

# 3F10 分散型生命維持システムの運用と故障解析

○宮嶋宏行（東京女学館大）

## Failure Analysis and Control of Distributed Life Support Systems

Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key Words: FMEA, Lunar Outpost, Lunar Electric Rover, and Logistics Network

### Abstract

This paper studies an operation method and failure analysis of distributed life support systems in high-mobility explorations on the lunar surface. A two-dimensional Dynamic Programming method was developed to yield exact solutions of the distributed life support systems' partial problems. The capability of the algorithm in regard to various failure modes was confirmed by the numerical simulation.

### 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<sup>1)</sup>。近年、発表されている有人月面探査計画では、月面拠点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<sup>2)</sup>。このような有人月面探査においては無人の物資運搬装置と有人の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。このような分散型生命維持システムや物資の配置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。

前報では、月面でのロジスティクスネットワーク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<sup>3)</sup>。この物資運搬装置運用計画の部分問題の厳密解法として2変数ダイナミックプログラミングを提案し、物資運搬装置の運用期間と移動範囲に対する本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。

本論文では、分散型生命維持システムの運用上の故障モードについてFMEAを利用して解析し、そのうち故障等級の高かった酸素の供給問題を扱う。本来、FMEAはコンポーネントレベルでの故障解析に利用されるが、ここでは物資を運搬するという目的の観点からシステム全体の機能階層に適用している。

### 2. ロジスティクスネットワークの定式化

本章では、図1に示す与圧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、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の3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 $\lambda$ 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)一式(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。

$$\begin{aligned} \min l_k = & \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xj}^k)^2 + (\delta_{yj}^k)^2} \right. \\ & + \sum_i h_i A_k \sqrt{((dr_{xi}/D_{xi})^2 + (dr_{yi}/D_{yi})^2)} ((M_{Ui} - m_{ti})/M_{Ui}) \\ & + h_k \sqrt{((dc_{kt}/D_{xt})^2 + (dc_{kt}/D_{yt})^2)} ((M_{Uk} - m_{kt})/M_{Uk}) \left. \right] \\ & + \sum_{t=1}^T \lambda_t \sum_j \delta_{(x,y)j}^k B_{(x,y)jk} \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

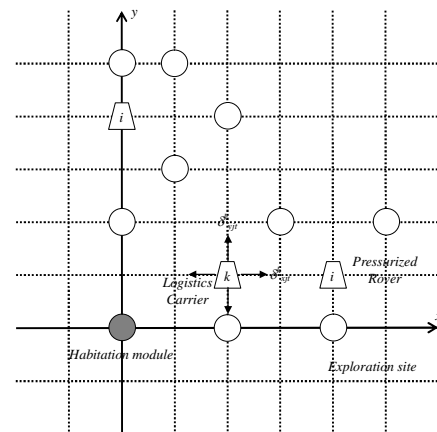


図1 ロジスティクスネットワークの移動モデル

決定変数 $\delta_{xj}^k$ と $\delta_{yj}^k$ 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、 $h_i$ は与圧ローバ $i$ 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、 $dr_{(x,y)i}$ は居住モジュールからの与圧ローバ $i$ の位置、 $D_{(x,y)U}$ 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、 $m_{it}$ 、 $\Delta m_{it}$ は与圧ローバ $i$ の物資量と物資変化量、 $dc_{(x,y)k}$ は物資運搬装置 $k$ の位置、 $M_{Uk}$ は物資運搬装置 $k$ の物資量上限、 $m_{kt}$ 、 $\Delta m_{kt}$ 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。 $B_{(x,y)jk}$ 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 $dc_{(x,y)k}$ に関する式(2)、物資運搬装置の位置の下限 $D_{(x,y)L}$ と上限 $D_{(x,y)U}$ 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 $k$ の時刻 $t$ の物資量 $m_{kt}$ に関する式(6)からなる。

