

なぜ、ISAS/JAXA は深宇宙 OTV（軌道間輸送機）をやらなければならないのか？

2023/06/16

深宇宙 OTV 検討チーム [武井 悠人](#)

1. はやぶさ 2 が開いた扉と「深宇宙 OTV」

はやぶさ 2 精密着陸が開いた 2 つの扉

2019 年に小惑星探査機はやぶさ 2 が達成した二度の精密着陸（1m および 0.6m 精度）は将来の深宇宙探査を左右する 2 つの扉を開いた（図 1）。小惑星の自然地形を協力物体化することによって地球距離 3 億 km の彼方で成立した小惑星着陸は、実質的に「史上初の深宇宙ランデブードッキング（RVD）技術実証成功」であったと捉えている[1]。これが大きな 1 つ目の扉であり、惑星間往復航行技術と並び、日本が保有する大きな競争力である。加えて二度目の着陸実施に際しては「期待される科学成果の多寡」と「初回採取試料の喪失リスク」を天秤にかけた研究所規模の意思決定を要した。もし仮に「地球と小惑星の往還を担う輸送機」と「サンプル採取を担う着陸機」が別の宇宙機だったら？その場合、初回着陸時に採取した試料を輸送機へ事前に引き渡しておくことで、第 2 回着陸時の喪失リスクは解消される。この様に、従来はロケット打上げのみを指していた「輸送」の範囲を探査対象天体・軌道まで拡大し、「輸送と探査の分界点を深宇宙へと押し上げる」議論の必要性を皆が認識する契機となった。これが、大きな 2 つ目の扉であった。

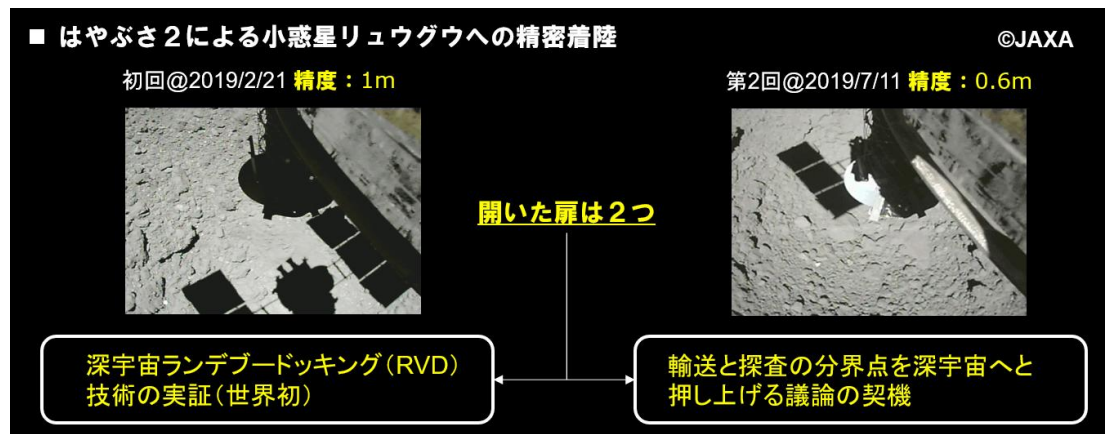


図 1 はやぶさ 2 による精密着陸が開いた 2 つの扉

扉の先に見えた「深宇宙 OTV」の概念

「輸送と探査の新しい分界点」については、図 2 をご覧いただきたい。従来ミッションで「輸送」は「打上げロケット」のみを指しており、打上げ以降の深宇宙輸送は各ミッション専用の探査機が担っていた。ここで「深宇宙輸送を担う共用性が高い輸送機」を意図する

「深宇宙 OTV^A」を導入することは、ミッション専用の探査機が「目標とする探査」にリソースを集中できることに繋がり、「より魅力的な探査機」の開発・運用を可能とする。また、共用性の高い輸送機が複数ミッションに採用されることで、各ミッションのシステム開発コスト・リスクを低減し、探査プログラム全体としての費用対効果を高めることにも繋がる。

