

2D05 レーザ高度計データを利用した 月面移動探査のための生命維持設計の検討

宮嶋宏行 (東京女学館大学)

Life Support Architecture Study of High-Mobility Exploration on the Lunar Surface based on Laser Altimeter Data
Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key Words: Dynamic Programming, ECLSS, Lunar Electric Rover, SELENE, Terrain Map

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. In this example we solve an oxygen allocation problem using the two-dimensional Dynamic Programming method 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.

1. 目的および背景

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⁾。Lunar Scenario12.0²⁾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検討されている。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¹⁾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。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いながら、ある地点では物資が不足する可能性がある。

この研究の目的は、機動的な月面探査のために生命維持資源の供給と回収を行う物資運搬装置の運用計画と生命維持システムの構成を提案することである。運用法については、2変数動的計画法を提案し、物資運搬装置の運用期間と移動範囲に対するそのアルゴリズムの対応能力について数値計算により確認した³⁾。本論文では、シャクルトンクレータからマルパートに遠征する有人探査の生命維持システムの運用と設計を、月周回衛星かぐや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. ロジスティクスネットワークの定式化

本章では、図1に示すローバや物資運搬装置の移動モデルを定式化する。最適化する目的関数は、式(1)に示すように移動コスト、与圧ローバ*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、地形効果の4項の和と定義する。この定式化は、物資運搬装置利用の競合制約条件を持つが、ラグランジュ乗数 λ を用いて制約なし最適化問題に置き換えることができる。次に、この最適化問題を物資運搬装置別に分離

する。分離可能な元の最適化問題を解くことは、物資運搬装置*k*に関する式(1)~式(6)で表される部分問題を、それぞれ独立に最小化することと同じである。ここで l_k は部分問題*k*のラグランジュ関数である。

$$\begin{aligned} \min l_k = & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xj}^k)^2 + (\delta_{yj}^k)^2} \right. \\ & + \sum_i h_i A_{ik} \sqrt{((dr_{xi} - d_{ix})/D_{xi})^2 + ((dr_{yi} - d_{iy})/D_{yi})^2} \left. \right] ((M_{U1} - m_{U1})/M_{U1}) \\ & + h_k \sqrt{((dc_{xi} - d_{ix})/D_{xi})^2 + ((dc_{yi} - d_{iy})/D_{yi})^2} \left. \right] ((M_{Uk} - m_{Uk})/M_{Uk}) \\ & + te \cdot G(dc_{xi}, dc_{yi}) \left. \right] + \sum_{t=1}^T \sum_j \lambda_j \delta_{(x,y)j}^k B_{(x,y)j} \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

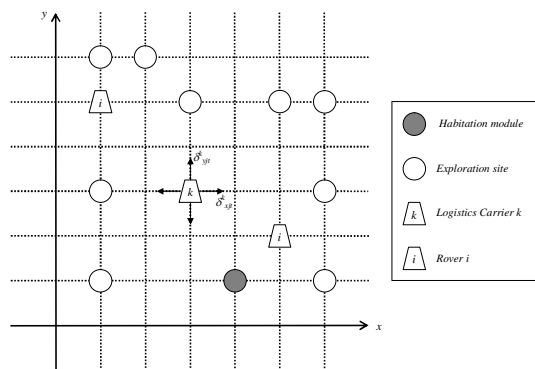


図1 ロジスティクスネットワークと移動モデル

決定変数 δ_{xj}^k と δ_{yj}^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。

c_k は物資運搬装置*k*の単位当たりの移動コスト、 h_i はロ

ーバ i の単位当たりの補給コスト、 h_k は物資運搬装置 k の単位当たりの補給コスト、 A_{ik} は与圧ローバ i と物資運搬装置 k の関係を示す 0-1 行列、 $dr_{(xy)i}$ は与圧ローバ i の位置、 $d_{(xy)h}$ は居住モジュールの位置、 $dc_{(xy)k}$ は物資運搬装置 k の位置、 $D_{(xy)U}$ は物資運搬装置の位置上限、 M_{Li} は与圧ローバ i の物資量上限、 m_{li} 、 Δm_{li} は与圧ローバ i の物資量と物資変化量、 M_{Uk} は物資運搬装置 k の物資量上限、 m_{lk} 、 Δm_{lk} は物資運搬装置 k の物資量と物資変化量をそれぞれ示す。 te は地形影響係数、 $G(dc_{xds}, dc_{ykd})$ は物質運搬装置 k が走行する地点の高度を示す。 $B_{(xy)jk}$ は移動 j と物資運搬装置 k の関係を示す 0-1 行列である。

