

2K10 地形と日照周期を考慮した月面南極域移動探査の 生命維持システムの検討

宮嶋宏行（東京女学館大），○中根昌克（日大）

A Study of Life Support System for High-Mobility Exploration surrounding the Lunar South Pole
considering Terrain and Sunlight Sequence

Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College) and Masakatsu Nakane (Nihon University)

Key Words: Dijkstra Method, Extravehicular Activity, Laser Altimetry, Path Search

Abstract

This paper presents a formulation for a lunar surface excursion based on planetary extra vehicular activity parameters and constraints, and analyzes the supply and collection of resources for a life support system during a short excursion to Malapert and a long one to Schrödinger Basin. The effects of both batch and periodic supply and collection of resources were analyzed by means of a dynamic simulation model. The results indicated that periodic supply and collection can stabilize the mass changes of resources at the outpost. However, in a long-range excursion, periodic supply and collection could not adequately disperse the supplies and collections because the Portable Utility Pallet is restricted to daytime operation.

1. 緒言

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⁾。コンステレーションアーキテクチャチーム Lunar Scenario 12.0 では、月面拠点を中心に、その周辺を数百キロメートル程度の広域にわたって無人や有人の移動システムを利用する月面システムが検討された²⁾。そのシナリオの中で提案されている月面拠点は、移動システム（Lunar Electric Rover (LER)、ATHLETE）、居住システム、通信システム、電力システム、現地資源利用(ISRU)システム、ロジスティクス・部品、月面マニピュレータからなる。LER や ATHLETE を用いて月面拠点から遠征するとき、生命維持システム(LSS: Life Support System)や生命維持に必要な物資は分散した状態にあり、移動システムとともにそこに搭載されたLSSや物資も移動することになる。このように拠点から離れた場所で生命維持システムを運用する上では、物資の供給や回収方法（一括供給・回収、定期的供給・回収）の選択が重要になる。特に遠征の規模が大きくなったり、期間が長くなったりした場合には、一括供給は物資を事前に確保するため、一括回収は回収までに時間遅れが発生するため、月面システム全体の運用に影響

する。不適切な運用が行われた場合には、月面システム全体では物資が確保されいながら、月面拠点や遠征先で物資が不足する可能性がある³⁾。

本論文では、EVAに関するパラメータや制約条件の体系をもとに月面遠征探査を定式化し、月面での遠征における物資の供給と回収の移動時間の影響を考慮した月面システムLSSの検討を行う。月面システムの構成はLunar Scenario 12.0を参照した。具体的には、短期遠征としてマラパートの探査、長期遠征としてシュレディンガー盆地の探査のためのLSSについて検討する。

2. 月面システムの構成と遠征

2.1 月面システムの構成

月面システムの居住および生命維持に関わる部分は、Fig. 1に示すように与圧コアモジュール(PCM)、与圧ロジスティクスモジュール(PLM)、与圧遠征モジュール(PEM)、月面電気ローバ(LER)、携帯型多用途パレット(PUP)、船外活動システム(EVA)からなる。このうちPEM、LER、PUP、EVAは移動能力を有する。本検討で用いるこれらシステムの主要な諸元をTable 1に示す。

PCM、PLM、LERからなる拠点には4人滞在可能

で、2人乗り LER を2台利用して4人が同時に遠征できる。ただし緊急時には1台の LER に4人搭乗が可能である。それぞれの LER は2人分3日間（さらに緊急用に1日分を余分に貯蔵できる）の物資を貯蔵可能で、PUP を利用すれば14日まで必要物資を貯蔵可能である。

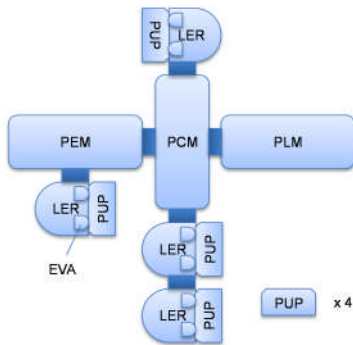


Fig. 1 月面システムの構成

Table 1 月面システムの主要諸元

Element	Qt	Specification
PCM	1	Volume: 55m ³ Capacity: 4 crewmembers Wet bath with sink: 1
PLM	1	Volume: 55m ³
PEM	1	Volume: 55m ³ , Capacity: 4 crewmembers O ₂ , water and waste water: 56 CM-day
LER	4	Volume: 12m ³ , Capacity: 2 crewmembers Suit ports on each LER: 2 Reduced hygiene: 1 O ₂ , water and waste water: 10 CM-day
PUP	8	O ₂ , water and waste water: 28CM-day
EVA	8	8 hours / cycle

