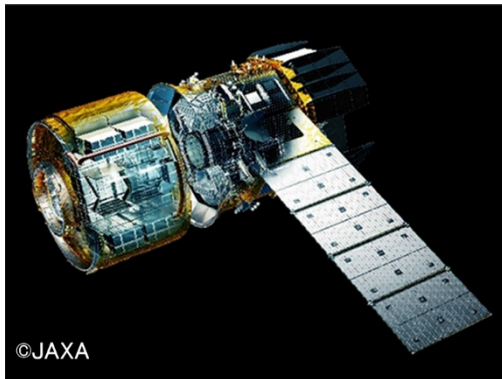


新型宇宙ステーション補給機 HTV-X 開発状況と今後の展望

HTV-X Development Status and Future Plan



辻田 大輔^{*1}
Daisuke Tsujita

藤原 哲^{*2}
Satoshi Fujiwara

内田 岳志^{*2}
Takeshi Uchida

仲嶋 淳^{*3}
Atsushi Nakajima

新型宇宙ステーション補給機(HTV-X)は現在、詳細設計が完了、機体製造に着手され、HTV-X 1号機打上げに向けて着実に開発が進められている。HTV-X 設計の要点の一つに、多様化したカーゴ要求への対応があり、これに対し、当社は、詳細設計にて機体形態制約に即した設計工夫や段階的な試作試験等を行い、成立性を確認した。HTV-Xは国際宇宙ステーションへの補給を行うとともに、その発展型を用いて、米国中心に進められている月周回有人拠点(Gateway)に物資補給で貢献する構想が検討されている。本報では、HTV-Xの開発概況、詳細設計結果及び将来への発展型構想に関する取組みを紹介する。

1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)の2024年までの運用延長を受け、宇宙ステーション補給機(HTV)の後継機として、新型宇宙ステーション補給機(HTV-X)の開発を行っている。2022年度にHTV-X 1号機をH3ロケットへ搭載して打上げる予定である⁽¹⁾。

HTV-Xは、HTVと同様に、高信頼性の機体で定期的に物資補給を行い、ISS運用に対する共通システム運用経費分担を果たすことを目的としている。しかしながら、HTV開発当時の周辺状況変化として、米国NASAが2019年より開始した商業補給サービスCRS2(Commercial Resupply Service 2)プログラムで選定された民間補給機3機(Cygnus, Dragon, Dream Chaser)が、小動物等の様々な輸送制約があるカーゴ需要に対応できる能力を有することから、カーゴ要求が多様化している。これを受け、HTV-Xも、民間補給機能力のベンチマーク分析を行い、最大の与圧・曝露カーゴ搭載容積を持ち、船内用大型ラックを唯一輸送・廃棄できる等、同等以上のサービスを提供する開発仕様になっている(表1)。

現在、HTV-Xは詳細設計を終えて、物資補給機として最重要な役割であるカーゴ輸送を含めた、システム要求に対する成立性を確認し、機体製造に着手している。本報では、2章でHTV-X機体概要及び開発状況を説明した上で、3章でカーゴ要求に対する詳細設計結果、4章で国際宇宙探査へのHTV-X適用に関する今後の展望を報告する。

*1 防衛・宇宙セグメント 宇宙事業部 技術部 主席技師 技術士(航空・宇宙部門)