制約条件は、物資運搬装置 k の位置 $dc_{(xy)k}$ に関する式(2)、物資運搬装置の位置の下限 $D_{(xy)L}$ と上限 $D_{(xy)U}$ に関する式(3)、式(4)、与圧ローバ i の時刻 t の物資量 m_{li} に関する式(5)、物資運搬装置 k の時刻 t の物資量 m_{lk} に関する式(6)からなる。

3 月面地形図の作成

月面南極付近の地形図を作成する。地図の作成には JAXA 月周回衛星かぐやのレーザー高度計データ⁴⁾を利用した。経度、緯度、高度のデータを、xyz の座標系に変換し、4km 四方の平均高度を計算し経路生成に用いる。図2はこのデータを MS-Excel で作図したものである。これは緯度-85deg~90deg、経度-90deg~90deg の範囲を示している。手前中心が南極付近、奥が地球方向、横に 300km、奥

行 150km 程度。平面部分は作図範囲外である。高度方向(Z)の長さは 20 倍程度に拡大されて作図されている。地図中にある 2 つの山は、左が Cabeus (84.9°S 35.5°W)、右が Malapert (84.9°S 12.9°E) である。

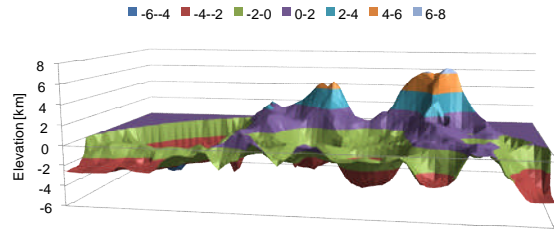


図2 月面南極付近の地形図

4. 物資運搬装置の運用計画

4.1 月面探査シナリオと生命維持システム

本計算では、物資運搬装置とローバはシャクルトンクレータにある月面拠点からケビウス、マラパートのクレータの麓を探査する。ラグランジュ分解調整法を用いて図3に示す月面基地の生命維持システムを定式化する。これを2変数動的計画法で解き、さらに水と排水の配分も計算する。物資運搬装置の運用スケジュールは、ローバの位置や補給の可能性を考えて計算される。