2. 2 遠征探査の定式化

遠征探査を地上で模擬したプロジェクトにはホートンマーズプロジェクト (HMP: Haughton-Mars Project)、砂漠研究技術調査(D-RATS: Desert Research and Technology Studies)がある。HMP のロジスティクス研究では、惑星 EVA のパラメータと制約条件が Fig. 2 のようにまとめられた⁴⁾。

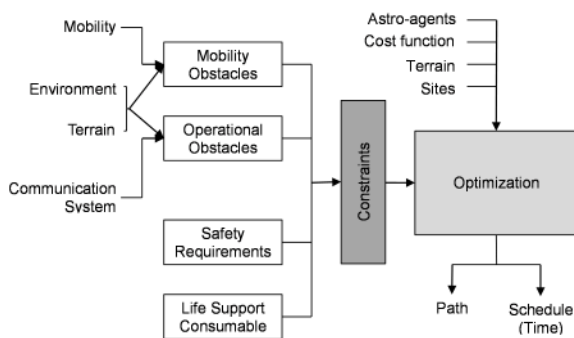


Fig. 2 惑星 EVA のパラメータと制約条件

サイト、地形、コスト関数、アストロエージェント(クルー、ロボット)が EVA を規定する入力パラメータとして定義され、移動、運用、安全性、生命維持の制約条件の下、経路とスケジュールを求める。

次に、この体系を基に具体的な遠征探査の経路とスケジュールの決定について示す。本定式化では、まず JAXA 月周回衛星かぐやのレーザ高度計データ⁵⁾を用いて月面地図を作成する。緯度、経度、高度のデータを、x 座標、y 座標、高度のデータに変換し、3つの情報を持った 2km 四方のセルからなる 2次元マップを作成する。セル間の座標を基に距離、高度を基に勾配を求め、これらを利用して最適探査経路を計算する。この探査経路問題をプラント設備設計で用いられるパイプルーティング問題を参考に定式化する。そしてダイクストラ法を用いてこの経路探索問題を解く。このとき月面地図の各セルには次のようなコスト関数を設定する。

$$\text{コスト} = \min(\text{勾配に関する重み} \times \text{勾配} + \text{終点までの直線距離 (始点と終点の距離で正規化)})$$

このコスト関数は、始点から終点までの距離と途中の勾配の大きさのトレードを意味する。もし、勾配に関する重みを 0 にすると、地形に関係なく始点から終点まで直線的に向かう経路が選択される。