*2 防衛・宇宙セグメント 宇宙事業部 技術部 主席技師

*3 防衛・宇宙セグメント 宇宙事業部 主席プロジェクト統括

表1 ISS 補給機の能力及びサービス比較

項目	日本の補給機	米国 商業補給サービス(CRS 2)選定の民間補給機			(参考) CRS2 要求
	HTV-X	Cygnus (Northrop Grumman 社)	Dragon (Space X 社)	Dream Chaser (SNC 社)	
外観					—
搭載・廃棄能力 (与圧・曝露合計)	◎5,820kg【No.1】	3 754kg	3 307kg	5 500kg	—
与圧カーゴ 搭載量・種類	○4070kg ◎特長:大型ラック ⁽¹⁾ 輸 送・廃棄【Only1】	3 754kg	2 507kg	5 000kg	2 500～5 000kg
曝露カーゴ 搭載量・種類	◎1 750kg, 4個 ◎特長:大型カーゴ搭 載【No.1】	廃棄のみ対応	800kg	1 500kg	500～1 500kg (1～3個)
与圧カーゴ 回収能力	△HTV7 搭載と同じ小 型回収カプセルで 対応可能	不可	可能	可能	1,500kg
カーゴサービス	—	—	—	—	—
レイトアクセス カーゴ ⁽³⁾ の 引渡し時期, 搭載量	L- 24hr ○給電カーゴ 2CTB ⁽²⁾ 相当+カーゴ 3CTB メインハッチ部に搭 載	L-24hr 対応可能 総量不明(給電カーゴ 4CTB 含む)メインハッ チ部に搭載	L-24hr 標準カーゴ 5CTB 程度 サイドハッチ部 に搭載	引渡しタイミング 不明 搭載量不明 サイドハッチ部 に搭載	L-24hr, 6～10CTB
給電カーゴ ⁽⁴⁾ への リソース提供	○28V 給電, 75W/Ch, 2ch Ethernet 通信	75W/Ch, 4Ch, RS-422/RS-485 通信	28V 給電, 75W/Ch, 6Ch 1553B/Ethernet /RS422 通信	給電・通信可能 (詳細不明)	—

(凡例) ◎:No.1, Only 1 レベル, ○:他と同等, △:他より劣る

補足 1) 大型ラック:カーゴ搭載用の国際標準タイプのラック, 2m×1.05m×0.86m)を ISS 内で
組み立てることなく運搬/廃棄可能なのは HTV-X のみ

補足 2) CTB: カーゴ標準バック

補足 3) レイトアクセスカーゴ:打上げ直前に搭載するカーゴ

補足 4) 給電カーゴ:電力供給が必要な与圧カーゴ

JAXA 提供

2. HTV-X 開発状況概要

(1) 機体概要

HTV から HTV-X の変更点を図1に示す。4つのモジュールから構成されている HTV に対し, HTV-X は船内物資(与圧カーゴ)を収納する与圧モジュール(PM)と, 曝露カーゴ搭載機能及び飛行機能を集約したサービスモジュール(SM)の2つのモジュールで構成される。HTV と異なり, PM を下部(ロケット側)にして, SM を上部に配置することで, SM 構造軽量化を実現し, 輸送能力を向上している⁽²⁾。

さらに, HTV-X はカーゴ輸送に加えて, 軌道上実証機会提供サービスを実施する能力を持つ。実験機器は SM 上部に曝露カーゴと混載することを基本とするが, 実験機器要求に応じてその他エリアへの搭載も柔軟に対応可能である。ISS への物資補給を終えて ISS 離脱後から再突入までの間, 最大 1.5 年間の実験機会を提供することができる(図2)。