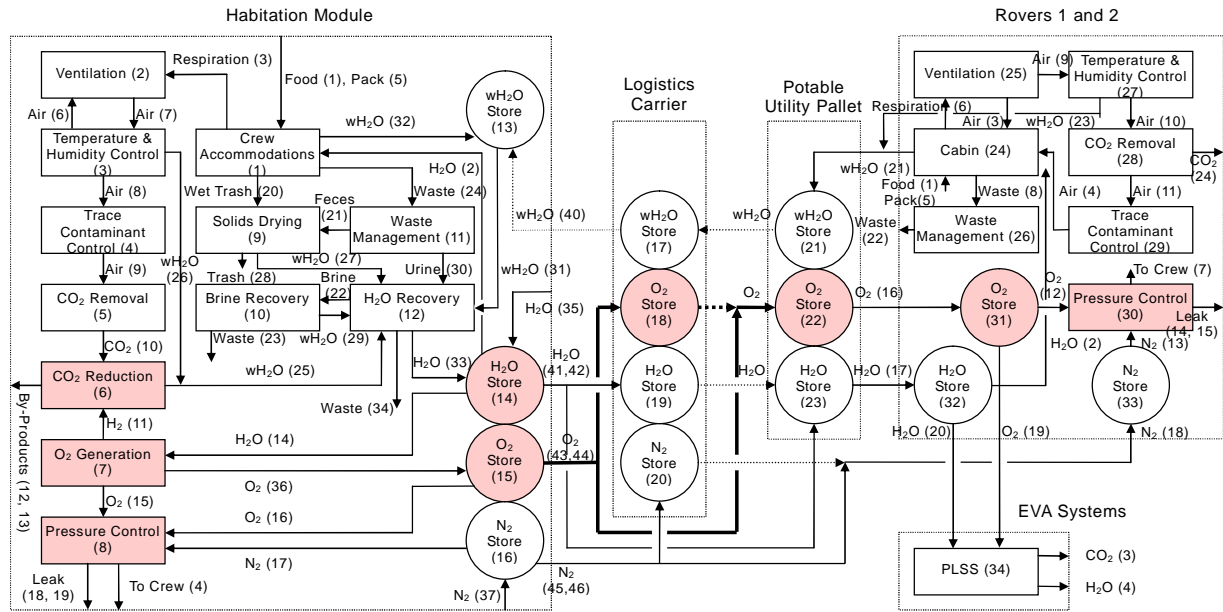


図3 月面基地の生命維持システム

4.2 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文献⁵⁾により表1のように設定する。クルーの体を通ず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。

表2には、CO₂還元とO₂生産の水収支を示す。EVA なしの場合、0.998kg のCO₂をCO₂還元する物質収支と、水より0.835kg のO₂を生産する物質収支を示している。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。

また EVA 実施時には、O₂や食料の必要量が5割増えたと仮定している。つまり8時間の活動を行った場合、EVAを実施しない場合よりも $1 \times 16/24 + 1.5 \times 8/24 = 1.167$ となり 16.7%代謝量が増加する。また EVA スーツの冷却水として再使用不可能な 2kg/CM-day の水を余分に消費する。

表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

表2 CO₂還元とO₂生産の水収支

Input kg/CM-day	EVA なし	EVA あり	Output kg/CM-day	EVA なし	EVA あり
CO ₂	0.998	1.165	2H ₂ O	0.817	0.953
2H ₂	0.091	0.106	C	0.272	0.318
CO ₂ reduction total	1.089	1.271	CO ₂ reduction total	1.089	1.271
2H ₂ O	0.939	1.096	O ₂	0.835	0.974
			2H ₂	0.104	0.122
O ₂ generation total	0.939	1.096	O ₂ generation total	0.939	1.096

4. 3 計算条件

表3に計算初期設定を示す。表3(a), (b)に示すように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人乗りと与圧ローバ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。このとき居住モジュールではO₂生産、CO₂還元を行うが、遠征中の与圧ローバでは両方とも行わない。

表3(c), (d)に示すように、与圧ローバ1と2に28日間(56ステップ)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。ここで位置を表す距離の単位[days]は4.5節で定義する。ローバ1は、拠点から時計回りにケビウス、マラバートを経由し拠点に戻る。ローバ2はその逆の経路をたどる。表3(e)に物資運搬装置の初期位置を示す。これは居住モジュールの位置である。居住モジュールではCO₂と水を回収し再生する。ローバではCO₂を廃棄するが、水を回収し居住モジュールに持ち帰る。このときの居住モジュール、物資運搬装置、ローバのO₂、水、排水の初期貯蔵量を表3(f) - (i)に示す。ローバ1と2は14日間補給なしで遠征を行うことができ、物資運搬装置の支援によりさらに探査期間を延ばすことができる。

次に、表3(j) - (l)に本計算における物資運搬装置の移動コスト、補給コスト、地形影響係数を示す。移動コスト c_k は頻りに走行や停止を繰り返すことを防ぐ役割を持ち、補給コスト h_i, h_k は拠点から離れた場所で物資の充足率が低い状態を回避する役割を持つ。地形影響係数は、物資運搬装置の走行位置の高度に対する重みを示す。

表3 計算初期設定

	設定	設定値
(a)	居住モジュールのクルー人数 N_{Mh} [人]	6
(b)	ローバのクルー人数 N_{Rb} [人]	2
(c)	ローバ1の位置 [days] $dr_{1x} = \{7, 6, 5, 4, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7\}$ $dr_{1y} = \{0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0\}$	(dr_{1x}, dr_{1y})
(d)	ローバ2の位置 [days] $dr_{2x} = \{7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ $dr_{2y} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 12, 11, 11, 11, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 1, 0\}$	(dr_{2x}, dr_{2y})
(e)	物資運搬装置の初期位置 [days]	(7,0)
(f)	居住モジュールのO ₂ 、水、排水貯蔵量 [CM-days]	112, 112, 0
(g)	物資運搬装置のO ₂ 、水、排水貯蔵量 [CM-days]	56, 56, 0
(h)	ローバ1のO ₂ 、水、排水貯蔵量 [CM-days]	32, 32, 0
(i)	ローバ2のO ₂ 、水、排水貯蔵量 [CM-days]	32, 32, 0
(j)	移動コスト c_k [-]	0.1
(k)	補給コスト h_i, h_k [-]	1
(l)	地形影響係数 te [-]	1.5

