

論文の内容の要旨

論文題目 持続的な有人火星滞在に向けたシステムアーキテクチャの構築
(Construction of System Architecture for Sustainable Manned Mars Habitation)

氏名 秋山 靖博

1. 背景

将来、有人拠点を火星に構築して継続的に滞在することで長期、広範囲の火星探査を行う事が期待される。しかし、地球外での持続的拠点維持の研究、実績は不十分である。これまで唯一の持続的有人ミッションである ISS では、LEO 上で 10 年以上の運用を行い継続的な補給を実現している。また、地球外天体で行われた有人ミッションは Apollo 計画のみであるが、10 日程度の短期ミッションであったため期間中の機器信頼度を高く保つ事ができた。それらに対し持続的火星滞在では、新たに、長期間輸送、高 ΔV 、狭いローンチウインドウ、長期的信頼度維持、稼働率の管理、物資欠乏リスクへの対応等が課題となる。

中でも大きな問題となるのが、長期孤立に伴う新たなリスクである。有人宇宙ミッションには様々なリスクが存在するが、これまで対策が施されているのは短期間で事態が進展する即死リスクのみである。帰還が容易であるためその他のリスクに対してはこれまで特段の対策を要しなかった。しかし、火星では早期の帰還は不可能であり、機器の故障による水や酸素の枯渇を考慮する必要がある。

本研究ではクルーが交代しながら持続的に火星滞在を行う状況を想定し、持続的有人宇宙活動に向けたシステムアーキテクチャを構築した。また、本研究では打上量削減に寄与する新規技術の効果を評価することで、莫大なコストを要する技術開発に指針を与えた。

2. 滞在システムの構築

2.1 輸送システムの構築

代表的な惑星間遷移軌道を図 1 に示す。

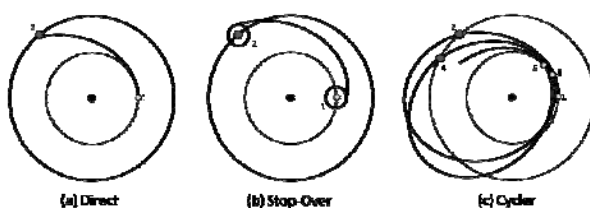


図 1. 地球—火星遷移軌道

Direct 軌道は最も基本的な軌道であり、 ΔV 最小となる Hohman 軌道を含む。本研究では推進剤削減のため貨物とクルーで別の輸送システムを用い、貨物は Hohman 軌道で輸送した。Step-Over 輸送は、惑星周回軌道間の輸送であるため往復輸送に適する。そのため本研究ではクルーの輸送に用いた。Cypher 輸送では、地球、火星で繰り返しスイングバイを行う事で両惑星に繰り返しランデブーする宇宙機を使用する。この宇宙機を中継基地として使い、低 ΔV 、短期間での持続的な地球 - 火星輸送が可能となる。

本研究では 3 種類の輸送法を下記のように組合せて輸送系を構築した。これらの軌道は Patched-conics 法によって設計した。

- (a)Stop-Over 型: Cargo: Direct + Human: Stop-Over
 (b)Cycler 型: Cargo: Direct + Human: Cycler

また、本研究では物資欠乏リスクに対処するため、物資の備蓄を行うと共に緊急輸送を想定した。図 2 に本研究で用いた 4 種類の輸送法を示す。Lambert 則および SQP を用いて軌道計算を行った。

- (a)耐久 : 初期計画通りの輸送を行う
 (b)緊急帰還 : クルーを帰還させる
 (c)地球救援 : 地球から救援機を送る
 (d)サイクラー救援 : サイクラー機で救援する

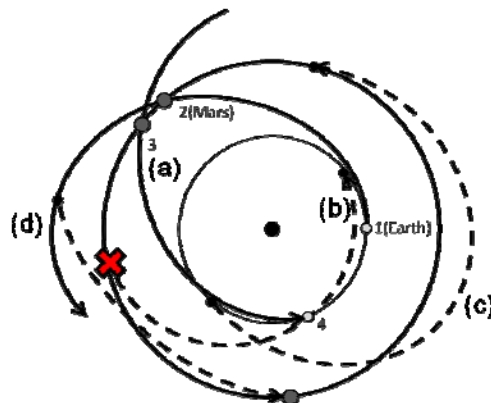


図 2. 救援輸送軌道

また、原子力による高エネルギー推進の研究開発が進んでおり、火星輸送にも大きな影響を与えると考えられる。本研究では高エネルギー推進が持続的火星滞在に与える効果についても検討を行った。