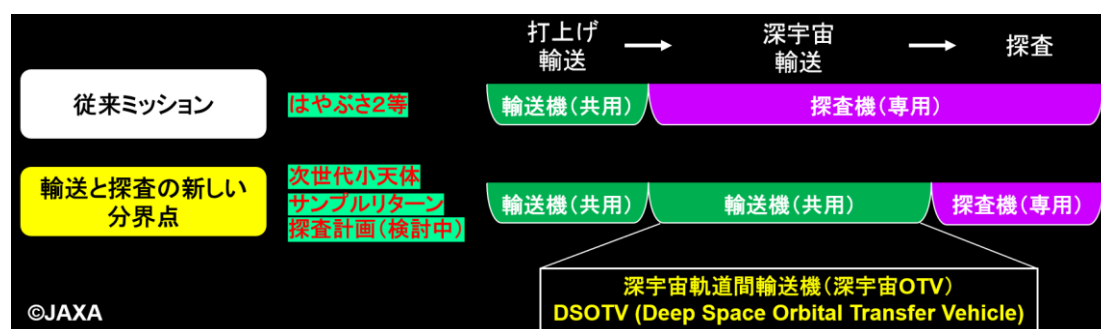


図 2 「輸送と探査の新しい分界点」の紹介と「深宇宙 OTV」の位置づけ

「深宇宙 OTV」の概念を説明するにあたり、実は「はやぶさ 2」が好例であることをご紹介したい。図 3 に示す様に、はやぶさ 2 には数多くの個性的な小型宇宙機が搭載されていた。衝突装置 (SCI) はメインミッションの切り札として、小型着陸機 MASCOT は JAXA が欧州のお客様 (DLR/CNES) よりお預かりした重要なお届け物として、分離カメラ DCAM や 3 機のローバーは低リスクで大きな情報源となる飛び道具として、小惑星リュウグウ探査の大きな一翼を担う「ミッション専用の探査機」であった。はやぶさ 2 本体のうち、深宇宙巡航を担った宇宙機バスは、まさに惑星間往復とリュウグウ上空での軌道維持を担った「輸送機」であった。この「輸送機」には数々の「内部ペイロード」が搭載されており、リュウグウ滞在時には上空から遠隔科学観測や小型機との通信を担った。これらの役割分担は、「深宇宙 OTV」そのものである。

はやぶさ 2 では「深宇宙輸送」と「リュウグウ試料採取」の両方を同じ機体が担ったが、前述した複数地点着陸の難しさや、重力天体のサンプルリターンを考えると限界が見える。そこで、次世代小天体サンプルリターン探査計画では、共用の「惑星間輸送を担う親機（深宇宙 OTV）」と専用の「着陸・サンプル採取を担う小型子機」から為る探査システムを検討している。親機・子機間での接近、再結合、サンプル受け渡しを想定しており、まさに「はやぶさ 2」が切り拓いた「深宇宙 RVD 技術」が鍵となる。この様に、はやぶさ 2 が開いた扉の先に見えた「深宇宙 OTV」の概念を具現化する取り組みを ISAS/JAXA を中心としたチームで進めている。

^A 「深宇宙 OTV」の後半は Orbital Transfer Vehicle の略で「軌道間輸送機」を意味する。深宇宙 (Deep Space) を含めた略称として「DSOTV」と記載することもある。