4. 4 生命維持システムの物質循環モデル

図3に示した月面拠点の生命維持システムの物質循環モデルを式(7)~(26)に示す。このうち式(24)から式(26)が居住モジュール、物資運搬装置、ローバ間の補給モデルである。物資の補給は、酸素、水、排水について居住モジュールから物資運搬装置 (sw_1, sw_6, sw_{11})へ、居住モジュールから与圧ローバ1 (sw_2, sw_7, sw_{12})、2 (sw_3, sw_8, sw_{13})へ、物資運搬装置から与圧ローバ1 (sw_4, sw_9, sw_{14})、2 (sw_5, sw_{10}, sw_{15})への5系統あり、それぞれが同一位置に存在するときに補給可能である。排水の回収、水の補給のタイミングも同様である。

居住モジュール

$$M_{M_{O_2}}(t+1) = M_{M_{O_2}}(t) + rO_{2M1}(t) - Ch_{O_2} \cdot N_{Mh} \quad (7)$$

$$Ta_{M_{O_2}}(t+1) = Ta_{M_{O_2}}(t) + pO_{2sa}(t) + pO_{2Ei}(t) - rO_{2M1}(t) - sw_1 - sw_2 - sw_3 \quad (8)$$

$$Ta_{M_{H_2O}}(t+1) = Ta_{M_{H_2O}}(t) + Ws(t) - rH_2O_{Ei}(t) - Wh(t) \cdot N_{Mh} - sw_6 - sw_7 - sw_8 \quad (9)$$

$$Ta_{M_{wH_2O}}(t+1) = Ta_{M_{wH_2O}}(t) + Wh(t) \cdot N_{Mh} - Wp(t) + sw_{11} + sw_{12} + sw_{13} \quad (10)$$

$$Sa_{M1}(t+1) = Sa_{M1}(t) - [pO_{2sa}(t) + pC_{sa}(t)] + Ch_{CO_2} \cdot N_{Mh} \quad (11)$$

$$El_{M1}(t+1) = El_{M1}(t) + [rH_2O_{Ei}(t) - pO_{2Ei}(t) - pH_{2Ei}(t)] \quad (12)$$

物資運搬装置

$$Ta_{L_{O_2}}(t+1) = Ta_{L_{O_2}}(t) + sw_1 - sw_4 - sw_5 \quad (13)$$

$$Ta_{L_{H_2O}}(t+1) = Ta_{L_{H_2O}}(t) + sw_6 - sw_9 - sw_{10} \quad (14)$$

$$Ta_{L_{wH_2O}}(t+1) = Ta_{L_{wH_2O}}(t) + sw_{11} - sw_{14} - sw_{15} \quad (15)$$

ローバ 1

$$M_{R1O2}(t+1) = M_{R1O2}(t) + rO_{2R1}(t) - Ch_{O2} \cdot N_{Rh} \quad (16)$$

$$Ta_{RH2O}(t+1) = Ta_{RH2O}(t) - rH_2O_{R1}(t) + sw_7 + sw_9 \quad (17)$$

$$Ta_{R1O2}(t+1) = Ta_{R1O2}(t) - rO_{2R1}(t) + sw_2 + sw_4 \quad (18)$$

$$Ta_{R1wH2O}(t+1) = Ta_{R1wH2O}(t) + rwH_2O_{R1} - sw_{12} - sw_{14} \quad (19)$$

ローバ 2

$$M_{R2O2}(t+1) = M_{R2O2}(t) + rO_{2R2}(t) - Ch_{O2} \cdot N_{Rh} \quad (20)$$

$$Ta_{R2H2O}(t+1) = Ta_{R2H2O}(t) - rH_2O_{R2}(t) + sw_8 + sw_{10} \quad (21)$$

$$Ta_{R2O2}(t+1) = Ta_{R2O2}(t) - rO_{2R2}(t) + sw_3 + sw_5 \quad (22)$$

$$Ta_{R2wH2O}(t+1) = Ta_{R2wH2O}(t) + rwH_2O_{R2}(t) - sw_{13} - sw_{15} \quad (23)$$