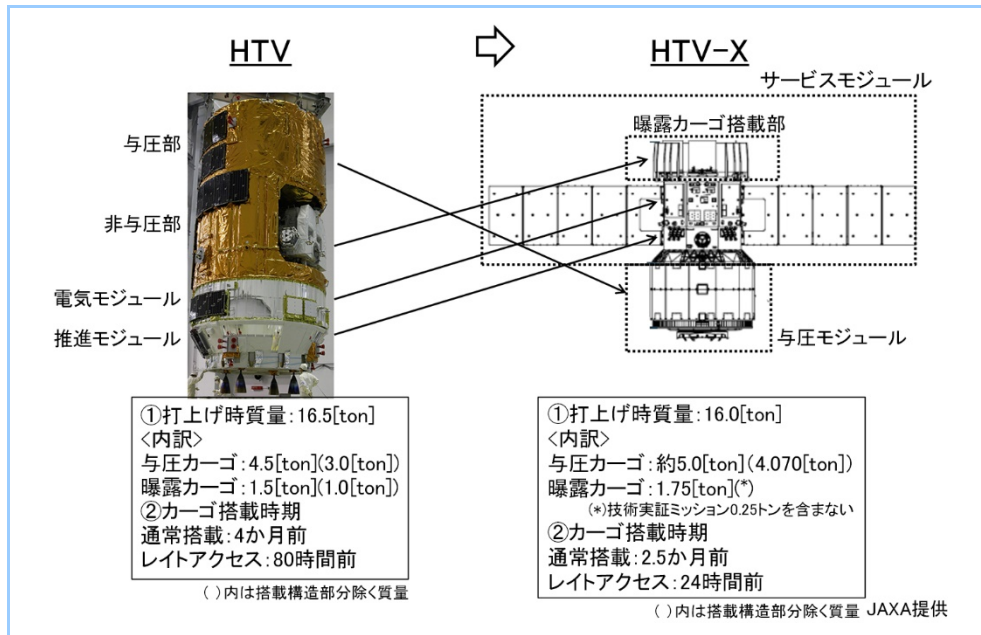


図1 HTV-X 機体概要

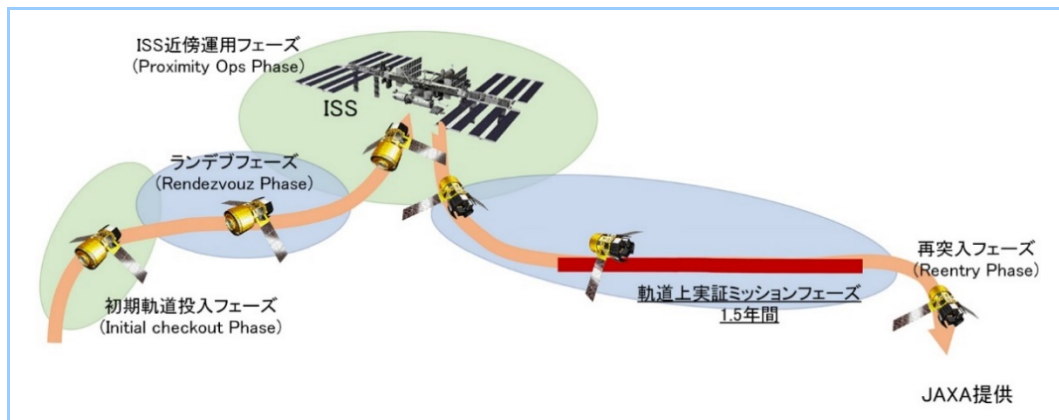


図2 HTV-X 運用概要

(2) 開発状況概要

開発体制を図3に示す。当社は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)からの開発請負契約の下、HTV-X のシステム(システム設計、カーゴ・実験機器搭載、射場作業、運用準備)及び与圧モジュール(PM)の開発を担当している。サービスモジュール(SM)の開発は、三菱電機株式会社が担当している。

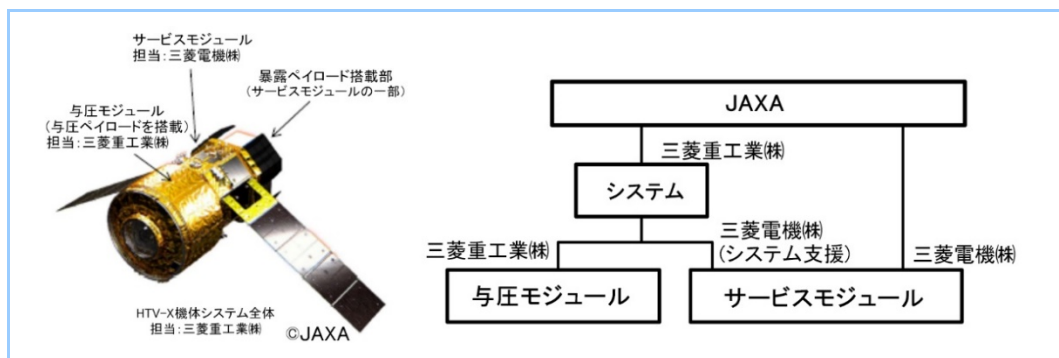


図3 HTV-X 開発体制

ミッション要求・システム仕様を満足可能な詳細設計を完了し、維持設計フェーズに移行している。これより、PM 及び SM は順次、構成品の製造に着手している。並行して、システム担当として、PM/SM を結合した全機形態の検証を行うシステム試験・打上げ前の射場作業の計画及