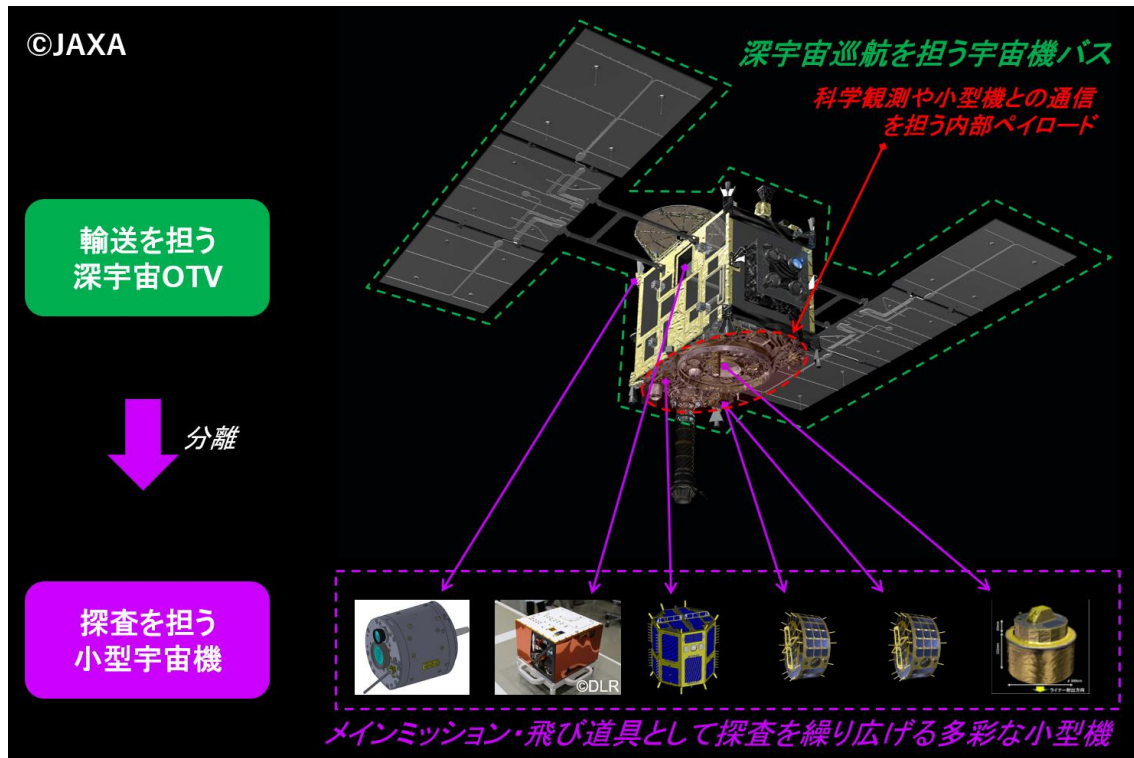


図 3 「はやぶさ 2」に見る「深宇宙 OTV」としての要素

2. 輸送の歴史から見る「深宇宙 OTV」の必然

人類の輸送史

輸送の歴史と言っても過言ではない人類史を振り返ると[1]、輸送は材料・製品などの運搬の必要から人類の発達とともに始まってきた。大河・海洋の沿岸に古代文明が芽生え、困難な陸上の運輸に代わって河・海を利用する海上輸送が考えられた（最古の船の記録は古代エジプトの花瓶に刻まれた船）。海洋を制した国家が主導権を握った古代国家の時代を経て、中世欧州のハンザ同盟は海上輸送を握って欧州海港の商業を独占した。東西の新しい海上ルートを模索する大航海時代を経て大洋航路を取る船舶の大型化が進み、産業革命以降における動力の獲得・革新によって船舶の更なる大型・高速化が進んだ。陸上の輸送手段としては紀元前 3500 年ころの儀礼的・軍事的な車から始まり、ローマ帝国時代には石畳の道路が整備されるも中世欧州の封建社会では発展が停滞した。18 世紀以降の道路の改良と軌道の発明、蒸気・内燃機関の登場、ゴムタイヤの発明、電気力の利用によって車と鉄道の現代の形が生まれていった。航空輸送は 1903 年の航空機による初飛行から 120 年、宇宙輸送は 1958 年の初地球周回軌道投入から 65 年、深宇宙輸送に至っては 1971 年の初地球外惑星周回軌道投入から 42 年と、陸・海上輸送と比して歴史は短い。