補給モデル

$$sw_{O2} = \begin{cases} \text{if}(dc_1 = 0) & sw_1 = Ta_{L1O2max} - Ta_{L1O2}(t) \\ \text{if}(dr_1 = 0) & sw_2 = Ta_{R1O2max} - Ta_{R1O2}(t) \\ \text{if}(dr_2 = 0) & sw_3 = Ta_{R2O2max} - Ta_{R2O2}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_1) & sw_4 = Ta_{R1O2max} - Ta_{R1O2}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_2) & sw_5 = Ta_{R2O2max} - Ta_{R2O2}(t) \end{cases} \quad (24)$$

$$sw_{H2O} = \begin{cases} \text{if}(dc_1 = 0) & sw_6 = Ta_{L1H2Omax} - Ta_{L1H2O}(t) \\ \text{if}(dr_1 = 0) & sw_7 = Ta_{R1H2Omax} - Ta_{R1H2O}(t) \\ \text{if}(dr_2 = 0) & sw_8 = Ta_{R2H2Omax} - Ta_{R2H2O}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_1) & sw_9 = Ta_{R1H2Omax} - Ta_{R1H2O}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_2) & sw_{10} = Ta_{R2H2Omax} - Ta_{R2H2O}(t) \end{cases} \quad (25)$$

$$sw_{wH2O} = \begin{cases} \text{if}(dc_1 = 0) & sw_{11} = Ta_{L1wH2O}(t) \\ \text{if}(dr_1 = 0) & sw_{12} = Ta_{R1wH2O}(t) \\ \text{if}(dr_2 = 0) & sw_{13} = Ta_{R2wH2O}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_1) & sw_{14} = Ta_{R1wH2O}(t) \\ \text{if}(dc_1 = dr_2) & sw_{15} = Ta_{R2wH2O}(t) \end{cases} \quad (26)$$

式(7)-式(12)の M_{MI02} 、 Ta_{MI02} 、 Ta_{MIH2O} 、 Ta_{MIwH2O} 、 Sa_{MI} 、 El_{MI} はそれぞれ居住モジュールの居住空間酸素量、 O_2 貯蔵量、水貯蔵量、排水貯蔵量、 CO_2 還元量、 O_2 生産量を示す。式(13)-式(15)の Ta_{L1O2} 、 Ta_{L1H2O} 、 Ta_{L1wH2O} は物資運搬装置の O_2 貯蔵量、水貯蔵量、排水貯蔵量を示す。式(16)-式(23)の M_{R1O2} 、 Ta_{R1H2O} 、 Ta_{R1O2} 、 Ta_{R1wH2O} 、 M_{R2O2} 、 Ta_{R2H2O} 、 Ta_{R2O2} 、 Ta_{R2wH2O} はそれぞれローバ1および2のキャビン酸素量、水貯蔵量、 O_2 貯蔵量、排水貯蔵量を示す。式(24)の sw_{O2} は酸素補給の切替とその量、式(25)の sw_{H2O} は水補給の切替とその量、式(26)の sw_{wH2O} は排水回収の切替とその量を示す。

これらの式で rO_{2MI} は居住モジュールの居住空間酸素補給量、 Ch_{O2} は人間酸素消費量、 N_{Rh} は居住モジュールのクルー人数、 pO_{2Si} は CO_2 還元装置の O_2 生産量、 pO_{2Ej} は O_2 生産装置の O_2 生産量、 Ws は外部からの水補給量、 rH_2O_{Ei} は O_2 生産装置の H_2O 消費量、 Wh は人間水消費量、 pC_{Si} は CO_2 還元装置の C 生産量、 Ch_{CO2} は人間二酸化炭素排出量、 pH_{2Ej} は O_2 生産装置の H_2 生産量、 rO_{2R1} 、 rH_2O_{R1} 、 rwH_2O_{R1} はローバ1のキャビン酸素補給量、水使用量、排水発生量、 rO_{2R2} 、 rH_2O_{R2} 、 rwH_2O_{R2} はローバ2のキャビン酸素補給量、水使用量、排水発生量、 N_{Rh} はローバのクルー人数を示す。

4. 5 計算結果

本計算では距離[days]の1単位を16km、酸素[CM-days]、水[CM-days]、排水の1単位をTable 1のEVAありを基に0.974kg、4.973kg、5.375kgに設定する。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。