3. 月面遠征探査の生命維持システムの検討

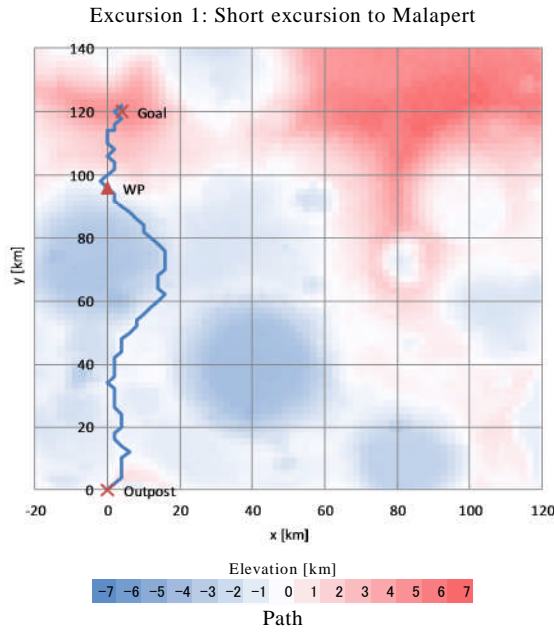
3. 1 遠征シナリオ

ここでは短期と長期の2つの遠征シナリオについて検討する。2つの遠征の出発位置は月面南極シャクルトンクレータの淵にある拠点である。短期の遠征1の目的地は、拠点から直線距離で約 120 km のマラパート山の頂上付近である。2. 2の計算方法で求めた経路、移動距離、高度変化を Fig. 3 左側に示す。長期の遠征2の目的地は、拠点から直線距離で約 450 km のシュレディンガー盆地中央付近である。同じ計算方法で求めた経路、移動距離、高度変化を Fig. 3 右側に示す。

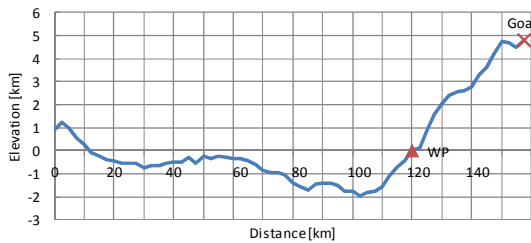
Fig. 3 に各遠征における遠征システムの形態と設定条件も示す。遠征1では、4人のクルーが、LER 2台と PUP 2台で、マラパート山頂付近に14日間遠征する。2日目に経由地で宿泊し、3日目に山頂に到達する。そのときすべての物資を LER の移動と同時に運ぶ。移動や探査活動はすべて昼の期間に完了する。遠征2では、4人のクルーが、PEM 1台、LER 2台と PUP 8台で、シュレディンガー盆地中央付近に68日間遠征する。経由地に6日間で到達し、そこで2日間の休憩を取る。経由地からはさらに4日間で

目的地に到達する。計算では物資をすべて LER と同時に運ぶ場合と、探査開始後に無人で定期的な供給および回収する場合について検討する。探査活動は

昼、夜、昼、夜、昼のサイクルで実施されるが、長距離の移動は昼のみに限定している。

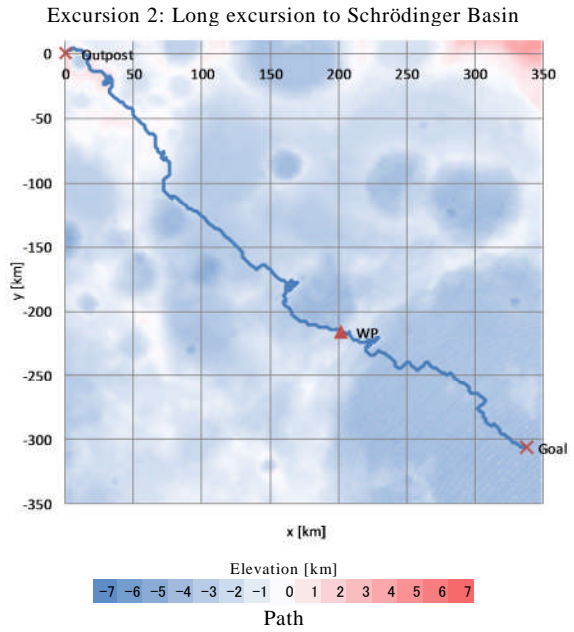


Outpost: Shackleton Crater (SC)
Destination: Malapert (MP)
Travel distance: 157 km

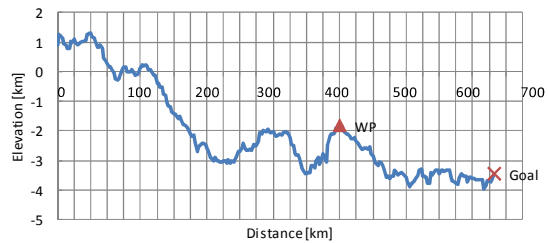


Elevation-change chart

Exploration system configuration and conditions
Number of crew: 4
Configuration: LER x 2, PUP x 2
Term: 14 day
Periodic supply and collection: no
Sunlight sequence: all daytime



Outpost: Shackleton Crater (SC)
Destination: Schrödinger Basin (SB)
Travel distance: 660 km



