ISS A)、ISS 型で水再生を行わない(ISS W)、閉鎖型(CLOSED)の 5 つの場合について比較した。

閉鎖型では、食糧生産設備を Drysdale モデル¹²⁾により食糧自給率 100%の場合を推算した。そのときの前提は、乗組員あたりの供給エネルギー 2700kcal/CM-d、栽培面積 90m²/CM である。

表 3 人間の要求¹³⁾

要求項目	通常 kg/CM-d
酸素	0.84
食料 (固形)	0.62
食料 (水分)	1.15
調理用水	0.79
飲用水	1.62
手洗い用水	4.09
シャワー用水	2.72
トイレ洗浄水	0.49
洗濯用水	12.5
食器洗浄水	5.45
合計	30.27

図 4 に月面拠点生命維持システムの質量比較を示す。水再生の効果は大きく、空気再生の効果は水再生に比べて大きくないことがわかる。質量コストの面では本格的な食糧生産はミッション期間が 2 年以上の場合に必要となることがわかる。図 5 に月面拠点生命維持システムの ESM 比較を示す。体積、電力、熱負荷、労働時間まで考慮した ESM コストの面では本格的な食糧生産が難しいことがわかる。さらに、図 6 に 3 人が 180 日間月面拠点で活動した場合の ESM 配分を示す。括弧内の数字は物質の再生率である。OPEN 型では水の供給コストが大きく ISS 型の 2.8 倍、CLOSED 型では食糧供給コスト(食糧生産設備とその運用コスト)が大きく ISS 型の 25 倍、ISS A 型では CO₂還元装置が不要となったため 0.98 倍となった。ISS 型が ISS A 型の ESM を下回ったのは 221 日目であった。

5. まとめ

ISS 型のコンフィギュレーションと技術をベースに月面拠点生命維持システムについて検討した。ESM コストの面から見ると、180 日間のミッションでは、水再生のみを行う必要があり、221 日を越えて

はじめて空気の再生が必要になる。

現在、要素技術のデータは ISS のものを利用しているが、今後、日本独自の要素技術やコンフィギュレーションを取り入れたシステムスタディを行う予定である。

参考文献

- [1] NASA, NASA's Exploration Systems Architecture Study, NASA TM-2005-214062, 2005.
- [2] NASA, Constellation Architecture Requirements Document (CARD) Rev. B, CxP70000, 2008.
- [3] ESA, The Aurora Programme Europe's Framework for Space Exploration, esa bulletin 126, 2006.
- [4] 阿部貴宏、佐藤直樹、有人月探査構想と有人技術開発、第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.
- [5] 川端裕子、長瀬徹也、眞野元、月への有人輸送に関する構想検討、第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.
- [6] 今田高峰、佐々木宏、坂下哲也、HTV の有人宇宙船化の検討、第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.
- [7] H. Jones, Breakeven Mission Durations for Physicochemical Recycling to Replace Direct Supply Life Support, SAE Technical Paper Series 2007-01-3221, 2007.
- [8] 宮嶋宏行, Yas Takashima, 芦田章, 石川芳男, 有人火星探査ミッションにおける食糧生産とそのコスト評価, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2001.
- [9] A. J. Hanford, Advanced Life Support Research and Technology Development Metric – Fiscal Year 2002, 2003.
- [10] R. L. Carrasquillo, Summary of Resources for the International Space Station Environmental Control and Life Support System, SAE Technical Paper Series 972332, 1997.
- [11] H. Y. Yeh, et al., Advanced Life Support Sizing Analysis Tool (ALSSAT) Using Microsoft® Excel, SAE Technical Paper Series 2001-01-2304, 2001.
- [12] A. J. Hanford, Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, JSC47804, 2004.
- [13] P. O. Wieland, Designing for Human Presence in Space: An Introduction to Environmental Control and Life Support Systems, NASA RP-1324, 1994.

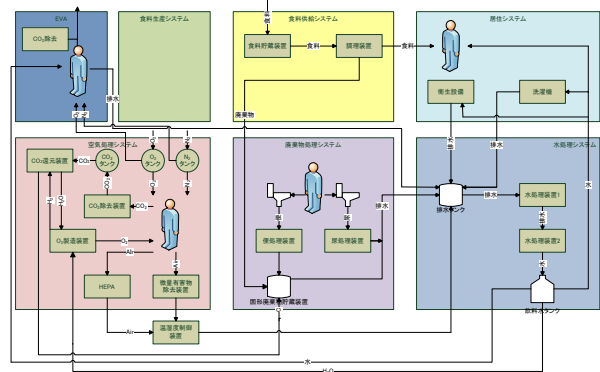


図3 月面拠点のISS型生命維持システム構成図

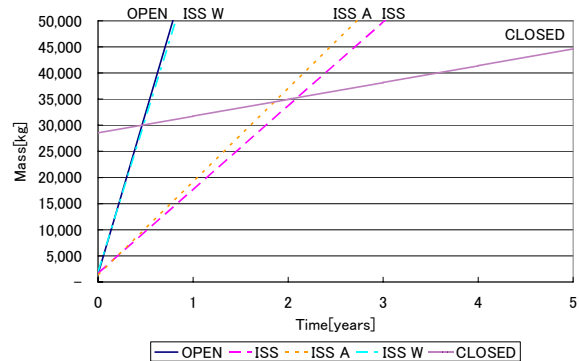


図4 月面拠点生命維持システムの質量比較

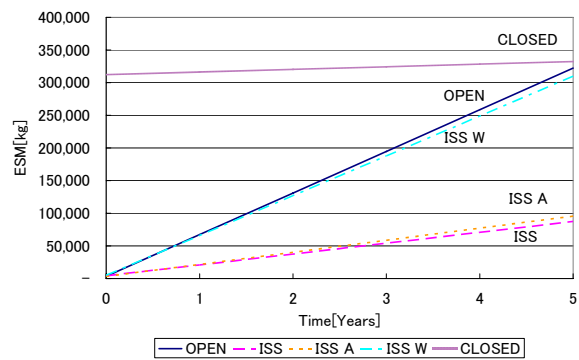


図5 月面拠点生命維持システムのESM比較

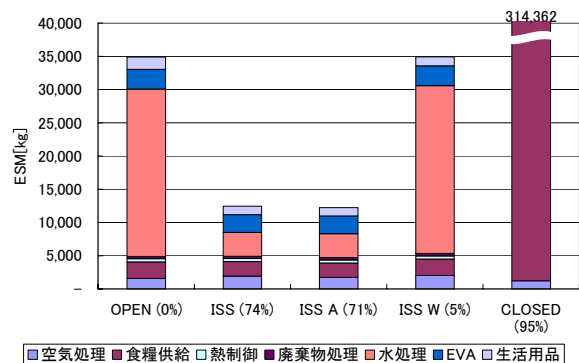


図6 3人が180日間月面拠点で活動した場合のESM配分