

3H00 先端生命維持システム (ALS) の概念設計に設計法ほど こまで貢献できるか

○宮嶋 宏行(東京女学館大)、石川 芳男(日大)

What we can contribute to the conceptual design of Advanced Life Support Systems (ALS) by using design methodology.

Hiroyuki Miyajima(Tokyo Jogakkan College) and Yoshio Ishikawa(Nihon University)

Key Words: Advanced Life Support Systems, Biostochiometry, Equivalent System Mass

Abstract

The preliminary design process for Advanced Life Support Systems (ALS) in manned space exploration is defined in 5 design steps: develop requirements for the life support system, identify technology options, define candidate configurations, determine system characteristics, and evaluate candidate configurations. We reviewed the design methodology for each step for the past 20 years, and we considered what we can contribute to designing the ALS in each step. As a result, we found that adequate methods for determining system characteristics and evaluating candidate configurations have been developed well, but developing requirements for the life support system, identifying technology options, and defining candidate configurations have not been developed well, so design methods and support tools which can support the 5 steps totally are needed.

1. 目的および背景

生命維持システムが有人宇宙探査のために開発された例は 1960 年代の VOSTOK, MERCURY, VOSKHOD, GEMINI, SOYUZ, APOLLO、1970 年代の SALYUT, SKYLAB、1980 年代の SPACE SHUTTLE, MIR、1990 年代の国際宇宙ステーションと少ない¹⁾。そしていま 2004 年に発表された米国の新宇宙政策により国際宇宙ステーションの次の計画として、月や火星への有人探査計画に注目が集まり、有人探査システム Crew Exploration Vehicle (CEV)の生命維持システムの検討が行われている。

この計画に先立つ 2000 年代初頭、米国の研究者の間では 1997 年に発表されたリファレンスミッション²⁾を基に有人火星探査のための先端生命維持システムの検討が行われていた。また同時期には日本の Closed Ecology Experiment Facilities (CEEF)や米国の Lunar-Mars Life Support Test Project (LMLSTP)といった長期居住実験のための地上実験施設が作られ様々な実験データの蓄積がなされた。なお CEEF では現在も居住実験が進行中である。

そこで本報告では先端生命維持システムの予備設計を 5つの段階に分け、過去 20 年間の設計法、設計ツール、設計事例、さらには地上実験施設での実験結果を踏まえ、設計法がそれぞれの設計過程で貢献

できることについて考察する。

2. 先端生命維持システムの設計プロセス

先行研究、予備設計、基本設計、詳細設計、開発と製造というプロジェクトのライフサイクルのうち、本報告では予備設計について取り上げる。まず先端生命維持システムの予備設計プロセス³⁾を図 1 に示し、それぞれの設計過程について整理する。

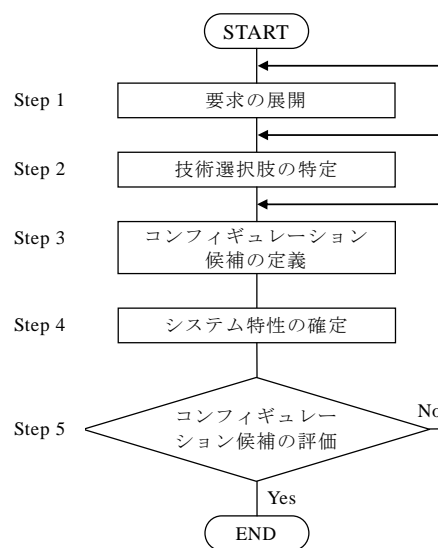


図 1 先端生命維持システムの予備設計プロセス

Step 1 では生命維持システムの最上位の機能を下位の機能に展開し、下位のそれぞれの機能の要求を特定する。一般的に生命維持システムは表 2 に示すように空気管理、水管理、廃棄物管理、食料管理の 4 つの機能に分けて考えられる。

Step 2 ではそれぞれの機能を実現する技術選択肢を物理化学的技術、生物学的再生技術に分けて特定する。表 2 に技術選択肢の一例を示す。

Step 3 ではミッションに最適な技術の組み合わせを決定する。どの技術を選択するのかはミッションの特性(乗員数、ミッション期間、キャビンリーク、補給可能性、利用できる電力、利用できる容積、輸送コスト、重力、汚染物、現地資源の利用)による。

Step 4 では物理特性(質量、容積)・運用特性(電力消費、熱負荷、乗員労働時間)を確定する。これらの特性を要素からシステムへ確定していく。サブシステム i の質量 M_{S_i} は式(1a)、サブシステム i の体積 V_{S_i} は式(2a)で表わせ、このときの生命維持システムの質量、生命維持システムの体積、生命維持システムの電力、生命維持システムの熱負荷、生命維持システムに関わる労働時間は式(1)~(5)で表わせる。