Elevation-change chart

Exploration system configuration and conditions
Number of crew: 4
Configuration: PEM x 1, LER x 2, PUP x 8
Term: 68 day
Periodic supply and collection: yes
Sunlight sequence: daytime, night, daytime, night, daytime

Fig. 3 短期と長期の遠征シナリオ

3. 2 マスバランス

月面システムに居住するクルーの生命維持に関する入出力を文献^{6,7)}により Table 2 のように設定する。ここで物質量の単位[kg/CM-day]は一人のクルーが1日に消費する量である。EVA なしの場合、5.836 kg/CM-day の入力と出力物質が発生する。また、PCM で十分な水を使用できる場合、シャワーと衣類の洗濯により水使用は 15.190 kg/CM-day 増加し、入出力は 21.026 kg/CM-day になる。

Table 3 には、CO₂還元と O₂生産の水収支を示す。EVA なしの場合、0.998 kg/CM-day の CO₂を CO₂還

元する物質収支と、水より 0.835 kg/CM-day 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 0.939 kg/CM-day と CO₂の還元による水の生産 0.817 kg/CM-day の差 0.122 kg/CM-day が水の減少分になるが、CO₂を回収しない場合には、0.939 kg/CM-day 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、 $1 \times 16/24 + 1.5 \times 8/24 = 1.167$ となり EVA を実施しない場合よりも 16.7%代謝量が増加する。

Table 2 クルー生命維持物質の入力と出力

Input kg/CM-day	Without EVA	With EVA	Output kg/CM-day	Without EVA	With EVA
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
			Feces water	0.091	0.106
Hygiene water	0.560	0.560	Hygiene waste water	0.560	0.560
Urine flush water	0.300	0.300	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
Sub Total	5.836	6.667	Sub Total	5.836	6.667
Shower water in PCM	2.72		Shower waste water in PCM	2.720	
Clothes wash water in PCM	12.47		Clothes wash waste water in PCM	12.470	
Total	21.026		Total	21.026	

Table 3 二酸化炭素還元と酸素生成の水バランス

Input kg/CM-day	Without EVA	With EVA	Output kg/CM-day	Without EVA	With EVA
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

3. 3 資源回収のオプション

PCM、LER、PEM のそれぞれのシステムで EVA を実施する場合と実施しない場合の6つのケースの物質再生率の計算を Table 4 に示す。Table 2 の人間の生命維持物質の入出力から計算した LSS 入力合計を 1 行目に示す。PCM の生命維持に必要な消費量は、基本消費量 5.836 kg/CM-day にシャワーと洗濯用の水を足した 21.026 kg/CM-day である。EVA 実施中の場合には、シャワーと洗濯用の水が不要になるが、EVA 用に 2 kg/CM-day の水を余分に消費するため、消費量は 8.667 kg/CM-day となる。EVA 実施中の LER、PEM も同じ消費量である。EVA を実施しないときの LER、PEM の消費量は、シャワーと洗濯用の水を含まない基本消費量 5.836 kg/CM-day に等しい。

次に、資源別の回収率の設定を 2 行目から 6 行目に示す。EVA 実施中は PCM、LER、PEM ですべての資源を回収しない。EVA を実施しない場合には、PCM での CO₂、蒸散水、排水、尿、その他の水の回収率をそれぞれ 100%、100%、98%、85%、0% に設定した。LER では蒸散水、排水のみを回収し、回収率をそれぞれ 100%、98% に設定した。PEM での資源回収率は PCM と同じ値に設定した。このときの 6 つのケースの再補給量を 8 行目から 12 行目に示す。7 行目は Table 3 に示すように CO₂ から水を生成し、最終的に O₂ を生成するための水の量、そのとき不足

する O₂ 量を 8 行目に示している。13 行目には再補給量の合計を示す。14 行目で再生率と定義しているのは、1 行目の消費量に対する 13 行目の再補給量の割合を 100% から引いた数字である。

