

2F12 移動型有人月面探査のための分散型生命維持システムの運用

宮嶋宏行 (東京女学館大)

An Operation of Distributed Life Support Systems for Manned Mobile Explorations on Lunar Surface
Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key words: Logistics Network, Oxygen Supply System, Dynamic Programming

ABSTRACT

A logistics network is proposed for manned wide-area exploration on the lunar surface. A logistics carrier operation problem has been formulated and solved using Lagrangian decomposition and coordination, developed for operations management of Advanced Life Support Systems. The method can solve operations scheduling problems consisting of two rovers and a logistics carrier. This paper describes how to generate an operations schedule for the logistics carrier which is calculated considering both the rover positions and supply possibilities in the logistics network.

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、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無人や有人の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²⁾。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)システムから構成され、与圧ローバや物資運搬装置を用いて数十キロメートルから数百キロメートル離れた地点に遠征する¹⁾。このような移動型有人月面探査においては無人の物資運搬装置と有人与圧ローバを組み合わせることで広域の遠征をより安全に行うことが可能になる。このとき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。このように分散している生命維持システム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ないながら、ある地点では物資が不足する可能性がある。

著者は、先端生命維持システムの地上実験施設のためのシミュレータを開発し、ラグランジュ分解調整法のアルゴリズムを実装した^{3,4)}。先の論文⁵⁾では、月面の物資運搬装置運用計画へのラグランジュ分解調整法の適用について報告した。本報告では、本手法を NASA 有人月面探査計画の Lunar Scenario 12.0 (LS 12.0)²⁾に適用した結果について報告する。

2. 月面探査参照シナリオ

Lunar Scenario 12.0 (LS 12.0)で報告されている月面拠点は、移動システム (ロボット、有人ローバ)、居住システム、通信システム、電力システム、ISRU、ロジスティクス・部品、支援システムから構成される。ここに4人が7日間から180日間滞在する。このシナリオでは移動性に重点が置かれ、無人や有人の移動システムを利用して拠点から14日間から28日間にわたり数百キロ程度遠征できるシステムが提案されている。またこのシナリオでは部品や資源の再利用を想定し物資供給の削減も検討されている。

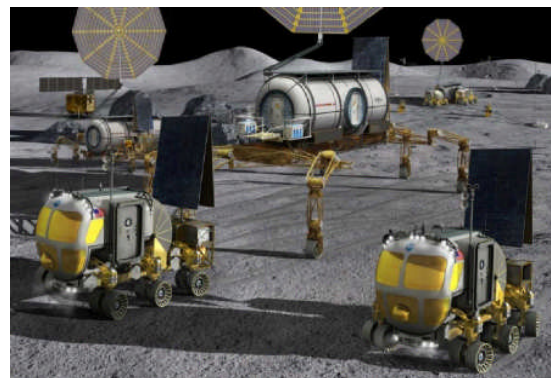


図1 Lunar Scenario 12.0 与圧ローバと与圧遠征モジュールの編成²⁾

3. ロジスティクスネットワークの定式化

月面において、ロボットや有人ローバを用いて広域探査を行う場合、生命維持に必要な装置や物資が移動可能であり、分散した状態で利用される。先の論文⁵⁾では、物資の供給を行うためのロジスティクスネットワークの概念を図2のように示した。居住モジュールを中心にしながら複数の探査ノードをロボットや与圧ローバを用いて探査していく。

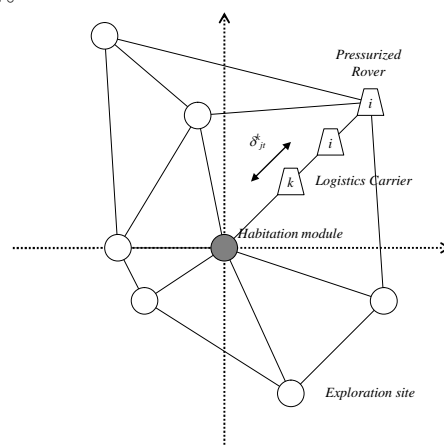


図2 ロジスティクスネットワークの概念と移動モデル

本章では、このロジスティクスネットワークの物資運搬装置運用計画にラグランジュ分解調整法を利用した定式化

について示す。図2に示すように与圧ローバ (Pressurized Rover) や物資運搬装置 (Logistics Carrier) の移動モデルを居住モジュールからの距離を用いて以下のように定式化した。

