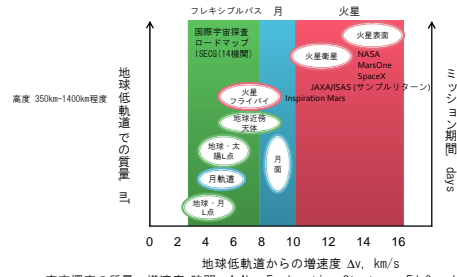


有人火星ミッション設計のための生命維持システムのパラメトリック解析

宮嶋宏行 東京女学館大学

2015生態学会年次大会
2015年6月27日(土) - 28日(日)
明治大学黒川農場

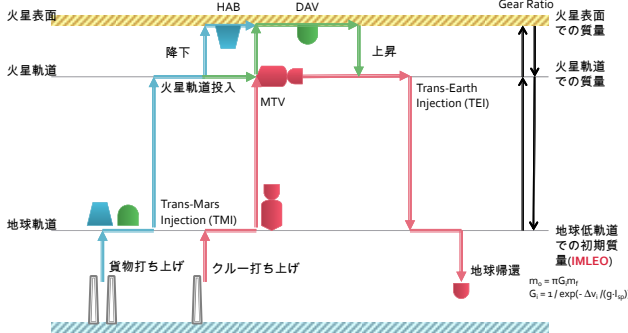
研究の背景と目的



宇宙探査の質量、増速度、時間、A New Exploration Strategy, Ed Crawley, 2010 に加筆

- ミッションの位置・期間・人数の変化に対応した有人深宇宙探査のための物質と生命維持システムを解析できるツールを開発する
- 有人火星探査ミッションの地球低軌道初期質量 (IMLEO) を解析する

ミッション概念とGear Ratioを利用した質量解析モデル



有人ミッションセグメント	増速度, m/s	燃料	I_{sp}	G(mum), kg/kg
1 トランスマーズインジェクション	4836	LOX/LH2	342	4.23
2 火星軌道への投入 (推進)	2224	LOX/LH2	342	1.94
3 火星軌道への投入 (エアロキャプチャ)	299	LOX/LH2	342	1.09
4 火星軌道離脱、降下、着陸	707	LOX/LH2	342	1.23
5 火星軌道への上昇	6469	LOX/CH4	379	5.71
6 トランスマーズインジェクション	1826	LOX/LH2	342	1.72
7 LEOへ投入 (推進)、離脱、エントリー、着陸	7835	LOX/LH2	342	10.36
8 LEOへ投入 (エアロキャプチャ)、離脱、エントリー、着陸	0	LOX/LH2	342	1.00

質量解析モデル

$$M_{HAB/IMLEO} = payload_{HAB} + M_{SS/IMLEO} + M_{BPS/IMLEO} + M_{ISRU/IMLEO} + M_{Crew} \quad \text{火星表面へ投入する質量}$$

$$M_{SS/IMLEO} = M_{SS/IMLEO} \cdot (r_{CO_2} + r_{H_2O}) / 2 \quad \text{クルーの } O_2, H_2O \text{ 推進系 } CH_4, O_2$$

$$M_{BPS/IMLEO} = M_{BPS/IMLEO} \cdot (r_{ISRU} + r_{BPS}) / 2 \quad \text{ISRUとBPSのための電力供給システム}$$

$$M_{HAB/IMLEO} = M_{HAB/IMLEO} \cdot G_{app} / G_{IMLEO}$$

$$M_{MTV/IMLEO} = payload_{MTV} + M_{SS/IMLEO} \cdot r_1 + (M_{consumable/IMLEO} + M_{recycled/IMLEO} - M_{recycled/MTV}) \cdot r_{Crew} \cdot d_{IMLEO} \quad \text{地球軌道へ帰還する質量}$$

$$M_{MTV/IMLEO} = M_{MTV/IMLEO} \cdot G_{TEI} / G_{IMLEO} \quad \text{地球軌道へ帰還する質量}$$

$$M_{DAV/IMLEO} = payload_{DAV} + (M_{consumable/IMLEO} + M_{recycled/IMLEO}) \cdot r_{Crew} \quad \text{火星軌道へ上昇する質量}$$

$$M_{DAV/IMLEO} = M_{DAV/IMLEO} \cdot G_{ascend} / G_{IMLEO} \quad \text{(ISRUなし)}$$

$$M_{DAV/IMLEO} = M_{DAV/IMLEO} \cdot G_{ascend} / G_{IMLEO} \quad \text{(ISRUあり)}$$