アナロジー

輸送の歴史をアナログカルに俯瞰すると、前述した「輸送と探査の新しい分界点」に相当する出来事が伺える[3]。

- 江戸時代には内航定期航路の廻船が発達し、廻船業者による定期航路の発生により、荷主である商人が自ら船を所有・運航する必要がなくなり、運賃を払うことで品物を運ぶことができるという、「荷主と海運業の分離」が起こった。
- 「荷主と海運業の分離」は保険の考え方を生み出し、14世紀の欧州では航海が失敗した際には金融業者が積荷の代金を支払い、航海が成功したときには金融業者に手数料を支払う仕組みをイタリア商人たちが考案し、後の海上保険に発展したと言われる。

前者は設備投資をサービスへと転換し、後者は海上危険の「リスク対策」[4]を可能としたことで、リスクを伴う輸送の敷居(コスト)を下げ、海上輸送量の増加へと繋がっていった。

他方、人類史上の技術革新も輸送コスト低下および輸送量増加を牽引し、事例は枚挙にいとまがない。各輸送システム個別の性能向上(速度、積載量、耐久性、燃費、寿命、生産コスト等)だけでなく、複数の輸送目的に使用可能かつ量産によって輸送システム製品としての単価も下げる「高共用性」が磨かれた。また、貨物の「規格化・モジュール化」の進展は異なる輸送システム間での貨物の受け渡しを円滑化し、コンテナ輸送^B等の領域で国際規格化が進められた。加えて、旅客・貨物の再積載と燃料等の再補給によって単一の輸送システムを繰り返し運用する「再使用性」も追求され、各輸送システムの運用に必要なインフラ(道路、軌道、港湾等の補給拠点、測位システム、法制度^C、保険等)の整備も伴った。

「深宇宙 OTV」の必然性

以上から、深宇宙輸送においても以下のプロセス

- ① 「荷主と輸送業の分離」つまり「探査と輸送の分離」による新しい分界点の定義
- ② 「高共用性」を有し、多様なミッションの深宇宙巡航を担える標準輸送機の登場
- ③ 「規格化」された貨物・インターフェースによる複数輸送過程の円滑な中継
- ④ 「再使用」輸送過程を含む軌道間輸送インフラの構築

を経ることによって、深宇宙への輸送コストを下げ、潜在的な需要を喚起し、輸送量の増加に繋がることが自然と類推できる。人類が切り拓いた輸送の歴史をアナログカルに俯瞰すると、はやぶさ2が端緒を開いた「深宇宙 OTV」という次のステップには必然性を感じる。

^B 1950年代に確立されたセルガイド方式によるコンテナは、1970年代に世界中で採用され、第三次産業革命以降の大量輸送社会に大きく貢献した[3]。バルク輸送とその他を差し引くと、2019年の日本の国際海上荷動き量の22%をコンテナ輸送が担っている[5]。

^C イギリスにおける1844年の鉄道法が「低運賃で三等の有蓋車両を運行すること」を鉄道会社に義務づけたことで鉄道の大衆利用が加速した事例[3]など、「法制度」も重要なインフラであり、輸送需要に感度を持つ整備対象として忘れてはならない。

