

地形および日照周期を考慮した月面南極域移動探査の検討

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

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 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. If that restriction can be overcome, the resulting improved stabilization will contribute to the robustness of life support system operations when the range and term of exploration are extended.

Key words: Dijkstra Method, Laser Altimetry, Life Support System, Path Search

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。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により探査する月面システムが検討された¹⁾。移動システム（月面電気ローバ、惑星探査ロボット）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 LSS を運用するときには、物資の供給や回収が重要になる。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、資源の供給と回収に要する移動時間が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ていながら、月面拠点や遠征先で物資が不足する可能性がある。

本論文では、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。

2. 遠征探査の定式化

本定式化では、JAXA 月周回衛星かぐやのレーザ高度計データ（緯度、経度、高度）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した。そしてこの問題をダイクストラ法による経路探索法を用いて解く。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。

コスト = \min (勾配に関する重み×勾配 + 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。これを次の計算手順により解く。

1) 全てのセルを次の3種類に分類する：

・ 始点セルからそのセルへ行く最小コストの経路が分かったセル

の集合 T

・ 集合 T に属するセルから直接訪れることのできるセルの集合 F
・ T と F 以外のセルの集合

2) F に属するセルの中から、始点セルからの最小コストのセルを見つけて集合 T に加える。このとき最小コストを記録しておく。
3) T の中に目的地のセルが含まれるまで繰り返して T を増やしていく。

3. 遠征シナリオと資源の供給・回収方法の比較

3.1 月面システムの構成

月面システムの諸元を Table 1 に示す。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 が移動能力を有する。

PCM、PLM、LER からなる拠点には 4 人滞在可能であり、2 人乗り LER を 2 台利用して同時に 4 人が遠征できる。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 日分まで必要物資を貯蔵可能である。

Table 1 月面システムの主要諸元

Element	Qt	Specification
PCM	1	Volume: 55m ³ Capacity: 4 crewmembers
PLM	1	Volume: 55m ³
PEM	1	Volume: 55m ³ , Capacity: 4 crewmembers O ₂ and others: 56 CM-day
LER	4	Volume: 12m ³ , Capacity: 2 crewmembers Suit ports on each LER: 2 O ₂ and others: 10 CM-day (including 4 CM-day for one contingency day)
PUP	8	O ₂ capacity: 14 CM-day Water capacity: 14 CM-day Waste water capacity: 14 CM-day

3.2 遠征シナリオ

短期と長期の2つの遠征についてその LSS の運用を比較する。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 120km のマラパート山の頂上付近である。2の遠征探査の定式化で求めた経路、移動距離、高

度変化を Fig. 1 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 450km 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. 1 右側に示す。

各遠征における遠征システムの形態と設定条件も Fig. 1 に示す。遠征 1 は、4 人の宇宙飛行士が、LER2 台と PUP2 台で、マラパート山頂付近に 14 日間遠征する。2 日目に經由地で宿泊し、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 は、4 人の宇宙飛行士が、PEM1 台、LER2 台と PUP8 台で、シュレディンガー盆地中央付近に 68 日間遠征する。經由地に 6 日間で到達し、そこで 2 日間の休憩を取る。經由地から目的地には 4 日間で到達する。計算では物資をすべて LER と同時に運ぶ場合と、定期的に供給・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。