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J c_k |\delta_{jt}^k| + \sum_i h_i A_{ik} (dr_{it}/D_U) ((M_{Ui} - m_{it})/M_{Ui}) \right] \quad (1)$$

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

$$dc_{k,t} \geq D_L \quad \forall k, t \quad (3)$$

$$dc_{k,t} \leq D_U \quad \forall k, t \quad (4)$$

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

$$\sum_j \delta_{jt}^k B_{jk} \leq 1 \quad \forall k, t \quad (6)$$

$$\min l = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J c_k |\delta_{jt}^k| + \sum_i h_i A_{ik} (dr_{it}/D_U) ((M_{Ui} - m_{it})/M_{Ui}) \right] + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \lambda_t \delta_{jt}^k B_{jk} \quad (7)$$

$$\min l_k = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J c_k |\delta_{jt}^k| + \sum_i h_i A_{ik} (dr_{it}/D_U) ((M_{Ui} - m_{it})/M_{Ui}) \right] + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \lambda_t \delta_{jt}^k B_{jk} \quad (8)$$

決定変数 δ_{jt}^k は、物資運搬装置 k の移動 j を時刻 t で行う動作 (-1: 後進, 0: 停止, 1: 前進) を示す。最適化する目的関数は、移動コスト $c_k |\delta_{jt}^k|$ と、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 $h_i A_{ik} (dr_{it}/D_U) ((M_{Ui} - m_{it})/M_{Ui})$ の2項の和で式(1)のように定義する。 c_k は物資運搬装置 k の単位当たりの移動コスト、 h_i は単位当たりの補給コスト、 A_{ik} は与圧ローバ i が物資運搬装置 k と関係があるかどうかを示す 0-1 行列、 dr_{it} は居住

モジュールからの与圧ローバ i の位置、 D_U は物資運搬装置の位置上限、 M_{Ui} は与圧ローバ i の物資量上限、 m_{it} 、 Δm_{it} は与圧ローバ i の物資量、物資変化量をそれぞれ示す。制約条件は、物資運搬装置 k の時刻 t の位置 dc_{kt} に関する式(2)、物資運搬装置の位置の下限 D_L と上限 D_U に関する式(3)、式(4)、与圧ローバ i の時刻 t の物資量 m_{it} に関する式(5)、物資運搬装置の利用競合制約に関する式(6)からなる。式(6)の B_{jk} は移動 j が物資運搬装置 k と関係があるかどうかを示す 0-1 行列である。

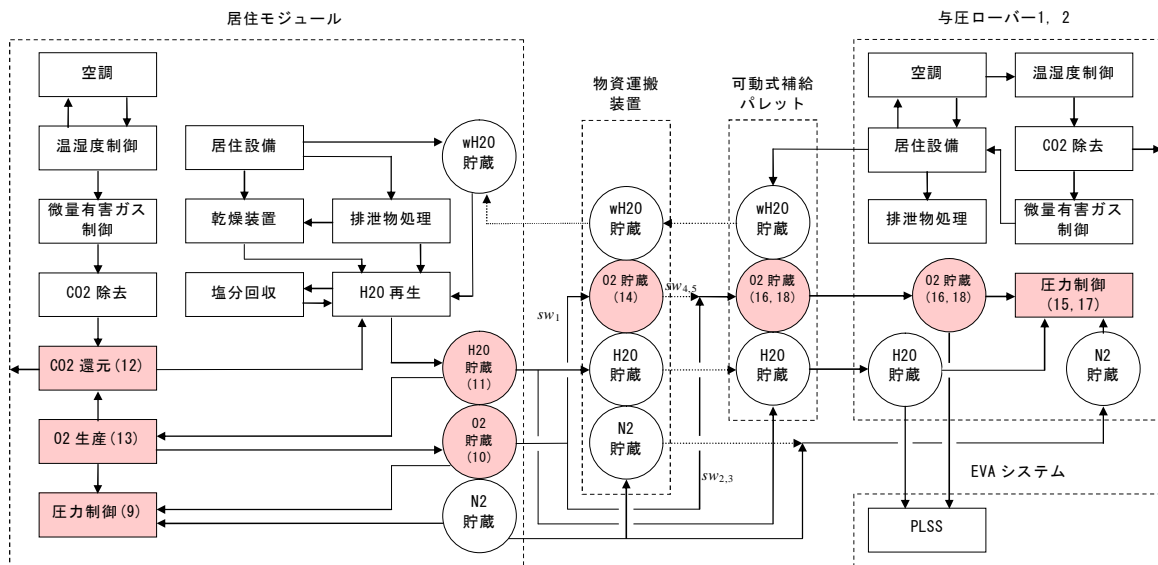
次に、式(6)の制約条件を、ラグランジュ乗数を用いて式(7)に示すように物資運搬装置の利用競合制約を緩和する最適化問題に置き換える。ここで l はラグランジュ関数と呼ばれる。次に、この最適化問題を式(8)のように物資運搬装置 k ごとに分離する。分離可能な元の最適化問題を解くことは、物資運搬装置 k に関する式(8)、式(2)一式(5)で表される部分問題を、それぞれ独立に最小化することと同じである。