3. 日本の深宇宙 OTV が世界に先駆ける意義

ベンチマーキング

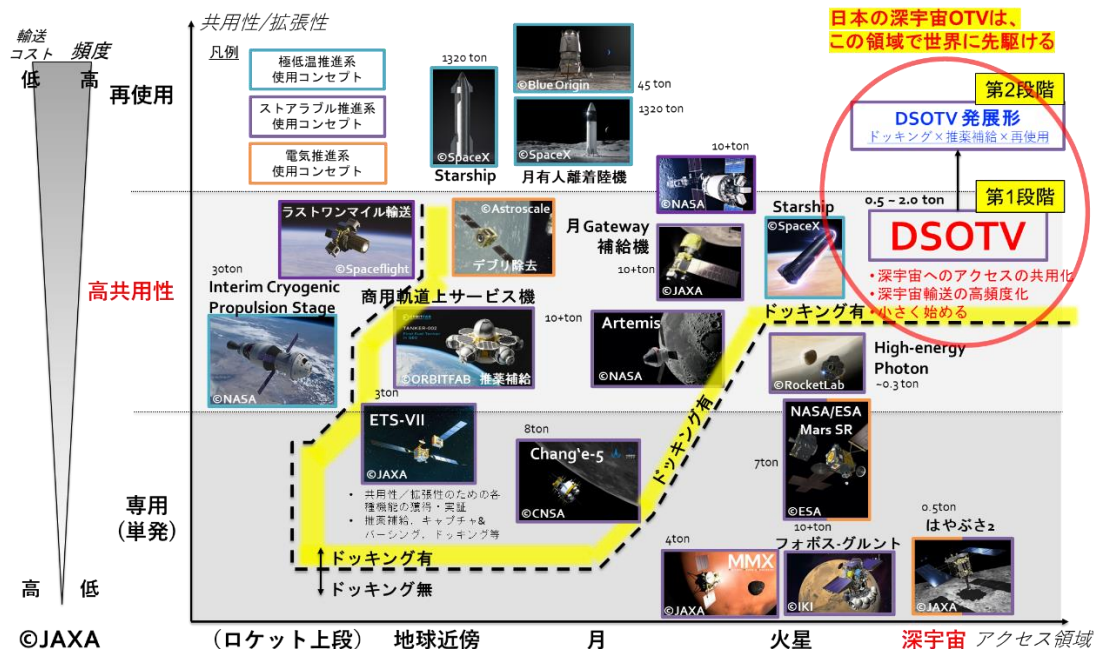


図 4 日本の深宇宙 OTV が世界に先駆ける領域

軌道間輸送機 (OTV) の概念自体は 20 世紀の宇宙開発黎明期から存在し、例えば地球低軌道 (LEO) から静止軌道 (GEO) や月以遠など、人や貨物の軌道間輸送を目的とした多くのコンセプトスタディが行われてきた。タグボート (Tugboat: 引船) 同様の意味合いで「Space Tug (スペース・タグ)」と呼ばれることもある。図 4 において、OTV の要素を持つ国内外の代表的な宇宙機を「アクセス領域」と「共用性」の 2 軸へ整理した。2010 年代に台頭した低価格・高頻度の民間ロケット打上げによって、LEO へのライドシェア需要が高まり、2010 年代後半には LEO 上での軌道微修正 (ラストワンマイル輸送) を担う商用 OTV サービスが登場している。地球周回からシスルナ空間では機械的な再結合 (ドッキング) も前提とした高共用性・再使用輸送機が多数計画・開発されている。他方、地球圏を超えると専用 (単発) 宇宙機が多い中で、火星をターゲットとした Starship (超大型) や Photon (小型) といった共用性の高い少数の輸送機計画が進められている。小天体や外惑星をターゲットとした深宇宙ミッションでは「高共用性」を標榜する宇宙機はまだ無く、「ニッチなブルー・オーシャン」であると捉えている。この様な現状認識に基づき、ISAS/JAXA を中心として「深宇宙 OTV 第 1 段階」の「高共用性」輸送機に関する概念検討を行っており、前述した「次世代小天体サンプルリターン探査計画」の親機がこれに該当する。将来的には「深宇宙 OTV 第 2 段階」として「再使用性」の獲得が視野にある (図 5)。これは、ISAS が提唱してきた「軌道間輸送ネットワーク構想」の実現に光を当てる取り組みでもある。