び各運用文書の詳細化を進めている。

また、2020年にJAXAがHTV-X 1号機の搭載機器を選定したことを受けて、HTV-Xへの搭載設計を開始した。実験機器によって飛行高度・姿勢等の条件が異なるため、ISS離脱後、順番に各実験を行う計画にしている(図4)。現在、実験機器搭載対応の設計審査を終え、製造に着手するとともに、実験機器/HTV-X間のインタフェース試験の準備を進めている。

なお、コロナ禍に伴う部品入手性の悪化及び面直制約に対しては、開発計画を維持するために、工程組替え・工程変更やIT技術利用による各種会議のリモート化等に配慮して対応している。

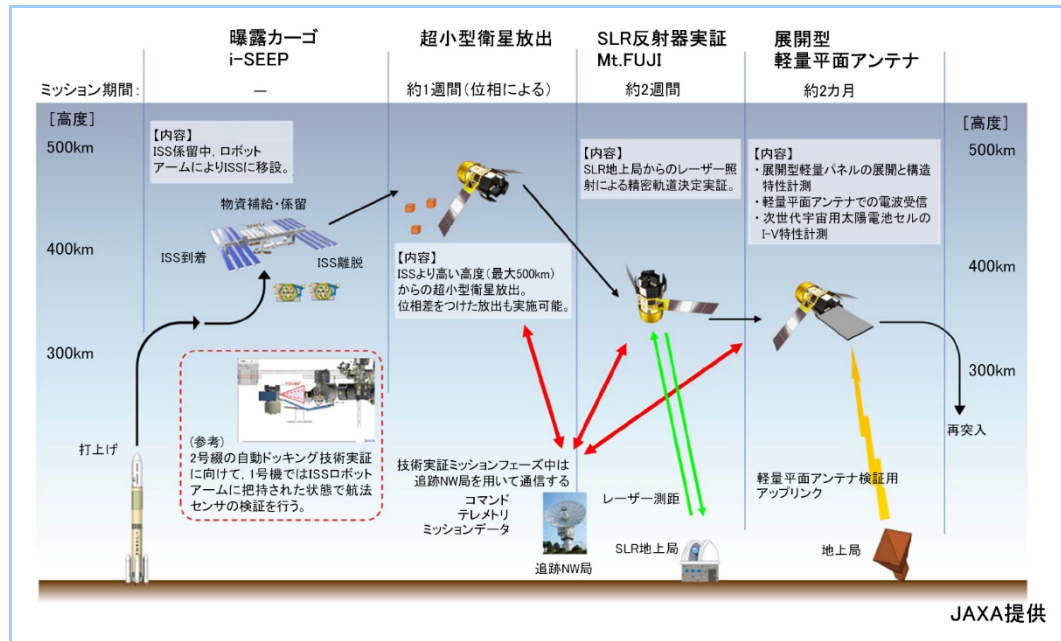


図4 HTV-X 1号機 軌道上実証実験計画

3. カーゴ要求に対する詳細設計結果

3.1 カーゴ搭載

(1) カーゴ搭載計画

PMは、容積 39m^3 の与圧空間を有し、標準バックサイズのカーゴを最大313個搭載できる。小動物輸送装置のような電力供給が必要なカーゴ(以降、給電カーゴ)は、最大2個搭載できる。数量が多いため、全てのカーゴを搭載する作業は、数週間かかる。したがって、給電カーゴを含む時間制約があるカーゴ向けに、射場作業中のカーゴ搭載タイミングを計3回に分けている。