移動軌跡

図4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。図4(a)、(b)はローバ1と2に事前に与えたケビウスとマラパート探査のための移動軌跡である。図4(c)、(d)は本手法により求めた物資運搬装置の軌跡、(c)が地形情報なし、(d)が地形情報ありの場合である。赤いセルは基準より高高度を表し、青いセルは基準より低高度を表す。ケビウスとマラパートの麓の探査位置座標は、それぞれ(2,11)、(7,12)である。ローバ1は最初にケビウス、次にマラパートに訪問し、ローバ2は逆順に訪問している。

図5は本手法により計画された物資運搬装置の移動経路の高度の変化を示している。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。それぞれの高度の最大高低差は2.3kmと4.3kmである。図4とあわせて考察すると、物資運搬装置がローバに物資を補給するための高低差の小さい経路を、本手法は求めていることがわかる。

補給と再生の時刻

図4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ため、地形情報ありの場合のxy座標表示を時間一相対距離表示に変換したグラフを図6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。

酸素と水貯蔵量の変化

図7は、物資運搬装置、ローバ1と2のそれぞれの酸素貯蔵量(18, 28, 42)の変化を示している。図6で物資運搬装置がローバと同じ位置に存在するときに物資運搬装置(18)からそれぞれのローバ1と2(28, 42)へ物資の補給が可能である。物資運搬装置は、1、2、6、8、16日目にローバ1に、10日目から13日目にローバ2に酸素を供給している。その後、21日目には次の供給のために物資運搬装置は居住モジュールで酸素を補充している。最終的に、遠征期間中に与圧ローバ1、2は O_2 貯蔵量が不足することなく運用されている。また、水貯蔵量の変化は、酸素と同じであり、物資運搬装置からローバへは酸素と同じときに水が供給されている。

排水貯蔵量の変化

図8は、物資運搬装置、ローバ1と2のそれぞれの排水貯蔵量(17, 31, 45)の変化を示す。排水は、ローバ1から物資運搬装置に1、2、6、8、16日目に回収され、ローバ2から物資運搬装置に10日目から13日目に回収される。物資運搬装置は、許容量の56CM-daysを超えることなく、21日目に排水を居住モジュールへ回収できている。結果として両方のローバの排水を捨てることなく再利用できている。

居住モジュールの物質質量の変化

図9(a)は、居住モジュールの排水(13)、水(14)、酸素(15)の貯蔵量の変化を示している。排水が水再生装置により処

理され、排水のレベルは 110CM-days 以下に維持されている。酸素は水から生産されるため、すぐに酸素の供給が 0 になることはない。しかし、水から酸素を生産するため、水の再生率が 90% であるため、水の貯蔵量は減少し、地球から定期的な補給が必要である。

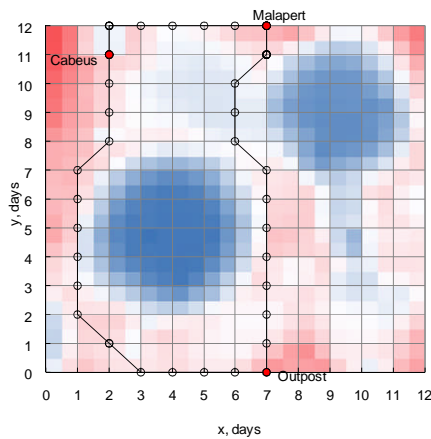
図 9 (b) は、排水を再生する場合と再生しない場合の水貯蔵量の変化を示す。排水を再生しない場合、21 日目に居住モジュールの水が枯渇している。酸素と水を供給するために物資運搬装置を運用することが重要であると同時に、居住モジュールの水が枯渇する前に排水を持ち帰ることも重要である。