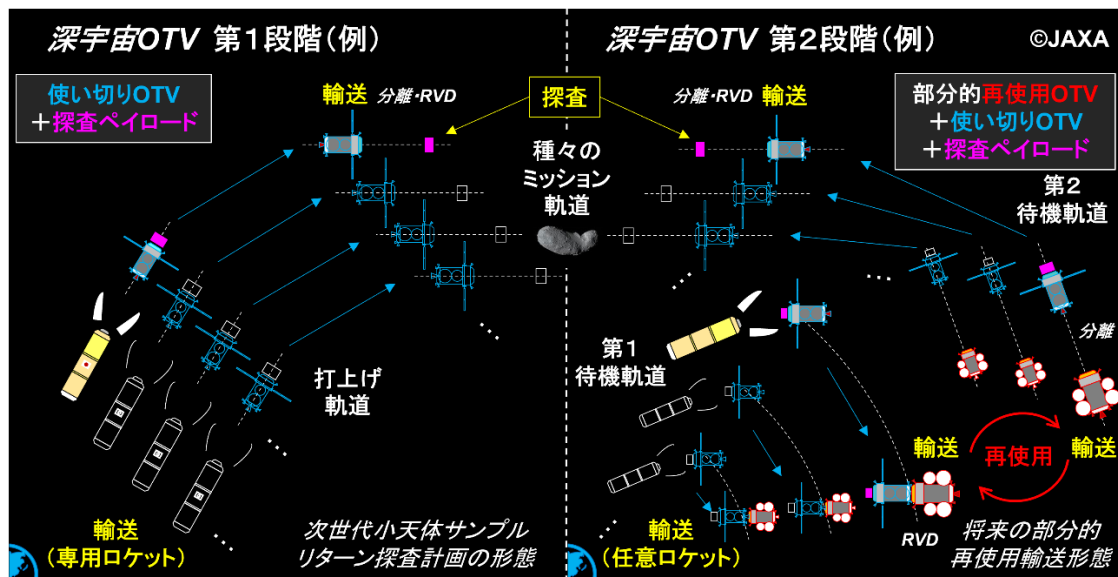


図 5 「深宇宙 OTV」第 1 段階(左)・第 2 段階(右)で想定する輸送形態の例

なぜ、ISAS/JAXA は「深宇宙 OTV」をやらなければならないのか

現在の日本の科学・探査計画は大きな岐路に立たされている。我が国の宇宙関連予算が増加基調で推移する中、複雑化・大型化するプロジェクトによって、宇宙機メーカー/JAXA 共に人的リソースが逼迫している状況にある。加えて、第一級の科学に求められる成果物の水準が高まり続ける中で、かけられるコストの増加が無邪気に許される状況にも無い。単一のミッションでコストを下げるためには「ミッション目標のデグレード」や「リスクの受容」といった厳しい選択を迫られる。この様な状況下において、第 1 段階の「深宇宙 OTV」は一つの現実的な解として「プログラムレベルでの費用対効果の最大化」に貢献する。2023 年現在、我が国の深宇宙探査事業ポートフォリオには、「科学探査」に加え「国際宇宙探査」プログラムも含まれる。将来の有人火星探査を視野に、そのスコープには無人火星探査も含まれる。ここで、ISAS が次期戦略的中型計画に向け検討を進める第 1 段階「深宇宙 OTV」が、例えば国際宇宙探査プログラム上の無人火星探査ミッションや、2030 年代の公募型小型計画による複数の深宇宙探査ミッションへと供されることを想定する。複数ミッション間における深宇宙での「輸送」部分を共通化することによって、

- コスト/リソース/技術のオーバーヘッドを減じ、注力すべき科学探査に投資できる
- JAXA およびメーカー全体のリソース逼迫状況を緩和する
- 日本のヘリテージ技術を活かしつつ、効率的に技術蓄積・産業育成できる

などの効果・効用がもたらされる。これらは「はやぶさ」から「はやぶさ 2」へもたらされたものとも通じる。各ミッションに対し、輸送機としての設計は必ずしも「最適」ではなくとも、全ミッションを包絡する開発スコープを想定した「深宇宙 OTV」の登場は、2030 年代の深宇宙探査全体として費用対効果を最大化することに貢献する。この「開発スコープの置き方」こそが最大の課題であるが、「深宇宙 OTV」は、

