

月面南極付近での広域有人探査のための生命維持システムの検討

A Study of Life Support System for High-Mobility Exploration at Lunar South Pole

宮嶋宏行 (東京女学館大)

Hiroyuki Miyajima

Tokyo Jogakkan College, 1105 Tsuruma, Machida, Tokyo 194-0004, Japan

E-mail : miyajima@m.tjk.ac.jp

ABSTRACT

This paper presents operations and systems analyses for a distributed life support system consisting of habitation module, logistics carrier and rovers for high-mobility exploration on the lunar surface. The logistics carrier and rovers leave the lunar outpost at the Shackleton crater and explore the foot of the Malapert and the Leibnitz Beta craters. In this example we solve an oxygen allocation problem using the two-dimensional Dynamic Programming method previously developed for distributed life support systems and calculate water and waste water allocation during the expedition. By the addition of lunar surface topography provided by the selenological and engineering explorer, the method is able to find the optimal access route for the logistics carrier in response to the rover need for supply.

Key words: Logistics Network, Dynamic Programming, SELENE, Laser Altimetry

1. はじめに

アポロ計画の教訓では、月面での移動が有人探査の効率を向上させる要であるとされている¹⁾。近年、発表されている有人月面探査計画では、クルーが月面拠点を中心に、その周辺を数百キロ程度の広域にわたって物資運搬装置やローバを利用して移動しながら探査することが計画されている。提案されている月面拠点は、居住モジュール、与圧ローバ、物資運搬装置、現地資源利用(ISRU)システム、船外活動(EVA)システムからなる。

月面拠点の生命維持システムや生命維持に必要な物資は一拠点ではなく、ある範囲に分散して利用される分散型生命維持システムである²⁾。このように分散している生命維持システムや物資が大規模になってくると、物資の運搬を行うロジスティクスネットワークの構築と運用が重要になる。不適切な運用が行われた場合には、月面全体では物資が満たされているが、ある地点では物資が不足する可能性がある。

この論文の目的は、広域での機動的な月面探査のために資源を供給する物資運搬装置の運用計画法と生命維持システムの構成を提案することである。月面南極のシャクルトンクレータからマルパート、ライプニッツベータに遠征する生命維持システムの設計と運用を、月周回衛星かぐや³⁾によって観測された月面高度データを利用して検討する。

2. 月面拠点のマスバランス

月面拠点のクルーの生命維持に関する入出力を Table 1 のように設定する。クルーを通過する水の収支を見ると、EVA なしの場合、入力 3.524kg に対して出力 3.869kg となり出力が 0.345kg 増加している。つまり、上水に対して排水の発生量は、1.079 倍になる。これは代謝に伴う水の発生分が加わるためである。

Table 1 クルー生命維持の入出力

Input kg/CM-day	EVA なし	EVA あり	Output kg/CM-day	EVA なし	EVA あり
Oxygen	0.835	0.974	Carbon dioxide	0.998	1.165
Food solids	0.617	0.720	Urine solids	0.059	0.069
Food rehydration water, and water in food	1.424	1.662	Feces solids	0.032	0.037
Drinking water	2.100	2.451	Sweat solids	0.018	0.021
			Respiration and perspiration	2.277	2.657
			Urine water	1.501	1.752
Hygiene water	0.560	0.560	Feces water	0.091	0.106
Urine flush water	0.300	0.300	Hygiene waste water	0.560	0.560
			Urine flush waste water	0.300	0.300
Total water for crew	3.524	4.113	Total water for crew	3.869	4.515
Total water	4.384	4.973	Total water	4.729	5.375
Total	5.836	6.667	Total	5.836	6.667

Table 2 には、0.998kg の CO₂ が発生した場合の CO₂ 還元と 0.835kg の O₂ を水より生産する場合の水収支を示す。CO₂ を回収する場合には、O₂ 生産による水の消費 0.939kg と CO₂ の還元による水の生産 0.817kg の差 0.123kg が水の減少分になるが、CO₂ を回収しない場合には、0.939kg が水の減少分になる。

Table 2 CO₂還元と O₂生産による水の収支

Input	kg/CM-day	Output	kg/CM-day
CO ₂	0.998	2H ₂ O	0.817
2H ₂	0.091	C	0.272
CO ₂ reduction total	1.089	CO ₂ reduction total	1.089
2H ₂ O	0.939	O ₂	0.835
		2H ₂	0.104
O ₂ generation total	0.939	O ₂ generation total	0.939