5. おわりに

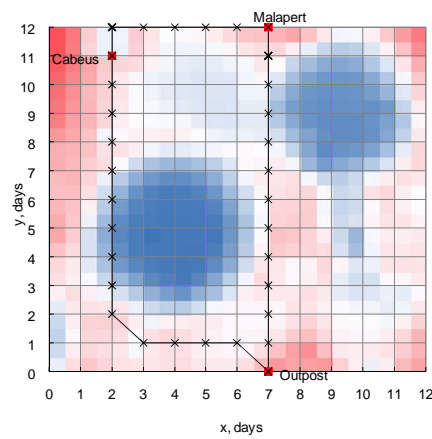
本研究では、ラグランジュ分解調整法を用いた、月面移動探査における物資運搬装置の運用計画法と生命維持システムの構成について検討した。運用法では、2 変数動的計画法を、物資運搬装置 1 台、ローバ 2 台からなる問題に適用し、シャクルトンクレータからケビウス、マラパートに遠征する有人探査において、28 日間にわたる物資運搬装置の運用計画作成に成功した。本計画は、月面の山やクレータを避けながら、所要の貯蔵能力の範囲内で酸素と水を 2 台のローバへ供給し、排水を居住モジュールへ回収できるものである。

参考文献

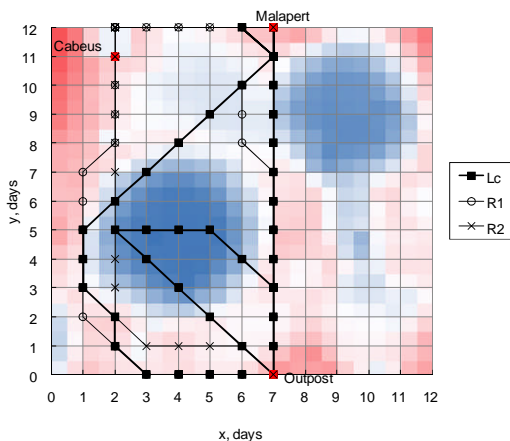
- 1) Bagdigian R. M., Challenges with Deploying and Integrating Environmental Control and Life Support Functions in a Lunar Architecture with High Degrees of Mobility, SAE Technical Paper 2009-01-2481, July 2009.
- 2) Kennedy K. J., Toups L. D., and Rudisill M., Constellation Architecture Team - Lunar Scenario 12.0 Habitation Overview, JSC-CN-19362, 2010, NASA Technical Report Server, [cited 10 August 2010].
- 3) 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.
- 4) JAXA/SELENE Data Archive, URL: <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.en> [cited 25 February 2012]
- 5) Hanford A. J., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA/CR-2004-208941, 2004.