- 良い意味で限られたリソース下で第一級の科学成果を追い求めて磨いたシステム設計技術（機器冗長と機能冗長のベストミックス、多彩な分離モノ、自動化自律化等）
 - サバイバビリティの高い運用技術（必要十分な縮退モード、太陽光圧を駆使した探査機生存、多様な運用対処の手札等）
 - 理工一体となったミッション設計技術
- とその経験を獲得し続けてきた、ISAS/JAXA の強みを生かした、世界で ISAS/JAXA だからこそ実現できる宇宙機なのではないか。

民間パートナーと共に狙うは「世界への貢献」

加えて「深宇宙 OTV」の実現は、商用市場や新興国へと急速に裾野が広がる現代の宇宙開発において、我が国発の技術で世界の将来深宇宙ミッションサクセスへと大いに貢献し得る。地球観測・通信事業を中心として新興国や民間プレーヤーが参入する中、単独で End-to-end の深宇宙ミッション（企画/開発/打上げ/追跡）を自律的に遂行可能な国や地域は数少ない（米国、ロシア、欧州、中国、インド、日本）。惑星間「往復」航行に至っては日米のみである^D。一方、多極化が進む世界において新興国による深宇宙ミッション構想を聞く機会も増え、月以遠を目指す民間企業も現れる中、低コストかつ信頼性が高い深宇宙への輸送ニーズや、Starship 型のマス輸送では届かない月や火星への個別輸送ニーズも潜在し、今後増加し続けると予想する。ISAS/JAXA が第 1 段階の「深宇宙 OTV」を早期に実現し、民間企業へ移管するとともに、ブルー・オーシャンである深宇宙輸送サービス市場へと先駆け、民間企業主体で国内外の深宇宙ミッションサクセスへと貢献し、先行者利益を確保しつつ日本の国際影響力強化へと寄与する。この様な「アウトカム」も荒唐無稽とは言えない。

更には、2020 年代を通じて特異的に輸送コスト低下が想定される以下を例とした軌道

- 次世代の大型再使用ロケット（Starship、New Glenn 等）により、（打上げ機会の買い切りではなく他衛星との相乗りによって）軌道要素を選ばなければ LEO や GTO への輸送重量単価の大幅低下（例えば LEO において、現状の 1 万ドル/kg → 100 ドル/kg 等）が想定される。
- アルテミス計画を筆頭として開発が進むシスルナ空間の軌道として、月遷移軌道 LTO や、月ゲートウェイ基地が建設される NRHO（地球-月系ハロー軌道の一種）への輸送コスト低下が想定される。

は、第 2 段階の「深宇宙 OTV」が想定する「再使用」を実現するポテンシャルを秘める[6]。打上げ輸送ビジネスは米国民間企業によって「再使用」を武器に見事に花開き、今やレッドオーシャンの様相を呈している。月輸送ビジネスについてはまず図 6 を見て頂きたい。

^D 2023 年 6 月現在、惑星間往復航行を達成したミッションは「はやぶさ・はやぶさ 2」の 2 例のみだが、米国「OSIRIS-REx」が 2023 年 9 月の地球帰還を目指して巡航中。