$$M_{LSS} = \sum_{i=1}^N M_{S_i} \quad (1)$$

$$M_{S_i} = M_{hw_i} + Mir_i + (Mcr_i + Mpe_i + Msp_i) \times Dm \quad (1a)$$

$$V_{LSS} = \sum_{i=1}^N V_{S_i} \quad (2)$$

$$V_{S_i} = V_{hw_i} + (Vcr_i + Vpe_i + Vsp_i) \times Is \quad (2a)$$

$$P_{LSS} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (3)$$

$$Th_{LSS} = \sum_{i=1}^N Th_i \quad (4)$$

$$Ct_{LSS} = \sum_{i=1}^N Ct_i \times Dm \quad (5)$$

- M_{LSS} : 生命維持システムの質量
- V_{LSS} : 生命維持システムの体積
- P_{LSS} : 生命維持システムの電力
- Th_{LSS} : 生命維持システムの熱負荷
- Ct_{LSS} : 生命維持システムに関わる労働時間
- M_{S_i} : サブシステム i の質量
- M_{hw_i} : サブシステム i のハードウェア質量
- Mir_i : サブシステム i の初期充填資源質量
- Mcr_i : サブシステム i の消費可能資源質量
- Mpe_i : サブシステム i の消耗品質量
- Msp_i : サブシステム i の交換部品質量
- V_{S_i} : サブシステム i の体積
- V_{hw_i} : サブシステム i のハードウェア体積
- Vcr_i : サブシステム i の消費可能資源体積
- Vpe_i : サブシステム i の消耗品体積
- Vsp_i : サブシステム i の交換部品体積
- P_i : サブシステム i の消費電力
- Th_i : サブシステム i の熱負荷
- Ct_i : サブシステム i に関わる労働時間
- Dm : ミッション期間
- Is : 補給間隔

Step 5 では Step 3 で定義されたコンフィギュレーション候補の物理特性・運用特性を評価する。評価は、非再生システムとの比較からスタートする。

表 2 先端生命維持システムの機能と技術選択肢の一例

機能		技術選択肢	
機能	サブ機能	物理化学的技術	生物学的再生技術
空気管理	圧力制御	バルブ	※
	温度・湿度制御	凝縮熱交換	※
	換気	ファン	※
	二酸化炭素除去	LiOH、4BMS、固体アミン	植物、藻類、バクテリア
	有害ガス処理	活性炭、触媒酸化	植物、バクテリア
	微粒子	HEPA フィルタ	※
	空気組成の監視	センサー、質量分光計	※
	酸素の供給	貯蔵、電気分解、CO ₂ 還元	植物、藻類
	窒素の供給	貯蔵	※
水管理	水準備	貯蔵、水処理、尿処理	バイオリアクタ、植物
	水質の監視	センサー	※
	水供給	配管	※
廃棄物管理	有機物処理	貯蔵、湿式酸化、燃焼	菌類、バクテリア
	無機物処理	貯蔵	※
食料管理	食料準備	貯蔵	植物、藻類、菌類
	食料処理	地上技術の改良	※

※生物学的再生技術では不可能

表3 予備設計プロセスの設計法と設計ツール

	設計法	設計ツール
Step 1	設計法なし、機能分析法 ^{4,5,6,7,8)}	—
Step 2	設計法なし	—
Step 3	設計法なし、設計経験則 ³⁾	—
Step 4	生化学量論 ^{9,10)}	G-189A ¹⁾ , CASE/A ¹⁾ , ECOSIM ¹⁾ , OCAM ^{12,13)} , Matlab/Simlink ¹⁴⁾ , WITNESS ¹⁵⁾
Step 5	等価システム質量(ESM) ^{16,17)}	ESAP ¹⁾ , LISSA ¹⁾ , BETS ¹⁾ , LSOP ¹⁾ , ESM Spreadsheet ¹⁸⁾

3. 先端生命維持システムの設計法

予備設計プロセスの設計法と設計ツールを表3に示す。

Step 1~3には十分に確立された設計法が存在しない。Step 1の要求の展開には機能分析法があり、設計ツールや設計事例^{4,5,6,7,8)}も少ないながら存在するが、この過程は設計者の経験や知識に大きく依存している。Step 2も同様に技術の開発や特定は設計者の経験や知識に大きく依存している。Step 3 コンフィギュレーション候補の定義には、設計法は存在しないが設計者が利用できる設計経験則³⁾が存在する。しかしながら、この設計経験則は定性的に大まかな傾向を示すのみで、ミッションの細かな条件の違いによるコンフィギュレーションの違いを比較するためには定量的な解析が必要になると考えられる。

Step 4,5には十分に確立された設計法が存在し、様々な設計ツールや設計事例が存在する。まず、Step 4で定量的な解析を可能にしているのが生化学量論^{9,10)}である。これにより物質収支解析や物質循環解析が可能になる。物質収支解析とは定常状態での解析であり、物質循環解析とはダイナミックシミュレーションによるシステムの運用までを考えた解析を意味する。過去には複数の設計ツールや設計事例^{11,12,13,14,15)}が報告されている。代表的な例には、米国のBIO-Plexを解析した事例¹⁴⁾や日本のCEEFを解析した事例¹⁵⁾がある。さらに、この方法に実験データを利用することでより詳細な解析が可能になる。