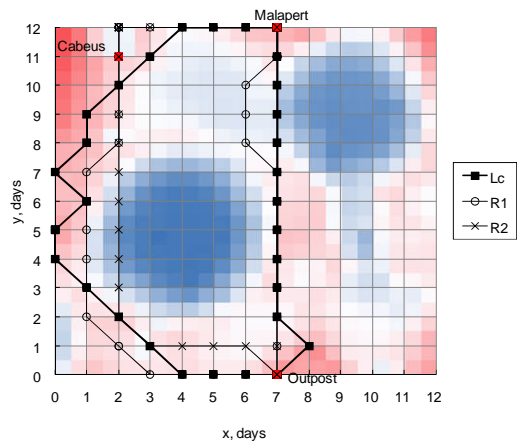
(a) ローバ 1 (R1) の軌跡



(b) ローバ (R2) の軌跡



(c) 地形情報がない場合の物資運搬装置 (Lc) の軌跡



(d) 地形情報がある場合の物資運搬装置 (Lc) の軌跡

図 4 ローバ 1 (R1), ローバ 2 (R2), 物資運搬装置 (Lc) の軌跡

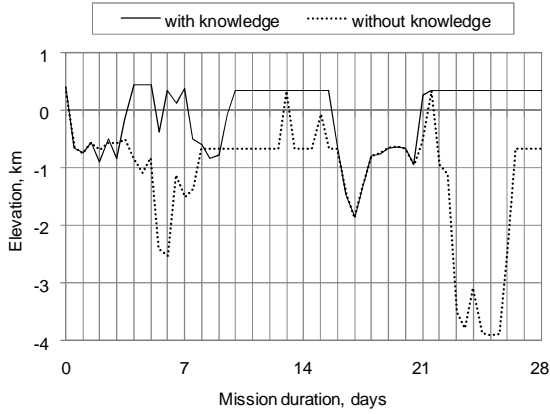


図5 物資運搬装置の高度変化

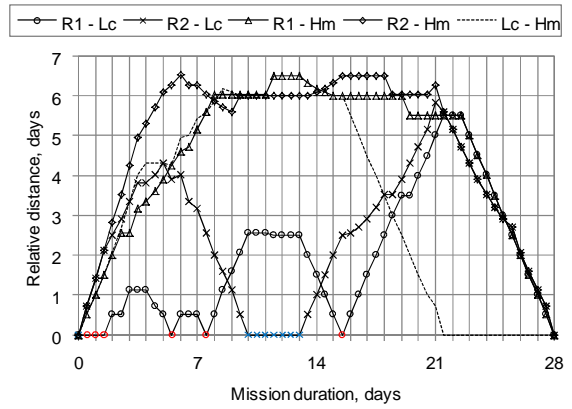


図6 ローバ1(R1), ローバ2(R2), 物資運搬装置(Lc), 居住モジュール(Hm)間の相対距離の変化

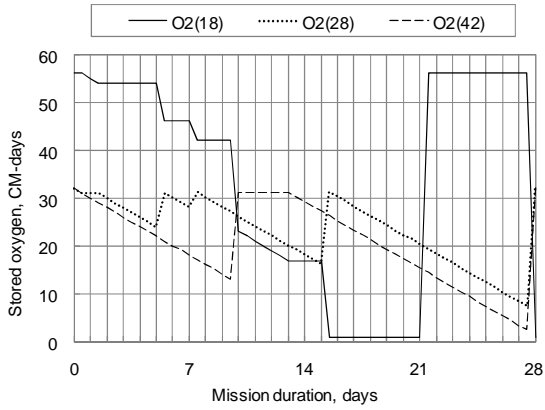


図7 物資運搬装置(18), ローバ1(28), ローバ2(42)の酸素貯蔵量の変化

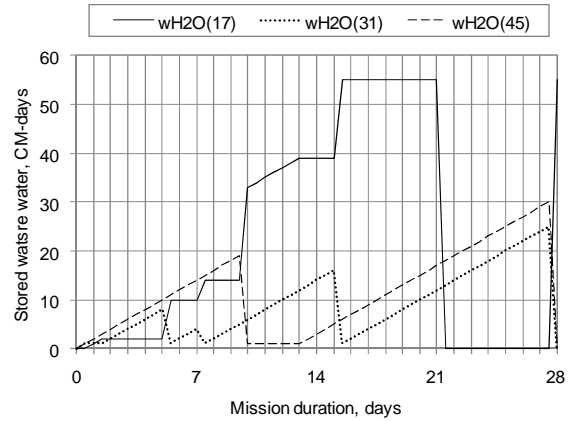
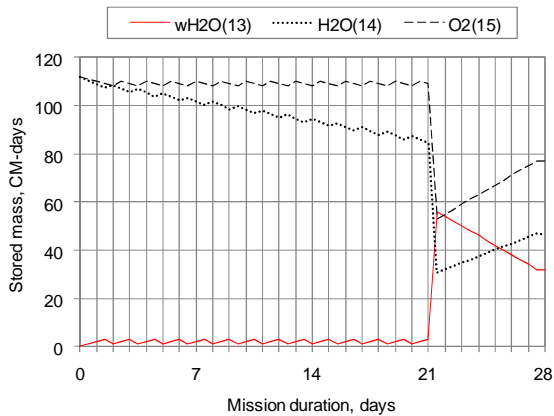
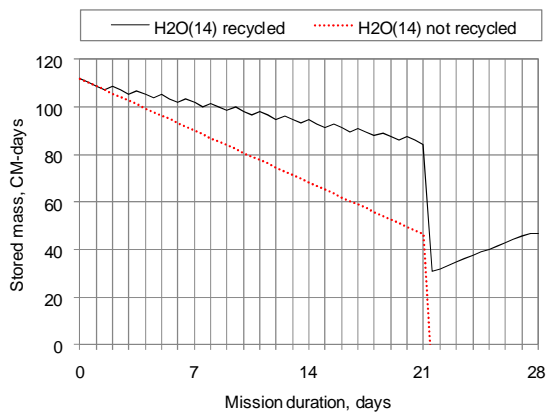


図8 物資運搬装置(17), ローバ1(31), ローバ2(45)の水貯蔵量の変化



(a) 排水を再生する場合の排水(13), 水(14), 酸素 (15)の貯蔵量変化



(b) 排水を再生する場合と再生しない場合の水貯蔵量の比較

図9 居住モジュールの貯蔵量の変化