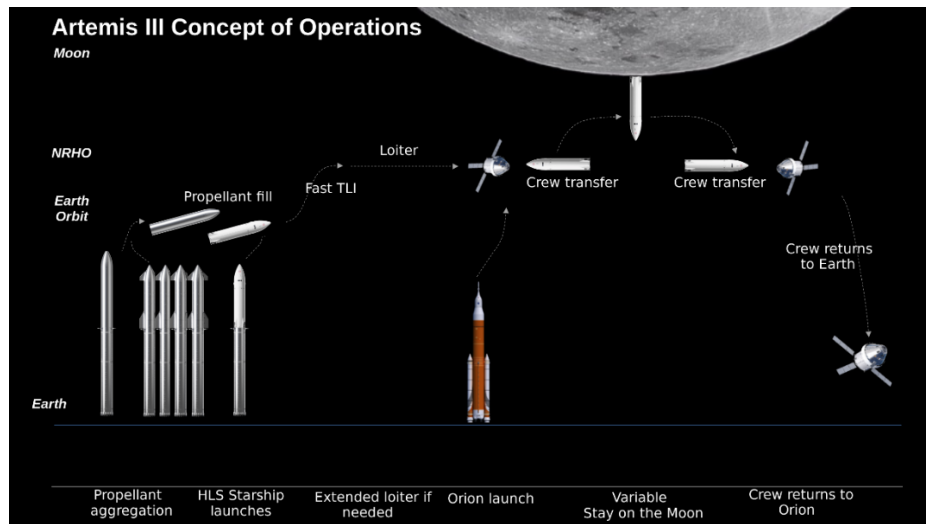


図 6 Artemis 3 ミッションの運用コンセプト (NASA Website より引用^{E)})

SpaceX 社の Starship が Human Landing System (HLS)として選定された米国の Artemis 3 ミッションにおいて、LEO 上での Starship 型 HLS に対する推薬補給、NRHO 上でのクルー移乗 (Orion↔Gateway↔HLS) という形で「再使用」を含んだ輸送アーキテクチャ・インフラが構築される計画である。更に Artemis 5 ミッションの HLS として Blue Origin 社が率いる Blue Moon 計画が選定されるなど、月輸送過程へ「再使用」が組み込まれる世界は Artemis 3~5 で実装されつつあり、夢物語ではない上に競争環境すら構築されつつある。

では、深宇宙輸送ビジネスはどうか。未だ海の物とも山の物ともつかないと思われるかもしれないが、日本には世界に先駆けて獲得したアドバンテージ (技術、人材、経験、インフラ、ビジョン) がある。深宇宙 OTV 第 1 段階の早期実現と並行して第 2 段階のアーキテクチャ検討を進め、総合して深宇宙輸送ビジネスの観点でも現実的な解を見出し、必要となる技術を見定めて研究開発し、民間パートナーとの関係を構築・技術移転を進め、日本を中心とした民間事業が世界の深宇宙輸送へ大きく貢献する未来を掴みたい。拡がり続ける宇宙産業の裾野の一部に、直接日本社会へ貢献する以下の様な事例も育つことを願って。

地球・月・火星・小天体を往還する惑星間輸送事業が起き、
自然災害に強い日本の地方都市に運用センターを開設・雇用を創出し、
年に 1 機のペースで新たな深宇宙 OTV を打上げるとともに、
国内外の顧客から預かった貨物を同時に最大 10 機の惑星間航行に載せて、
世界の深宇宙通信アンテナを駆使して国際色豊かな約 200 名のスタッフで運用し、
第一級の科学成果創出から有人拠点への持続的な物資補給までもを強力に支える。

^E K. Chojnacki, “HUMAN LANDING SYSTEM”, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220003725/downloads/22%203%207%20Kent%20IEEE%20paper.pdf>

参考文献

- [1] [Y. Takei et al., “The Deep Space Orbital Transfer Vehicle Inspired by the Hayabusa2 Technology”, Journal of Evolving Space Activities, 1\(40\), 2023](#)
- [2] [村松定次郎, “技術史ノート 12: 輸送の歴史”, 生産研究, 2\(12\), 518–519, 1950](#)
- [3] [国土交通省, “世界における多様なイノベーションの歴史”, 平成 28 年度国土交通白書, 第 I 部 第 1 章 第 3 節-1, 2017](#)
- [4] [若土正史, “大航海時代におけるポルトガル「インド航路」の海上保険と日本の投銀の接点”, 保険学雑誌, 642, 173-201, 2018](#)
- [5] [生田瑛穂, “港湾用語の基礎知識 115”, 港湾, 2021.11, 46, 2021](#)
- [6] [Y. Takei et al., “Redefining low Earth orbit as a parking orbit for flexible and economical Earth departure in deep space missions”, Frontiers in Space Technologies, 3\(1049262\), 2022](#)