3. ラグランジュ分解調整法によるロジスティクスネットワークの定式化

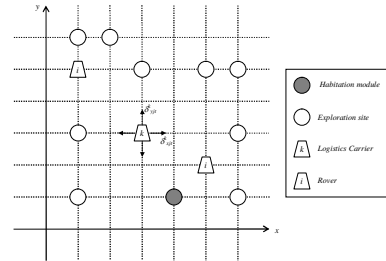


Fig. 1 ロジスティクスネットワークと移動モデル

Fig. 1 に示すように物資運搬装置やローバの移動モデルを直交座標系で以下のように定式化する²⁾。

$$\min l_k = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xjt}^k)^2 + (\delta_{yjt}^k)^2} \quad (1)$$

$$+ \sum_i h_i A_{ik} \sqrt{((dr_{xit} - d_{x0})/D_{xU})^2 + ((dr_{yit} - d_{y0})/D_{yU})^2} ((M_{Ui} - m_n)/M_{Ui})$$

$$+ h_k \sqrt{((dc_{xkt} - d_{x0})/D_{xU})^2 + ((dc_{ykt} - d_{y0})/D_{yU})^2} ((M_{Uk} - m_{kt})/M_{Uk})$$

$$+ \sum_{t=1}^T \lambda_t \sum_j \delta_{(x,y)jt}^k B_{(x,y)jk} + te \cdot G(dc_{xkt}, dc_{ykt})$$

$$\text{subject to } dc_{(x,y)kt+1} = dc_{(x,y)kt} + \delta_{(x,y)jt}^k \cdot v_{(x,y)jt}^k \quad \forall j, k, t \quad (2)$$

$$dc_{(x,y)kt} \geq D_{(x,y)L} \quad \forall k, t \quad (3)$$

$$dc_{(x,y)kt} \leq D_{(x,y)U} \quad \forall k, t \quad (4)$$

$$m_{t+1} = m_n + \Delta m_n \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$m_{k,t+1} = m_{kt} + \Delta m_{kt} \quad \forall k, t \quad (6)$$

$$\sum_j \delta_{(x,y)jt}^k B_{(x,y)jk} \leq 1 \quad \forall k, t \quad (7)$$

決定変数 δ_{xjt}^k と δ_{yjt}^k は、物資運搬装置 k の移動 j を x, y 軸方向

に時刻 t で行う動作 (-1: 後進, 0: 停止, 1: 前進) を示す。つまり物資運搬装置は、この2つの決定変数を組み合わせた9つの移動先(右、右上、上、左上、左、左下、下、右下、停止)を持つ。最適化する物資運搬装置 k の目的関数は、移動コスト、ローバ i の居住モジュールからの距離と物資充足率の積からなる補給コスト、物資運搬装置 k の居住モジュールからの距離と物資充足率の積からなる補給コスト、地形コストの4項の和で式(1)のように定義する。

4. 生命維持システムの設計と運用

本計算では、Fig. 2 の生命維持システムの酸素配分問題を式(1)-式(7)で定式化し、2変数動的計画法を用いて解き、水と排水の配分も計算する。

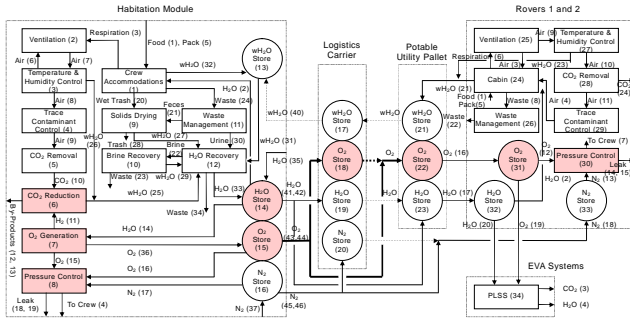


Fig. 2 月面拠点の生命維持システム

居住モジュールには6人滞在可能であり、そのうち4人がそれぞれ2人乗りと圧ローバ2台で同時に28日間の遠征を行う。それぞれの与圧ローバは2人分14日間の必要物資を輸送可能である。28日間の遠征の場合には、残りの2人分14日間の物資を物資運搬装置により供給する。

ローバ1と2に28日間の探査計画をそれぞれ与え、物資運搬装置の運用計画を求める。この計画では1台あたり96km x 56kmの範囲で400km程度を走行する。ローバ1は、拠点から時計回りにマルパート、ライプニッツベータを経由し拠点に戻る。ローバ2はその逆の経路をたどる。居住モジュールではCO₂と排水を回収し再生する。与圧ローバではCO₂を廃棄し、排水のみ回収後に居住モジュールに持ち帰る。このとき居住モジュールではO₂生産装置によりO₂の生産を行う。CO₂還元は、居住モジュールのみで行う。