### 3. 分散型生命維持システム FMEA

生命維持システムはサブシステムごとに明確な目的を持ち、他のサブシステムと関連がないため、サブシステムごとに FMEA が行われる<sup>4)</sup>。しかしながら、再生型の生命維持システムの故障解析を考える場合、再生した物質を再利用するため生命維持システム全体で考えた FMEA が必要である。この際に、汎用品ではない宇宙機器の場合、部品ごとの詳細な故障データを前提とした FMEA は現実的ではなく、ここでは生命維持システムの機能配分を利用した抽象的なレベルでの FMEA を行う。

分散型生命維持システムの FMEA は、①目的の確認、②システムの機能配分、③機能別ブロックの決定、④ブロックごとに故障モードを選定、⑤故障モードの評価、⑥総合評価と故障等級、⑦故障等級の高いものについて対策を検討、の7つの手順からなる<sup>5)</sup>。FMEA の目的は、物質を再生しながら運用する場合の分散型生命維持システム全体の故障解析である。②のシステムの機能配分は、先端生命維持システム ECLSS 機能配分<sup>6)</sup>の第一階層、第二階層を用いた。③および④の機能別ブロックとそのブロックごとの故障モードの選定では、先端生命維持システム ECLSS 機能配分の第三階層を用いた。次に、⑤の故障モードの評価では、緊急度、影響度、発生頻度の3つを用いた。緊急度は故障に対する対応時間の緊急性を意味する<sup>7)</sup>。影響度は、図2に示すサブシステムの階層から求め、供給系と廃棄系ではその階層を表す数字は逆になる。発生頻度は、機能の相対的な故障頻度を意味し、発生頻度が10倍大きくなるごとに等級を1上げている。この3つの評価点を表1-1~1-3に示す。この評価点を用いて、図3に示す月面拠点の生命維持システムの居住モジュールと与圧ローバの FMEA を行い、⑥の総合評価と故障等級を計算したものを表2に示す。総合評価は3つの指標の積

の三乗根、故障等級は2.8以上をI、2.4以上2.8未満をIIとしている。

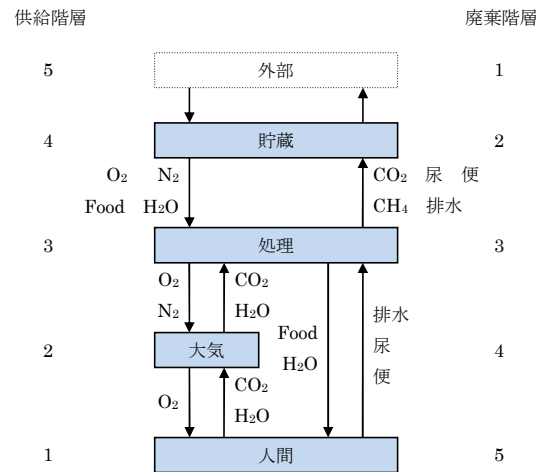


図2 供給と廃棄の階層

表 1-1 緊急度の評価点

評価点	緊急度 (対応時間)
5	秒以上
4	分以上
3	日以上
2	週以上
1	数週以上

表 1-2 影響度の評価点

評価点	影響度 供給階層	影響度 廃棄階層
5	外部	人間
4	貯蔵	大気
3	処理	処理
2	大気	貯蔵
1	人間	外部

表 1-3 発生頻度の評価点

評価点	発生頻度
5	$10^{-2}$
4	$10^{-3}$
3	$10^{-4}$
2	$10^{-5}$
1	$10^{-6}$

### 4. 月面拠点の生命維持システム

図3に示す月面拠点は、居住モジュール1基、物資運搬装置1台( $k=1$ )、与圧ローバ2台の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。

計算単位には距離[days]、酸素量[CM-days]を導入する。距離[days]は1日で移動可能な距離、酸素量[CM-days]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[days]の1単位を50km、酸素量[CM-days]の1単位を1kgに設定する。

居住モジュールには4人滞在可能であり、その4人がそれぞれ2人乗り与圧ローバ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16日間(14日間+予備2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O<sub>2</sub>生産装置によりO<sub>2</sub>の生産を行う。CO<sub>2</sub>還元は、居住モジュールでは行わないが、遠征中の与圧ローバでは行わない。