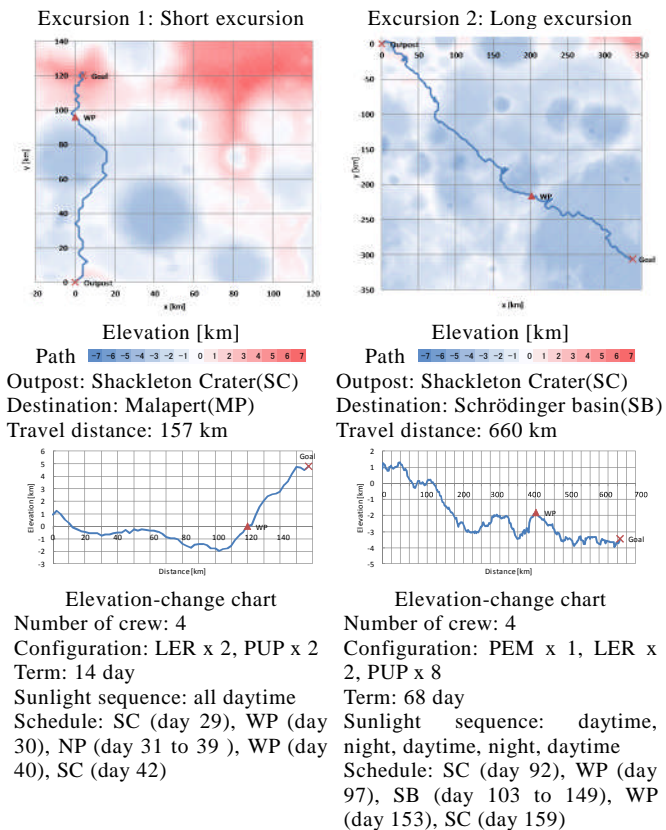


Fig. 1 短期と長期の遠征シナリオ

3. 3 資源の供給・回収の移動時間の影響

資源の供給と回収の移動時間の影響について Fig. 2 の月面システムについて解析する。遠征 1 と 2 のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。拠点の PCM の O₂、水、排水の変動を左側に、遠征 2 の PUP8 台の O₂、水、排水のそれぞれの合計を右側に示す。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・回収した場合である。

Fig. 3 (a) と (c) で PCM の O₂ と水の変動をみると、PCM から LER2 台または PUP へ O₂ と水を遠征 1、及び遠征 2 ともに補充できている。ここでは水から O₂ を生成しているため、定期的に供給・回収しない場合でも O₂ 量は 30 日程度で回復しているが、水の状態量は、LER が拠点に戻り排水を回収して処理するまで回復していない。この排水の回収の様子は Fig. 3(e) と (f) から確認できる。

Fig. 3 (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、水貯蔵量変動の平準化が確認できる。

Fig. 3 (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るため、遠征 2 の物資の供給と回収の分散化が十分できていない。

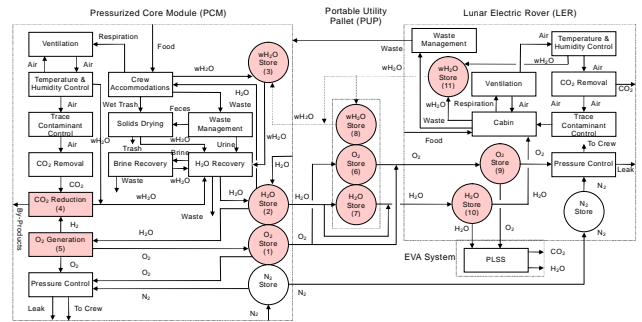


Fig. 2 月面システムの生命維持システム

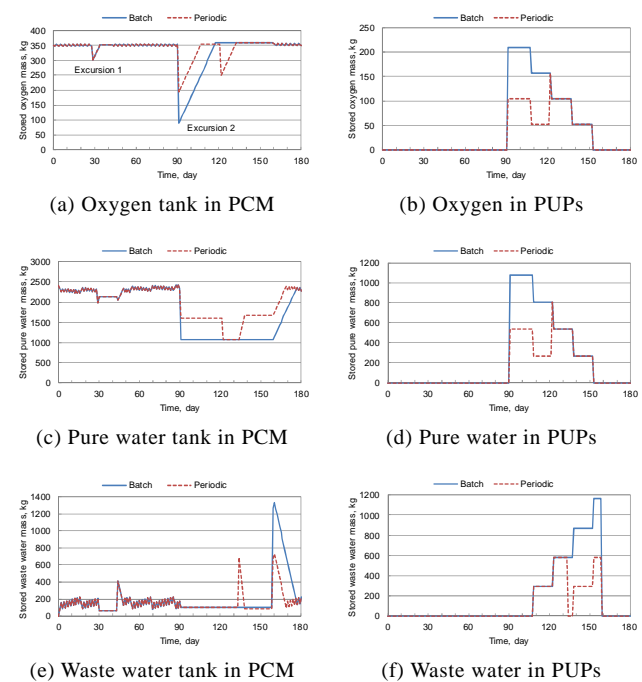


Fig. 3 PCM と PUP の貯蔵質量の変動

4. 結論

月面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、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、資源の供給と回収の移動時間の影響についてシミュレーションモデルを用いて比較した。この結果、資源の定期的な供給や回収が、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 の移動が 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が十分できていない。この PUP の移動の問題を克服すれば、定期的な補給や回収は、長距離遠征時の LSS 運用のロバスト性向上に貢献できると考えられる。

引用文献

1) Kennedy, K. J., Troups, L. D. and Rudisill, M., Constellation Architecture Team-Lunar Scenario 12.0 Habitation Overview, Proceeding of Earth & Space 2010 Conference, ASCE, 2010, pp. 989-1011.