NASA DRM-5基準

機能	ドライマッス, kg	詳細
火星居住船 (HAB)	固定質量 43,900	固定質量: サイエンス機器: 1,000kg, ロボットローバ: 500kg, ドリル: 1,000kg, 非圧縮ローバ: 500kg, 圧縮ローバ: 8,000kg, 圧縮ローバ増設: 1,600kg, 移動型発電設備: 1,000kg, 移動型貯蔵: 100kg, 居住部: 16,500kg, 居住部増設: 5,000kg, 電力供給システム: 7,800 kg 変化質量: マーズキャプチャ (エアロ or 推進), 生命維持システム (貯蔵 or 再生): 2,086kg, 現地資源生産 (する or しない), クルー用876kg, 燃料 酸素用2,658kg, 電力供給システム: 7,920kg, 生命維持消耗品、クルー供給品: 546日間
	固定質量 19,410	固定質量: 電力供給システム: 5,840kg, アビオニクス: 290kg, 熱管理システム: 1,260kg, 宿泊設備: 4,210kg, EVAシステム: 870kg, 構造: 2,020kg, マーズン (30%): 4,920kg 変化質量: 生命維持システム (貯蔵 or 再生): 2,086kg, 生命維持消耗品、クルー供給品: 462日間 固定質量: 上昇カプセル: 5,687kg
火星降下・上昇船 (DAV)	固定質量 5,687	変化質量: 上昇用燃料 (現地資源生産する or しない), 生命維持消耗品、クルー供給品: 30日間

計算前提条件

クルー入力	kg/CM-day	クルー出力	kg/CM-day
酸素	0.84	二酸化炭素	1
飲用水・調理用水	2.38	呼吸や汗の凝縮水	2.28
トイレフラッシュ用水	0.5	トイレフラッシュ排水	2.9
洗浄水	1.29	洗浄排水	1.29
入力量合計	5.01	出力量合計	6.57

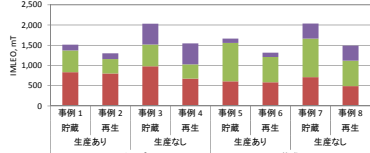
クルー消耗品	ISS, kg/CM-day	火星基地, kg/CM-day
食料	2.51	2.3
クルー供給品	1.19	0.95
メンテナンス	2.56	0.53
EVAサポート	0.09	0.35
合計	6.35	4.13

生命維持物資	質量 kg/CM-day
酸素	0.84
酸素タンク貯蔵量	0.31
水	4.17
水タンク貯蔵量	0.83
LiOHとパッケージ	1.75
酸素リーク	0.0088
酸素リーク貯蔵量	0.0032
酸素リーク	0.0353
酸素リーク貯蔵量	0.0196
合計	7.97

8つのケースのIMLEO比較 トレードツリーとパラメータ範囲

システム設計の不確かさを表す指標

事例	ミッションタイプ	貨物配送	火星キャプチャ	ペイロード/突入質量	ISRU生産比率			LSS再生比率			食料生産/電力供給システム質量比		
					方法	燃料O ₂	生命維持O ₂ , H ₂ O	方法	燃料O ₂	生命維持O ₂ , H ₂ O	食料生産/電力供給システム質量比	食料生産/電力供給システム質量比	食料生産/電力供給システム質量比
1	長期滞在 事前配送	エアロキャプチャ	0-1	1	あり	0-1	0-1	貯蔵型	0	0	0	0	0
2					あり	0-1	0-1	再生型	0-1	0-1	0-3	0-3	0-3
3					なし	0	0	貯蔵型	0	0	0	0	0
4					なし	0	0	再生型	0-1	0-1	0-3	0-3	0
5					あり	0-1	0-1	貯蔵型	0	0	0	0	0-3
6					あり	0-1	0-1	再生型	0-1	0-1	0-3	0-3	0-3
7					なし	0	0	貯蔵型	0	0	0	0	0
8					なし	0	0	再生型	0-1	0-1	0-3	0-3	0

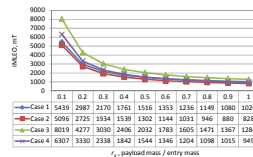


火星表面での食料生産 (実際にはないシステム)
BPS 1,600kg/CM 増加
PSS 1,320kg/CM 増加

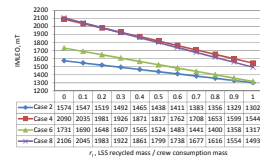
事例	IMLEO	DAV	MTV	HAB
事例1	1,516	146	536	835
事例2	1,302	146	515	803
事例3	2,032	146	515	981
事例4	1,544	146	515	676
事例5	1,664	146	515	607
事例6	1,317	146	515	583
事例7	2,039	146	515	713
事例8	1,493	146	515	491