次に、Step 5で体積、電力、熱負荷、労働時間を等価システム質量に変換し定量的なトレードオフスタディを可能にしている方法がEquivalent System Mass (ESM)¹⁶⁾である。ESMは打ち上げコストに対する体積、電力、熱負荷、労働時間のそれぞれの重要度を表わしている。この結果は図2に示すようにミッション期間に対する累積等価システム質量のグラフとして表わされ、グラフの交差点は選択した技術によるコンフィギュレーション候補のコスト面での有利さの逆転を意味する。本方法は生命維持システムの評価に労働力を考慮した最初の方法である¹⁷⁾。

本方法は信頼性や保全性に関わる交換部品や作業時間が見積もりに含まれず、再生システムの解析に有利にできているという欠点は指摘されているが³⁾、有人宇宙探査の生命維持システムのトレードオフスタディができる有力な方法であり、NASAが生命維持システムを含む有人宇宙探査システムのコスト評価に用いている。ESMを用いた国内の検討事例には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の例¹⁸⁾がある。

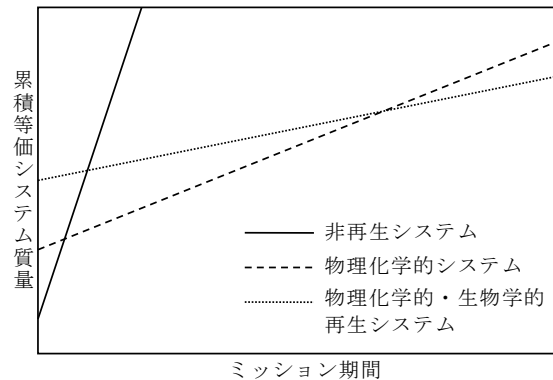


図2 ミッション期間と累積等価システム質量

4. まとめ

予備設計プロセスのStep 5 コンフィギュレーション候補の評価においてStep 3、もしくはStep 2、もしくはStep 1に戻る場合、Step 1~3には十分な設計法や設計ツールが存在せず、この過程は設計者の経験や知識によるところが大きい。Step 4,5には十分な設計法が確立されていることから、Step 5の設計法からStep 1~3での設計変更の指針を示唆する仕組みが必要と考えられる。

参考文献

- [1] Peter Fortescue and John Stark, Spacecraft Systems Engineering, John Wiley and Sons, 1995
- [2] Stephen J. Hoffman and David I. Kaplan, Human Exploration of Mars : The Reference Mission of the

- NASA Mars Exploration Study Team, 1997
- [3] Wiley J. Larson and Linda K. Pranke, Human Spaceflight: Mission Analysis and Design, McGraw-Hill Companies, 1999
- [4] Crew and Thermal Systems Division, Requirements Definition and Design Considerations, CTSD-ADV-245(REV A), 1998
- [5] Garry Zookin, Advanced Life Support Systems Analysis: Methodological Framework and Application Studies, SAE Technical Paper 932129, 1993
- [6] Edward A. Kurmazenko, et al., A System Approach for Design of Integrated Regenerative Life Support System: A Functions Analysis, SAE Technical Paper 941295, 1994
- [7] Edward A. Kurmazenko et al., A System Approach for Design of Integrated Regenerative Life Support System: A Formation of Alternatives and Synthesis of Technological Structures, SAE Technical Paper 941296, 1994
- [8] 宮嶋宏行, 柚原直弘, 概念設計過程の定式化に基づく再生型生命維持システムの概念設計支援ツールの開発, 日本航空宇宙学会論文集, 第 54 巻, 第 631 号, pp.327-336, 2006
- [9] Tyler Volk and John D. Rummel, Mass Balances for a Biological Life Support System Simulation Model, Adv. Space Res. Vol.7, No.4, pp.(4)141-(4)148, 1987
- [10] John D. Rummel and Tyler Volk, A Modular Bliss Simulation Model, Adv. Space Res. Vol.7, No.4, pp.(4)59-(4)67, 1987
- [11] M. Averner, An approach to the mathematical modeling of a controlled ecological life support system, NASA CR-166331, 1981
- [12] Alan Drysdale, Thomas, M. M., Fresa, M. C., and Wheeler, R. M. OCAM - A CELSS Modeling Tool : Description and Results, SAE Technical Paper Series 921241, 1992
- [13] Alan Drysdale, OCAM-2 : A Second Generation Bioregenerative Life Support System Model, SAE Technical Paper Series 972291, 1997
- [14] Cory K. Finn, Karen E. Meyers and Bruce Duffield, Dynamic Model of the BIO-Plex Air Revitalization System, SAE Technical Paper Series, 2001-01-2318, 2001
- [15] 宮嶋宏行, 石川芳男, 芦田章, 新田慶治, シミュレーションモデルの開発と CEEF 統合試験への適用, CELSS 学会誌 Vol.13, No.1, pp.1-11, 2000
- [16] Anthony J. Hanford, Advanced Life Support Research and Technology Development Metric -Fiscal Year 2005, NASA/CR-2006-213694, 2006
- [17] Alan Drasdale et al., CELSS Engineering Parameters, SAE Technical Paper Series, 932130, 1993
- [18] 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, 2004