遠征 1 と 2 で考えられる 3 つのサブシステムの資源回収の組み合わせを Table 5 に示す。LER、PEM、PCM の CO₂ と排水の回収の有無の 7 つの組み合わせについて、Table 4 の結果を基に再生率を計算する。仮に、2 名のクルーが 1 日 8 時間、週 2 日間 EVA 作業を行ったとすると、全体の再生率は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{全体の再生率} \\
 & = (1 \text{ 列目再生率} \times ((16 \cdot 2 + 24 \cdot 5) / (24 \cdot 7)) + 2 \text{ 列目再生率} \\
 & \quad \times ((8 \cdot 2) / (24 \cdot 7))) \times \text{PCM 滞在日数} / \text{遠征日数} \\
 & \quad + (3 \text{ 列目再生率} \times ((16 \cdot 2 + 24 \cdot 5) / (24 \cdot 7)) + 4 \text{ 列目再生率} \\
 & \quad \times ((8 \cdot 2) / (24 \cdot 7))) \times \text{LER 滞在時間} / \text{遠征日数} \\
 & \quad + (5 \text{ 列目再生率} \times ((16 \cdot 2 + 24 \cdot 5) / (24 \cdot 7)) + 6 \text{ 列目再生率} \\
 & \quad \times ((8 \cdot 2) / (24 \cdot 7))) \times \text{PEM 滞在時間} / \text{遠征日数}
 \end{aligned}$$

組み合わせオプション 1~7 のシステム全体の再生率は、Table 5 に示すように遠征 1 で 85.4%、84.5%、81.6%、81.0%、19.7%、遠征 2 で 83.2%、81.8%、79.0%、77.0%、76.0%、73.8%、32.5% である。遠征中の LER での CO₂ と排水の回収の再生率への寄与は 68 日間の遠征で 1 列目と 2 列目を比較して 1.4% (= 83.2% - 81.8%)、4 列目と 5 列目を比較して 1.0% (= 77.0% - 76.0%) である。遠征中の PEM での CO₂ と排水の回収の再生率への寄与は 68 日間の遠征で 2 列目と 3 列目を比較して 2.8% (= 81.8% - 79.0%)、5 列目と 6 列目を比較して 2.2% (= 76.0% - 73.8%) である。LER での CO₂ 再生の効果 1.4% は PEM での再生の効果 2.8% より小さい。よって次の移動時間の影響解析では Table 5 のオプション 2 に焦点を当てる。

Table 4 探査システムの物質再生率

	PCM without EVA	PCM with EVA	LER without EVA	LER with EVA	PEM without EVA	PEM with EVA
	1	2	3	4	5	6
1 Total LSS input	21.026	8.667	5.836	8.667	5.836	8.667
2 Recycling rate of CO ₂	100%	0%	0%	0%	100%	0%
3 Recycling rate of latent water	100%	0%	100%	0%	100%	0%
4 Recycling rate of waste water	98%	0%	98%	0%	98%	0%
5 Recycling rate of urine	85%	0%	0%	0%	85%	0%
6 Recycling rate of rest water	0%	0%	0%	0%	0%	0%
7 H ₂ O is used to produce oxygen	0.817	0.000	0.000	0.000	0.817	0.000
8 Resupply oxygen	0.109	0.974	0.835	0.974	0.109	0.974
9 Resupply food solids	0.617	0.720	0.617	0.720	0.617	0.720
10 Resupply water	0.044	4.973	1.575	4.973	0.044	4.973
11 Resupply water for EVA	-	2.000	-	2.000	-	2.000
12 Resupply water for laundry and shower	0.760	-	-	-	-	-
13 Resupply	1.530	8.667	3.027	8.667	0.770	8.667
14 Recycling rate	92.7%	0.0%	48.1%	0.0%	86.8%	0.0%

※ 1, 7~13 行目の値の単位は kg/CM-day

Table 5 資源再生オプションと再生率

Resources	Subsystem	Recycling rates of subsystem and column number						
		1	2	3	4	5	6	7
CO ₂	LER	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	PEM	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	PCM	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
Hygiene waste water	LER	98%	98%	98%	98%	0%	0%	0%
	PEM	98%	98%	98%	98%	98%	98%	0%
	PCM	98%	98%	98%	98%	98%	98%	0%
Excursion 1	Total	85.4%	-	84.5%	81.6%	-	81.0%	19.7%
Excursion 2	Total	83.2%	81.8%	79.0%	77.0%	76.0%	73.8%	32.5%