2.2 基地システムの構成

火星恒久拠点を構成するシステム群の中でも非常に多くの質量を占めるのが生命維持システム(ECLSS)である。長期間の滞在期間中に消費する生存物資は 100t 以上に上り、ECLSS による生存物資の再生が非常に重要である。本研究では、ECLSS のモデルとして NASA の公表する ALS モデルを用い、再生率に応じて ECLSS の質量を計算した。

また、火星大気の 95% を占める CO_2 の利用および水の発見を通じた火星での資源調達(ISRU)も地球からの輸送を大きく軽減すると考えられる。図 3 にそれらを考慮して構成した本研究の ISRU, ECLSS モデルを示す。

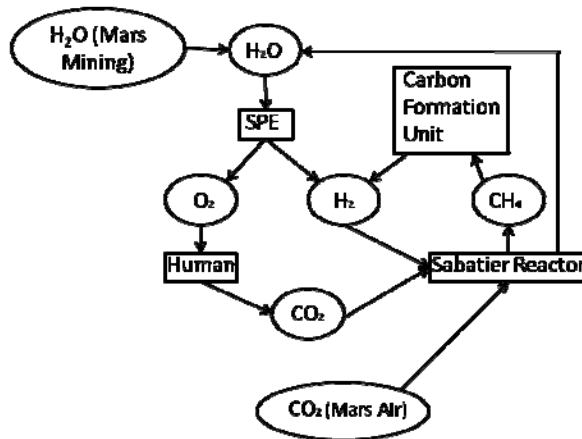


図 3. ISRU 型 ECLSS システム

2.3 滞在システムの全体構成

最適化には遺伝的アルゴリズムを用いた。計算プロセスを以下に示す。

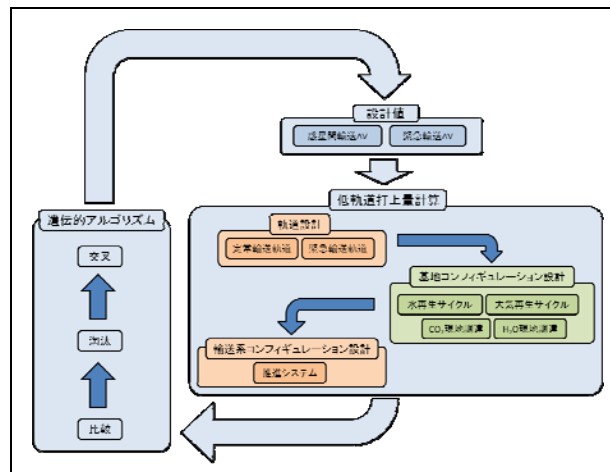


図 4. 最適化計算プロセス

3. 考察

3.1. 火星滞在システムの構築

図 5 に、Stop-Over 輸送を用いた場合の低軌道打上量を示す。初期輸送は滞在システム初期設置時の輸送量であり、補給輸送は火星の公転周期に合わせて 2.14 年ごとに必要となる輸送量である。標準条件では初期輸送に 2200t、補給輸送に 1700t が必要である。次に、新規技術開発による輸送量削減の効果を評価した。

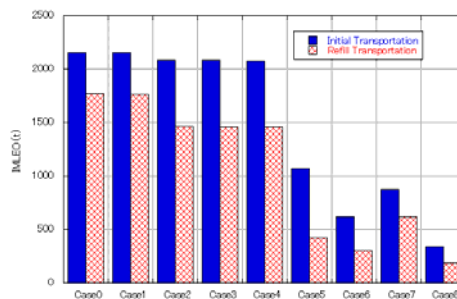


図 5. 推進系開発・資源採取による打上量減少効果

物資再生率向上の効果は、水の再生率を向上させた場合に著しい。水は消費量が酸素より大きいため、再生による影響が大きいと考えられる。また、火星での酸素採取はさらに大きな効果を持つ。酸素採取の結果、初期輸送は 1100t、補給輸送は 400t 程度に削減できる。これは、帰還推進剤の酸素および火星でクルーの呼吸に必要な酸素を現地で生産できるためである。特に、帰還推進剤は火星で 300t 程度が必要であり、効果は大きい。さらに水を採取する事が出来れば、初期輸送をさらに削減する事が出来る。

一方、原子力推進による高比推力、高推力の推進が実現した場合、Isp=850 では、初期輸送量 900t、補給輸送量 600t と輸送量を削減できる。

次に、Cycler 輸送を行った場合を検討した。図 6 に、Cycler 輸送を行った場合と Stop-Over 輸送を行った場合の比較を示す。Cycler 輸送には中継基地となる宇宙機の設置が必要であるが、追加の推進剤が不要のため長期的には輸送量を削減できる。ただし、ISRU によって帰還推進剤を調達できるようになると Cycler 輸送の優位は縮小される。推進系の発達も Stop-Over と Cycler の差を縮小する方向に働く。