## 5. 物資運搬装置の運用計画

本計算では、表2に示す月面拠点の生命維持システムFMEAを基に、図3に示す月面拠点の生命維持システムの物資運搬装置による酸素供給問題を解く。特に、初期の計画通り運用できた通常運用の場合と、運用途中の12日目に物資運搬装置から与圧ローバ1への酸素補給が失敗した場合について比較している。

図4(a),(b)に示すように、与圧ローバ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。居住モジュールでは水の再生を行い、与圧ローバでは水の再生を行わず水の回収のみを行い、CO<sub>2</sub>の回収を行わない。このときの居住モジュール、物資運搬装置、与圧ローバの初期O<sub>2</sub>貯蔵量をそれぞれ14, 56, 32(2人に対して14日分+予備2日分)CM-daysに設定する。

### 通常運用

図4(a),(b),(c)に28日間の運用における物資運搬装置(Lc)、与圧ローバ1(Lr1)、2(Lr2)のそれぞれの位置をxy座標で示す。図4(a),(b)は与圧ローバ1と2に事前に与えられた探査位置の移動軌跡である。図4(c)は本手法により求めた物資運搬装置の位置の移動軌跡を示す。図4(a),(b),(c)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Time-10x+y表示に変換したグラフを図4(d)に示す。この図は物資運搬装置が、1日目~5日目、7日目、8日目に与圧ローバ2と同じ位置に移動し、12日目に与圧ローバ1の位置に移動し、15日目には再び与圧ローバ2の位置に移動し、18日目まで追従し補給している。その後、24日目に再補給のために居住モジュールに帰還している。その後26日目に与圧ローバ1と2に再び補給している。これは図5(a)の物資運搬装置、与圧ローバ1と2の酸素貯蔵量の変動からも確認できる。

### 故障時運用

次に、12日目の物資運搬装置から与圧ローバ1への酸素補給が失敗した場合、12日目以降の運用計画を再スケジュールした場合の物資運搬装置の位置の移動軌跡を図4(e)に、xy座標表示をTime-10x+y表示に変換したグラフを図4(f)に示す。12日目には、物資運搬装置は与圧ローバ1と同じ位置に停止しているが酸素の供給には失敗している。12日目以降の

再スケジュールにより13日目に与圧ローバ1の位置に移動し、酸素の供給に成功している。これは図5(b)の13日目の物資運搬装置、与圧ローバ1の酸素貯蔵量の変動からも確認できる。

図4(d)と(f)を比較すると13日目に当初の位置とは違った場所に移動したことによる遅れは、再スケジュールにより24日目までの間に取り戻すことができている。また、このことにより与圧ローバ2への供給不足も発生していない。

## 6. まとめ

物資運搬装置ごとの部分問題の厳密解法として2変数ダイナミックプログラミングを提案し、運用期間が長くなった場合や移動範囲が広がった場合に計算量が指数関数的には増加しない運用計画アルゴリズムを開発した。

本論文では、本手法の分散型生命維持システムへの適用の準備として、FMEAを用いて月面拠点システムの物資供給に関する故障解析を行った。この結果、月面拠点では酸素の再生失敗、酸素の外部からの供給失敗、二酸化炭素の回収失敗、二酸化炭素の再生失敗、与圧ローバでは酸素の外部からの供給失敗、二酸化炭素の回収失敗の故障等級が高くなった。このうち与圧ローバへの酸素供給の失敗時に本手法で物資運搬装置運用計画の再スケジュールが可能であることを確認した。

## 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, 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., A Logistics Analysis and Control of Distributed Life Support Systems for High-Mobility Exploration, AIAA 2011-5233, 2011.
- 4) Mars or Bust, INC., Martin Habitat Design, University of Colorado, Boulder Aerospace Engineering Sciences, ASEN 4158/5158, 2003.
- 5) 真壁肇, 改訂版信頼性工学入門, 日本規格協会, 1996.
- 6) Crew and Thermal Systems Division NASA JSC, Advanced Life Support Requirements Document, JSC 38571C, 2003.
- 7) Jones H., Lunar Base Life Support Failure Analysis and Simulation, 2009-01-2482, SAE Technical Paper Series, 2009.