1回目は、PM単体形態時にノーマルアクセスとして、大多数のカーゴを搭載する。2, 3回目は、HTV-X全機結合後にロケットに搭載した形態で時間制約があるカーゴを搭載する。これをレイトアクセスと呼び、それぞれ打上げ3日前と24時間前にカーゴを受領して搭載する計画としている(図5)。

HTV-Xは、HTVと異なり、与圧カーゴを搭載するPMが下部にあるので、レイトアクセスを行うため、ロケットフェアリング及びペイロード用アダプタ(Payload Attach Fitting: PAF)に開口部を設けて、PM下方からアクセスできる設計としている(図5)。

打上げ24時間前のレイトアクセスでは、カーゴ搭載だけではなく、ハッチ閉後の漏洩点検や外部艀装の最終点検等のフライト最終形態化作業を実施する。ロケットが射点移動開始前までに作業完了するため、漏洩点検手法の変更や外部艀装品の削減等の工夫を行い、作業時間の短縮を図っている。さらに、レイトアクセス中の手順ミス等の不具合に伴う打上げ遅延リスクを低減するため、PM及び地上支援装置を用いたレイトアクセスデモを行う計画としている。

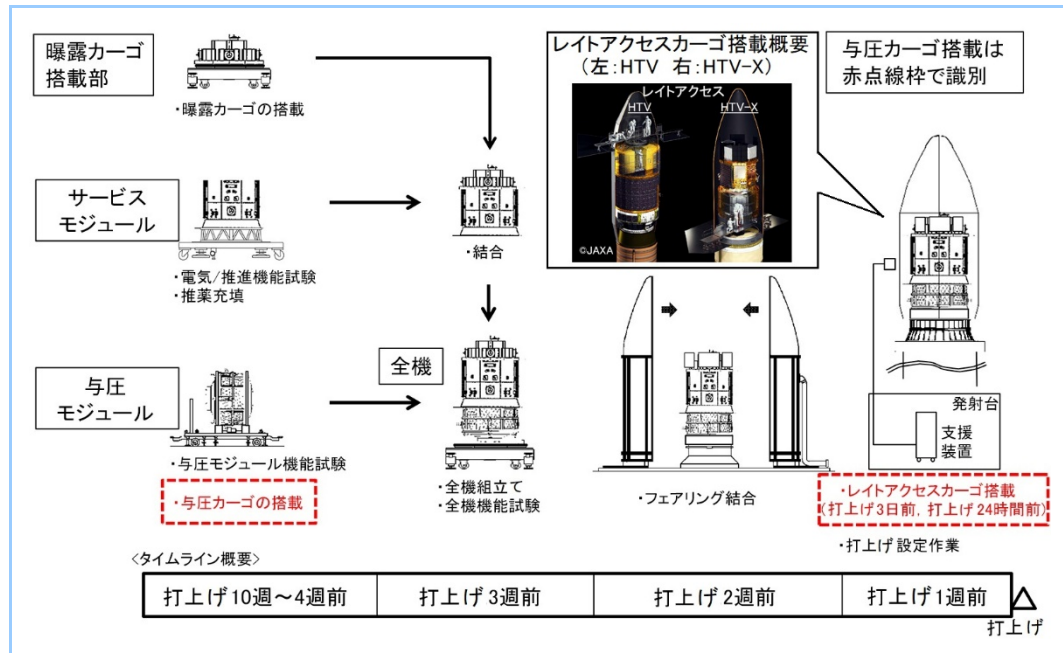


図5 HTV-X 射場作業およびレイトアクセスカーゴ搭載作業の概要

(2) 搭載レイアウト設計

給電カーゴ等のレイトアクセス用カーゴは、打上げ直前までカーゴユーザ側のチェックアウト/梱包作業が行われる。これに伴う時間制約を満たすため、全てのカーゴの中で最後に搭載できるように、ハッチに最も近い位置に配置している(図6)。配置設計では、ハッチ開閉の妨げにならないように、PM 中央の通路空間に、新規に搭載用構造を設け、軌道上での取り出し後は通路空間を確保できるように着脱可能な設計とした。また、軌道上で宇宙飛行士が着脱することやレイトアクセス時の作業時間短縮のために、ボルト/ナットによる固定ではなく操作が単純なロックピン方式による固定を採用している。本設計により、ISS 到着後に宇宙飛行士が最初にアクセスすることができ、地上での荷受けから軌道上での取り出しまでのプロセスの最短化を実現している。