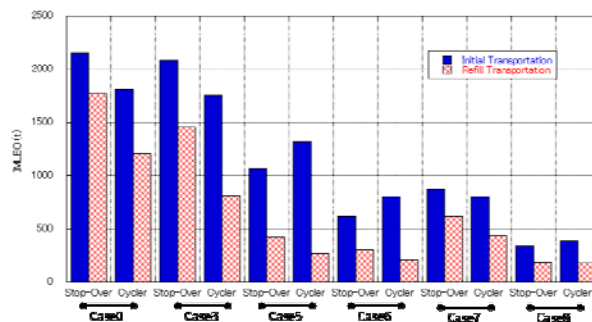


図 6. サイ클ー輸送による打上量減少効果

最後に、救援輸送について検討した。緊急帰還、緊急輸送による救援は、多くのケースで救援なしが最適である。ただ、地球からの救援を行う場合のみは輸送量の軽減が可能であった。また、システム信頼性の向上に伴う救援発生率の低下により更なる輸送量低減が可能である。この効果を図 7 に示す。

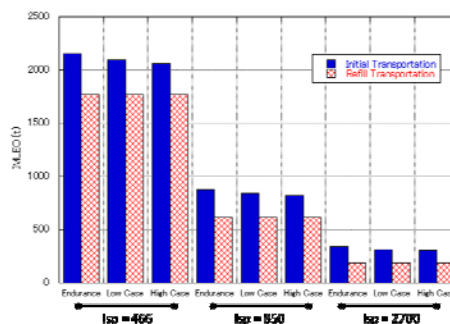


図 7. 信頼性向上による救援輸送量低下

これらより、持続的火星滞在のためには ISRU の実現が強く求められる。また、Isp=850 程度の原子力推進の開発も ISRU と同等の輸送量を実現できる。Cycler 輸送は、ISRU および高 Isp 推進と併用することにより補給輸送量を 200t 前後とできるが、初期輸送量の増加を招くため適用には注意を要する。

3.2 さらに輸送量の削減に向けて

ISRUによる輸送量の削減を行う場合、水を無尽蔵に利用したとしてもクルーの往路輸送に要する質量が下限となる。それに対し Isp の向上は火星での物資消費量が制約となる。図 8 に、さらに Isp を向上した場合の結果を示す。Isp=10000 程度で推進剤量はほぼ無視できる値になる。この時の輸送量は 100t 程度であるが、ECLSS 再生率の向上により消耗品消費を抑える事で補給時 IMLEO を 50t 以下まで抑える事が出来る。

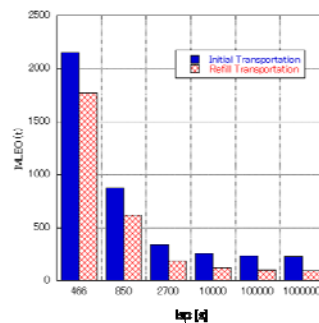


図 8. Isp の更なる向上の効果

3.3 水採取の可能性と効果

水を火星で調達できれば、クルーの生命維持、帰還推進剤への使用により輸送量の削減が可能である。しかし、これまでの探査の結果、地表には水が露出した地点は存在しないとされており、地下から採掘する必要があると考えられる。そのため、採掘機材の質量によって水採取の可否を判断する事が求められる。

帰還推進剤の補給を ISRU で行う場合、会合周期ごとに一定量の水を調達せねばならないため、単位時間当たりの採取量が重要である。標準条件で用いる 280t の帰還燃料を調達する場合、要求採取量は日産 0.36t 程度である。10 年間の機器寿命を想定すれば、地球からの輸送と釣り合う水採取システムの質量上限は 1000t 程度である。

ただし、酸素採取によっても帰還推進剤の確保が可能である。そのため、水および酸素の採取システムの構成によっては水発見時にも酸素 ISRU のみを行う事が有効となるケースも考えられる。

4. 結論

- ✓ 持続的な有人火星滞在を目的としたシステムアーキテクチャを構築し、低軌道打上量を評価する事で将来の技術開発の効果を定量的に示した。
- ✓ 火星持続的滞在には現在の年間低軌道輸送量の 10 倍以上の資材が必要であるが、水の採取もしくは Isp=2700 の原子力推進の実用化により輸送量を 20%程度に削減できる事を明らかにした。
- ✓ Cyclers 輸送により補給輸送量を 60%程度にできるが、Isp 向上、ISRU との相乗効果は限定的である事を示した。
- ✓ 火星における水採取プラントに、日産 0.36t の能力および最大 1000t 以内のシステム構築が必要である事を明らかにした。