表 2 月面拠点の生命維持システム FMEA

機能階層		居住モジュール			与圧ローバ					
機能配分	故障モード	緊急度	影響度	発生頻度	総合評価	故障等級	発生頻度	総合評価	故障等級	
資源供給	窒素供給	供給失敗	3	3	1	2.1		1	2.1	
		貯蔵失敗	3	4	1	2.3		1	2.3	
		計測失敗	3	3	1	2.1		1	2.1	
		外部からの供給失敗	3	5	1	2.5	II	1	2.5	II
	酸素供給	供給失敗	5	3	1	2.5	II	1	2.5	II
		貯蔵失敗	5	4	1	2.7	II	1	2.7	II
		計測失敗	5	3	1	2.5	II	1	2.5	II
		再生失敗	5	3	2	3.1	I		0.0	
		外部からの供給失敗	5	5	1	2.9	I	1	2.9	I
	水供給	供給失敗	3	3	1	2.1		1	2.1	
		貯蔵失敗	3	4	1	2.3		1	2.3	
		計測失敗	3	3	1	2.1		1	2.1	
		再生失敗	3	3	2	2.6	II		0.0	
		外部からの供給失敗	3	5	1	2.5	II	1	2.5	II
食料供給	貯蔵失敗	3	4	1	2.3		1	2.3		
	処理（調理）失敗	3	3	2	2.6	II	2	2.6	II	
	外部からの供給失敗	3	5	1	2.5	II	1	2.5	II	
廃棄物管理	二酸化炭素管理	回収失敗	4	4	2	3.2	I	2	3.2	I
		貯蔵失敗	4	2	1	2.0		1	2.0	
		計測失敗	4	3	1	2.3		1	2.3	
		処理（再生）失敗	4	3	2	2.9	I		0.0	
		外部への廃棄失敗	4	1	1	1.6		1	1.6	
	排水管理	回収失敗	2	5	2	2.7	II	2	2.7	II
		貯蔵失敗	2	2	1	1.6		1	1.6	
		計測失敗	2	3	1	1.8		1	1.8	
		処理（再生）失敗	2	3	2	2.3			0.0	
		外部への廃棄失敗	2	1	1	1.3		1	1.3	
	固形物・濃縮廃液管理	回収失敗	2	5	2	2.7	II	2	2.7	II
		貯蔵失敗	2	2	1	1.6		1	1.6	
		計測失敗	2	3	1	1.8		1	1.8	
		処理（コンパクト化）失敗	2	3	2	2.3		2	2.3	
外部への廃棄失敗		2	1	1	1.3		1	1.3		