4. 物資運搬装置の運用計画

4.1 月面探査シナリオ

本計算では、図3に示す月面拠点の生命維持システムの酸素供給 (網掛け部分) に限定したロジスティクスネットワークの酸素配分問題を解く。これは居住モジュール1基、与圧ローバ (可動式補給パレット、EVAシステムを含む) 2台、物資運搬装置1台($k=1$)の4つの要素からなる。物資の補給は、居住モジュールから物資運搬装置 (sw_1)、居住モジュールから与圧ローバ1 (sw_2)、2 (sw_3)、物資運搬装置から与圧ローバ1 (sw_4)、2 (sw_5)への5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。

計算単位には距離[day]、酸素量[CM-day]を導入する。距離[day]は移動に1日必要な距離、酸素量[CM-day]は1名のクルーが1日に必要な酸素量を意味する。ここでは距離[day]の1単位を50km、酸素量[CM-day]の1単位を1kg程度と想定している。



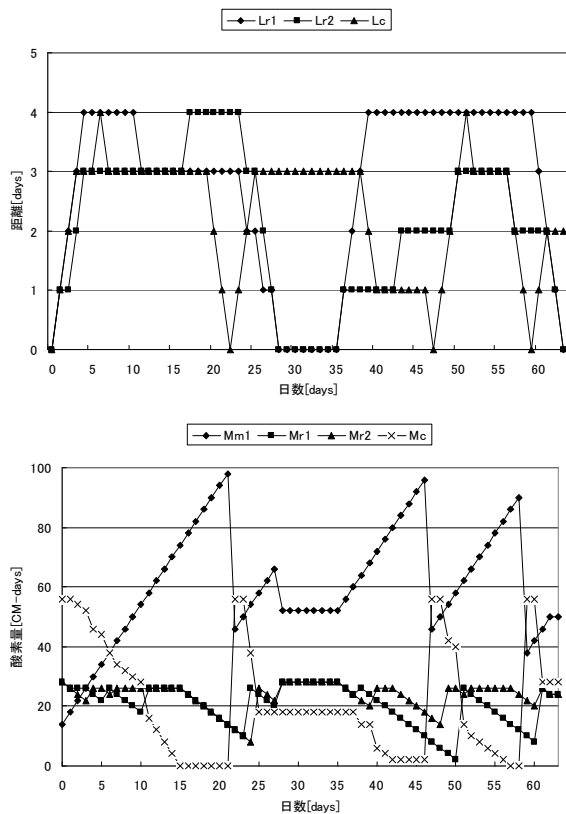
網掛け部分の括弧内の番号は生命維持システムの物質循環モデルの式番に対応している。図中の $sw_1, sw_2, sw_3, sw_4, sw_5$ は式(19)に対応している
図3 月面拠点の生命維持システム