計算値/DRM-5参照値
1.00, 1.06, 0.84
Av margin = 15%, $\tau_{\text{LSS}} = 0.5, \tau_{\text{PSS}} = 1.0, \tau_{\text{DAV}} = 1.0, \tau_{\text{MTV}} = 1.0, \tau_{\text{HAB}} = 1.0$

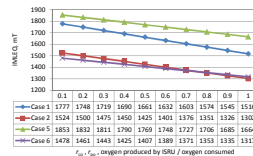
IMLEOへの影響



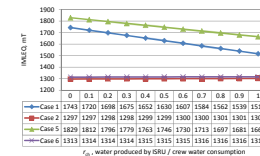
IMLEO vs. 突入質量比率



IMLEO vs. LSS再生比率



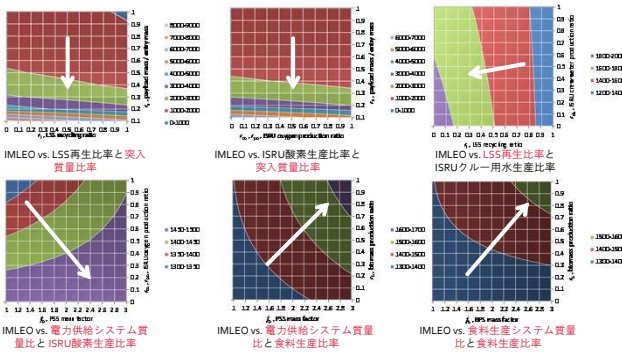
IMLEO vs. ISRU酸素生産比率



IMLEO vs. ISRU水生産比率

IMLEOへの影響 クロス分析

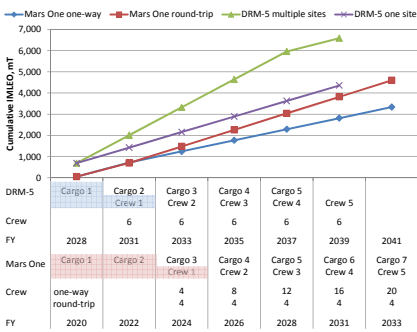
← 質量増の方向



MarsOneミッションのIMLEO

機能	(仮想) 往復		詳細
	706 日間	916 日間	
火星居住船 (HAB)	固定質量 56,830 ドライマスの, kg	固定質量 55,060 ドライマスの, kg	固定質量: (片道) サイエンス機器: 1,000kg, ロボットローバ: 1,000kg, 居住部: 39,000 (Red Dragon 6,500kg x 6), 居住部増設: 12,230kg (約Red Dragonペイロード 2,000kg x 6), ソーラー電力供給システム: 3,600kg 変化質量: ISRUプラント: クルー用O ₂ 燃料メタン酸素用1,772kg, 電力供給システム: 5,280kg, 生命維持システム(再生): 2,080kg, 食料生産システム: 6,400kg, 生命維持消耗品と供給品: 546日間
火星移動船 (MTV)	固定質量 20,000	固定質量 20,000	固定質量: MTV 構造: 20,000kg, 火星キャプチャ(推進) 変化質量: 生命維持消耗品(貯蔵), クルー供給品: 231-day (片道) 462-day (往復)
火星降下・上昇船 (DAV)		固定質量 6,500	固定質量: 上昇カプセル: 6,500kg, 火星上昇用燃料(現地生産) 変化質量: 生命維持消耗品(貯蔵), クルー供給品: 30-day
IMLEO	971 mT (HAB: 669 mT, MTV: 289 mT, DAV: 13 mT)	1,426 mT (HAB: 646 mT, MTV: 674 mT, DAV: 106 mT)	

MarsOneとDRM-5の累積IMLEOの比較



まとめ

- 有人深宇宙探査のための物資と生命維持システムを解析できるツールを開発
 - NASA DRM-5のIMLEOと比較して、計算ツールの性能を確認。
- IMLEOの削減
 - エアロキャプチャ、再生型生命維持システム、火星での資源生産は、火星着陸探査のIMLEOを削減できる。
- 火星での食料生産、資源生産、電力生産
 - 火星での資源生産には、軽量の電力供給システムが必要である。もし、電力供給システムの質量が増加すれば、資源生産は非効率なものになる。
 - 食料生産システムと電力供給システムの軽量化が重要である。それらの質量の増加は、IMLEOを大幅に増加させる。
- 仮想シナリオ
 - 片道有人火星探査ミッションMarsOneの仮想的な往復ミッションのIMLEOを計算し、MarsOne片道ミッション(オリジナル)と比較した。