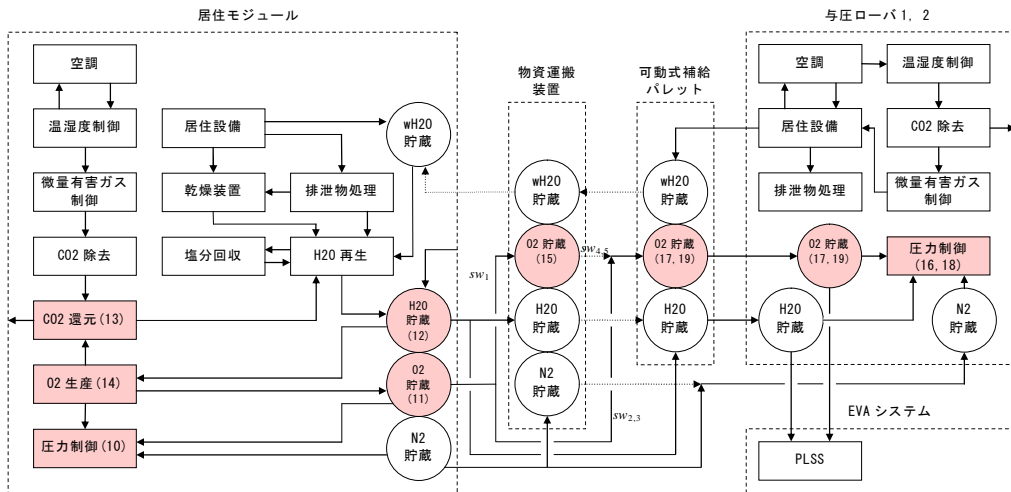
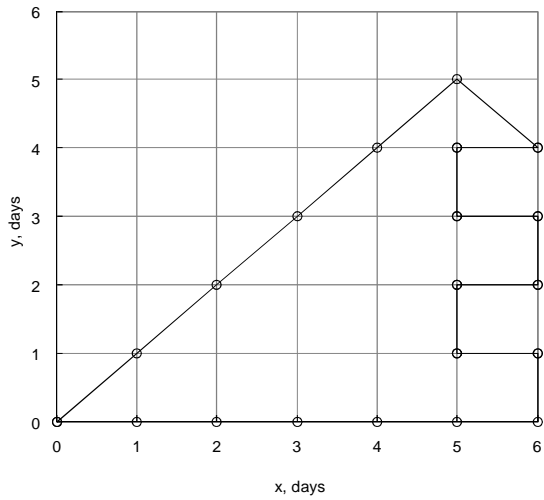
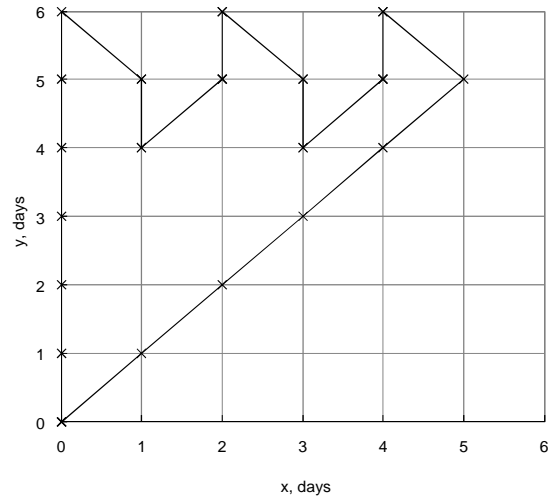


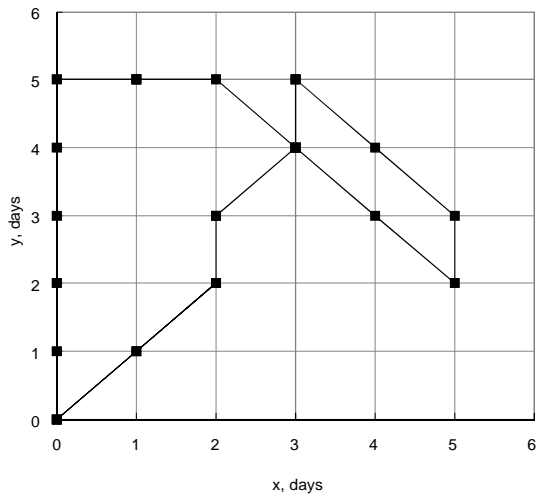
図 3 月面拠点の生命維持システム



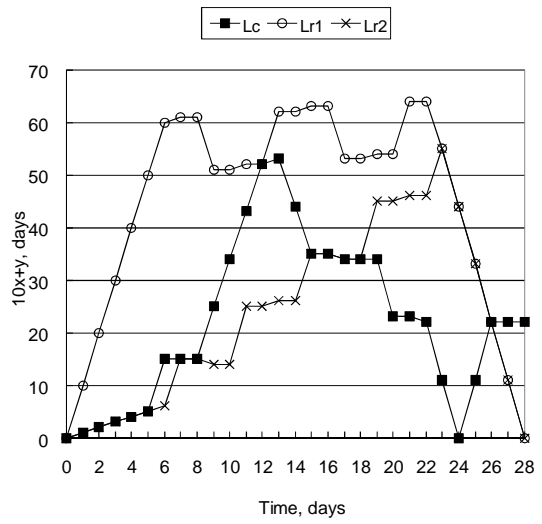
(a) 与圧ローバ 1(Lr1)