与圧ローバ1と2の探査計画を表1に示す。居住モジュールには4人滞在可能であり、63日間の間に2人乗り与

Mr1, Mr2, Mc)を示す。物資運搬装置は3日目まで与圧ローバ1に追従し、4日目に与圧ローバ2の位置に移動し、6日目には再び与圧ローバ1の位置に移動している。7日目から16日目まで与圧ローバ2の位置に滞在し、11日目から19日目までは与圧ローバ1の位置に滞在し、22日目に補給のために居住モジュールに帰還している。再び出発したあとは、47日と59日にも補給のために帰還している。

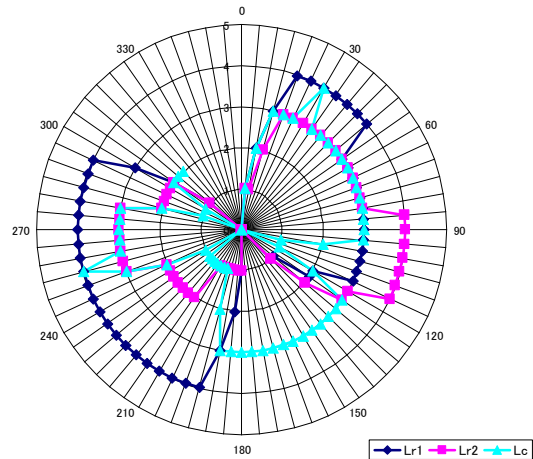
その間の酸素貯蔵量を示したものが図4下図である。物資運搬装置(Mc)の補給により、2回の遠征期間中に与圧ローバ1(Mr1)、2(Mr2)のO₂貯蔵量が不足することなく維持されている。またそのときの居住モジュールのO₂貯蔵量(Mm1)は、O₂生産装置のO₂生産により不足することなく維持されている。

次に、図5に与圧ローバ1(Lr1)と2(Lr2)、物資運搬装置(Lc)の居住モジュールからの相対的な位置関係の一例を距離[day]と角度[deg]で示す。図5においては、距離[day]の1単位を50km、円周方向に5deg/day時計回りに移動すると仮定している。これは図4上図の結果を、居住モジュールを中心に示した一例である。LS 12.0で想定しているような南極域での無人と有人の移動システムによる広域遠征における与圧ローバや物資運搬装置の移動をこの図からイメージできる。



距離[day]、酸素量[CM-day]の単位は、移動に1日必要な距離、1名のクルーが1日に必要な酸素量をそれぞれ意味する。

図4 与圧ローバ1(Lr1)、2(Lr2)、物資運搬装置(Lc)の位置(上図)と居住モジュール(Mm1)、与圧ローバ1(Mr1)、2(Mr2)、物資運搬装置(Mc)の酸素量(下図)の変動



居住モジュールからの相対的な位置を距離[day]と角度[deg]で表示している。ここでは距離[day]の1単位を50km、円周方向に5deg/day時計回りに移動すると仮定している。

図5 ローバ1(Lr1)、ローバ2(Lr2)、物資運搬装置(Lc)の居住モジュールからの相対的な位置関係の一例

5. まとめ

広域の移動型有人月面探査においてロジスティクスネットワーク内で利用される物資運搬装置の運用を定式化し、ラグランジュ分解調整法を用いて運用計画を立案した。本論文では、NASA 有人月面探査計画のLS 12.0のシナリオに基づいて物資運搬装置の運用計画を立案し、与圧ローバ2台、物資運搬装置1台を利用した63日間の運用をシミュレーションした。与圧ローバ1と2のそれぞれ2回の遠征に対して、居住モジュール、与圧ローバ、物資運搬装置からなる月面拠点システムの生命維持システムに対して酸素を不足することなく配分できる物資運搬装置の運用計画を立案できた。

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, 2009-01-2481, SAE Technical Paper Series, 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., Abe K., Hirosaki T., and Ishikawa Y., Development of Advanced Life Support Systems Control Software Considering Computational Effort and Mathematical Validity, 2007-01-3025, SAE Technical Paper Series, 2007.
4. Miyajima H., Abe K., Hirosaki T., and Ishikawa Y., Development of Advanced Life Support Systems Control Software Integrating Operators' Empirical Knowledge, 2008-01-1973, SAE Technical Paper Series, 2008.
5. Miyajima H., An Operations Management Method for a Logistics Network of Distributed Life Support Systems on the Lunar Surface, AIAA 2010-6226, 2010.