5 計算結果

1日の計算は2ステップで行われ、計算の基本単位は、距離1/2[days]、物質質量1/2[CM-days]である。ここでは距離[days]の1単位を16kmに設定し、Table 1を基に酸素[CM-days]の1単位を0.974kg、水[CM-days]の1単位を4.973kg、排水の1単位を5.375kgに設定する。

移動経路

Fig. 3に28日間の運用におけるローバ1(R1)、2(R2)、物資運搬装置(Lc)のそれぞれの位置をxy座標で示す。ローバ1と2の経路は事前に与えられたものである。物資運搬装置の経路は本手法により求めたものである。ローバ1は最初にマルパート、次にライプニッツベータを訪問し、ローバ2は逆順に訪問する。計算の結果、物資運搬装置は時計回りに、高度の高低変化をなるべく避けながらローバへ接触している。

Fig. 4は本手法により計画された物資運搬装置の経路の高度変化を示している。実線は、地形情報を利用した場合、破線は地形情報を利用しない場合である。それぞれの高度の差は、2.3km、4.3kmで、本手法により山やクレータを避けた、高低差の小さい経路を選んでいることがわかる。

補給と回収の時刻

Fig. 3のxy座標表示では特定の時刻におけるそれぞれの位置関係が分かりにくいので、xy座標表示を時間-相対距離表示に変換したグラフをFig. 5に示す。(R1-Lc)はローバ1と物資運搬装置、(R2-Lc)はローバ2と物資運搬装置、(R1-Hm)はローバ1と居住モジュール、(R2-Hm)はローバ2と居住モジュール、(Lc-Hm)は物資運搬装置と居住モジュール、それぞれの相対距離を表し、その値が0のとき同じ位置にあることを示す。

物資運搬装置は、1、2、6、8日目にローバ1と、10日目から13日目までローバ2と、そして16日目に再びローバ1と同じ位置に存在し、21日目に居住モジュールに帰還している。また両方のローバは28日目に居住モジュールに帰還している。

居住モジュールの水貯蔵量の変動

Fig. 6は、排水を再生する(再生率90%)場合と再生しない場合の水貯蔵量の変化を示す。排水を再生しない場合、21日目に居住モジュールの水が枯渇している。物資運搬装置の運用において酸素と水の供給が重要であると同時に、居住モジュールの水が枯渇する前に排水を持ち帰ることも重要である。

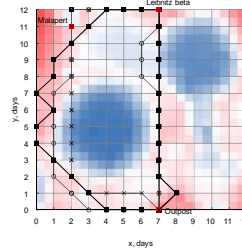


Fig. 3 ローバ1(R1)、ローバ2(R2)、物資運搬装置(Lc)の経路

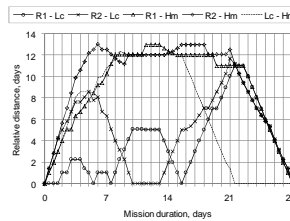


Fig. 5 ローバ1(R1)、ローバ2(R2)、物資運搬装置(Lc)、居住モジュール(Hm)の相対距離

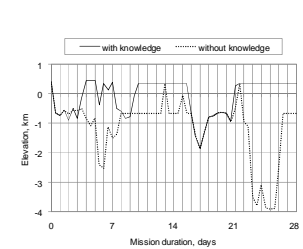


Fig. 4 物資運搬装置の経路の高度変化

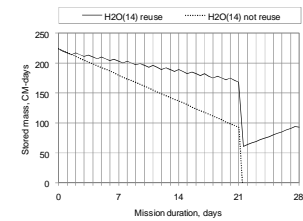


Fig. 6 排水を再生する場合と再生しない場合の居住モジュールの水貯蔵量の変化

6. まとめ

本研究では、ラグランジュ分解調整法を用いて月面広域移動探査における物資運搬装置の運用計画法を定式化した。月面南極のシャクルトンクレータからマルパート、ライプニッツベータに遠征する有人探査において、本手法は、物資運搬装置が、28日間にわたって月面の山やクレータを避けながら、所要の貯蔵能力の範囲内で、酸素と水を2台のローバへ供給し、排水を居住モジュールへ回収できる運用計画の作成に成功した。

参考文献

1. Bagdigian R. M., Challenges with Deploying and Integrating Environmental Control and Life Support Functions in a Lunar Architecture with High Degrees of Mobility, SAE Technical Paper 2009-01-2481, July 2009.
2. Miyajima H., A Logistics Analysis and Control of Distributed Life Support Systems for High-Mobility Exploration, AIAA 2011-5233, 41th International Conference on Environmental Systems, July 2011.
3. JAXA/SELENE Data Archive, URL: <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.en>.