※ その他の再生率は Table 4 に示した設定と同じ

3. 4 供給・回収に要する移動時間の影響

資源の一括供給・回収と定期的供給・回収のプロセスが持つ移動時間の影響について Table 5 のオプション 2 についてダイナミックシミュレーションモデルを用いて解析する。PCM、PUP、LER の生命維持システムの物質循環システムを Fig. 4 に示す。

酸素と水の供給は、PCM から PUP、PCM から LER、PUP から LER への 3 つの系統があり、それぞれが同一位置に存在するときに補給可能である。排水の回収は先ほどと同じ 3 つの系統であるが逆の流れを持つ。

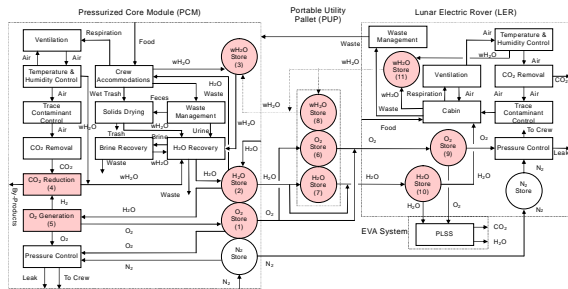


Fig. 4 月面システムの生命維持システム

遠征 1 と 2 のシミュレーション結果を Fig. 5 に示す。拠点の PCM の O₂、水、排水の変動を左側に、遠征先の O₂、水、排水の PUP 8 台分の合計を右側に示す。それぞれのグラフにおいて、遠征 1 は 29 日目から 42 日目までの 14 日間、遠征 2 は 92 日目から 159 日目までの 68 日間である。実線は必要物資をすべて PUP で携帯した場合、破線は PUP を用いて定期的に供給、および回収した場合である。遠征 2 の PUP による定期的な補給スケジュールを Fig. 6 に示す。

一括供給の場合の PCM の資源量の変動

Fig. 5 (a)と(c)で PCM の O₂と水の変動をみると、PCM から LER 2 台または PUP へ O₂と水を遠征 1、及び遠征 2 ともに補給できている。ここでは水から

酸素を生成しているため、遠征 2 で供給・回収をした場合、O₂量は 30 日程度で元の 350kg に回復しているが、水の状態量は、LER が 159 日目に拠点に戻り排水を回収して処理する 20 日後に元の 2400kg 付近まで回復している。この排水の回収の様子は Fig. 5(e)からも確認できる。

Fig. 5 (b)と(d)の実線は、68 日間の遠征 2 において O₂と水が PCM から PUP へ不足なく一括供給できていることを示す。

一括と定期的な供給・回収の比較

Fig. 3 に示した経路を用いた場合、8 台の PUP は、Table 6 に示した定期的な供給・回収のスケジュールに従い運用される。例えば、4 台の PUP が 91 日目に PCM を出発し、103 日目に SB に到着する。108 日目と 123 日目に PUP を交換し、使用後の 4 台の PUP は 134 日目に PCM に戻る。PUP は昼の期間のみ移動できる。

Fig. 5 (c)-(f)で PCM と PUP の水の変動をみると、水を定期的に供給、および排水を定期的に回収した場合、遠征期間が長い遠征 2 で、一括供給・回収に比べて水貯蔵量変動の平準化が確認できる。

Fig. 5 (b), (d), (f)で PUP の O₂、水、排水の変動をみると、PUP の移動が 2 週間の昼に限定されているため、遠征 2 で定期的な供給と回収を行っても、物資の供給と回収の分散化が十分できていない。