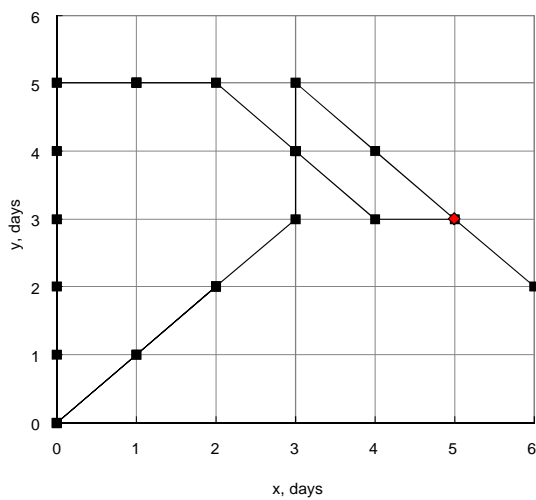
(b) 与圧ローバ 2(Lr2)



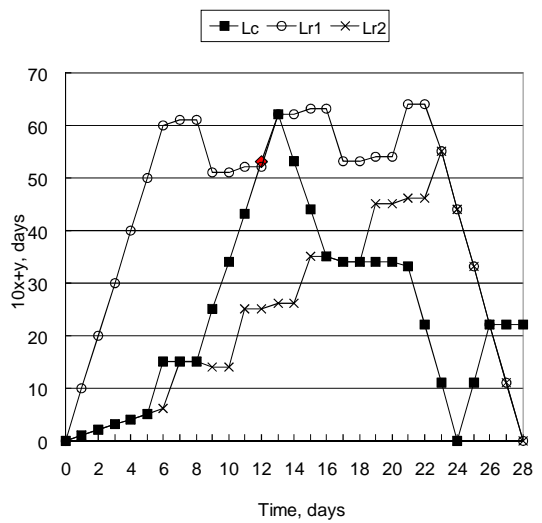
(c) 物資運搬装置(Lc) 通常運用



(d) Time-(10x+y) 通常運用

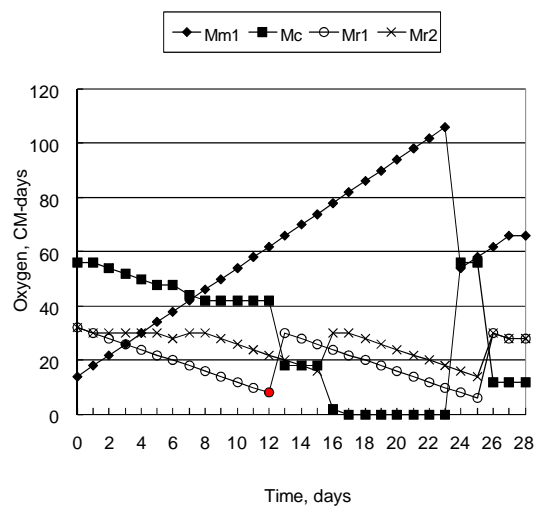
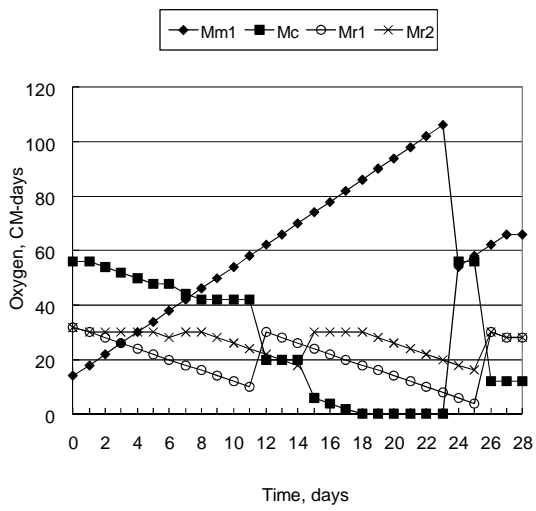


(e) 物資運搬装置(Lc) 補給失敗



(f) Time-(10x+y) 補給失敗

図 4 物資運搬装置(Lc)、与圧ローバ 1(Lr1)、2(Lr2)の位置の移動軌跡



(a) 通常運用

(b) 補給失敗

図 5 物資運搬装置(Mc)、与圧ローバ 1(Mr1)、2(Mr2)の酸素貯蔵量の変動