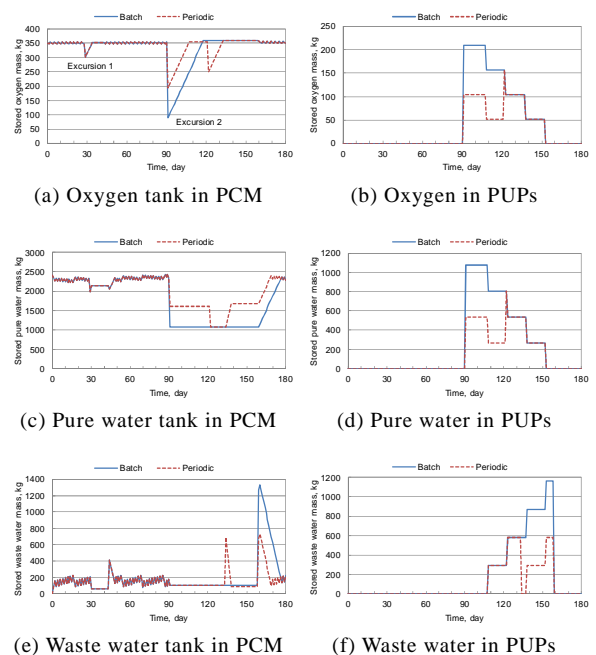


Fig. 5 PCM と PUP(8 台の合計)の貯蔵量の変動

Table 6 遠征 2 における PUP、LER、PCM 間の補給および回収スケジュール

Day / Supply	Number of PUP to supply from PCM to PUPs		Number of PUP exchange Batch and periodic	Number of EVA	Number of PUP to Collect from PUPs to PCM		Sunlight cycle
	Batch	Periodic			Batch	Periodic	
91	8	4					Day
92							
103	arrive at SB	arrive at SB					Night
106							
107							
108			2				
119							
120							Day
121				2			
122		4		2			
123			2	2			
124				2		leave SB	
127				2			
128				2			
129				2			
130				2			
131		arrive at SB					
134						4	
135							Night
136							
137							
138			2				
149							Day
150					leave SB	leave SB	
153			2				
160					8	4	

Shackleton Crater (SC), Schrödinger Basin (SB)

4. 結論

本論文では、月面での遠征探査について地形情報に基づいた最適探査経路の導出を定式化した。この方法によりマラパートへの 14 日間の短期遠征とシュレディンガー盆地への 68 日間の長期遠征について、遠征スケジュールを求めた。次に、2つの遠征について、生命維持システムの資源再生オプションについて表計算ソフトを用いて検討した。この結果、LER での CO₂回収は、PEM での CO₂回収ほど資源再生の効果が大きくないことを確認した。

さらに、LER で CO₂を回収しない場合について、資源の一括供給・回収と定期的供給・回収の移動時間の影響についてダイナミックシミュレーションモデルを用いて比較した。この結果、遠征途中での資源の定期供給・回収が、拠点での資源貯蔵量変動の平準化に貢献することを確認した。しかし、シュレディンガー盆地のような長距離遠征の場合、PUP の運用が 2 週間の昼に限定されるため、物資の供給と回収の分散化を十分には実現できていない。

参考文献

- 1) Bagdikian, 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, 2009.
- 2) Kennedy, K. J., Toups, L. D. and Rudisill, M., Constellation Architecture Team-Lunar Scenario 12.0 Habitation Overview, *Proceeding of Earth & Space 2010 Conference*, pp. 989-1011, 2010.
- 3) Miyajima, H., Logistics and Life Support Systems Analysis for High-Mobility Exploration on a Lunar Surface, *Proceeding of 43rd International Conference on Environmental Systems*, AIAA-2013-3377, 2013.
- 4) de Weck, O. L. and Simchi-Levi, D., Haughton-Mars Project Expedition 2005, NASA Technical report TP-2006-214196, 2006.
- 5) Araki, H., Tazawa, S., Noda, H., Ishihara, Y., Goossens, S., Sasaki, S., Kawano, N., Kamiya, I., Otake, H., Oberst, J. and Shum, C., Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry, *Science*, Vol. 323, No. 5916, pp. 897-900, 2009.
- 6) Hanford, A. J., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA CR-2004-208941, 2004.
- 7) Lange, K. E. and Lin, C. H., 1998: Advanced Life Support Program - Requirements Definition and Design Considerations, NASA Technical Report CTSD-ADV-245, 1996.