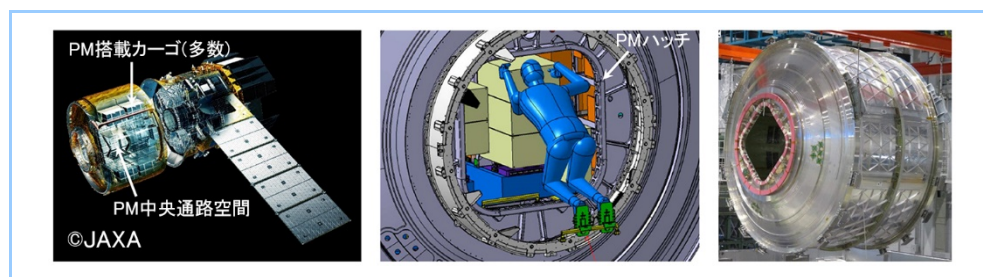


図6 与圧カーゴ搭載形態(左:PM 透視図, 中央:PM ハッチアクセス作業, 右:HTV-X1 PM 主構造)

(3) 地上支援装置 (GSE; Ground Support Equipment) 開発

レイトアクセスは、フェアリング/PAF の開口部から入り込み、ロケットとPM 間の狭い空間で行う作業である。これらの作業を実現するために、以下のような地上支援装置(GSE)を開発している。

- ・ロケットに直接乗ることはできないため、短時間で容易に設置/撤去ができ、複数名の作業者が乗れる作業足場。
- ・フェアリングの小さな開口部から、最大 90kg のカーゴを搬入するためのカーゴ搬入装置。
- ・作業足場上の狭小空間で、1m×1m の PM ハッチを通して、最大 90kg のカーゴを持ち上げるためのリフター。

特に、カーゴを持ち上げての搭載作業は HTV でも経験がないため、リフターの試作品及び HTV-X PM の実物大モックアップ(模型)を製作し、実作業者也参加して、試作試験を実施した(図7)。リフター上のカーゴを搭載用構造に押し込む際のリフター転倒防止用に固定部を設ける等、GSE 設計への反映事項を抽出することができた。

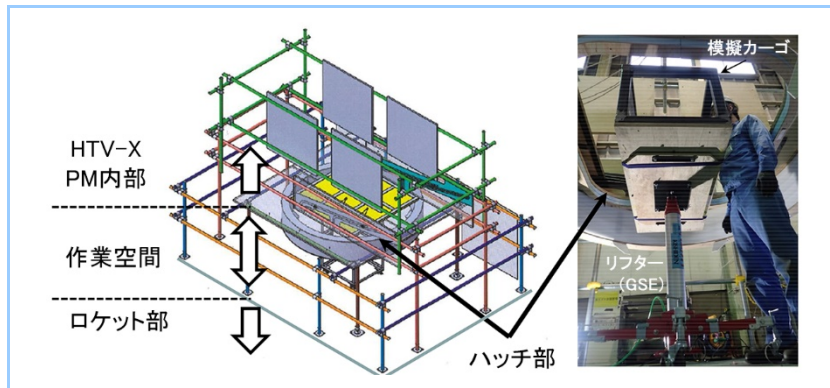


図7 カーゴリフトアップ試作試験(左:PM 実物大モックアップ外観, 右:リフトアップ作業写真)

3.2 カーゴ給電

給電カーゴの作動電力を、PM の制御コントローラ(CCU:Cabin Control Unit)から給電する。給電機能に対して、NASA は、様々なカーゴに広く対応するため、厳しい電源品質要求を課している。

CCU 内部の DC/DC コンバータについて、既成品(市販の宇宙用部品)では、電源品質特性(インピーダンス、電源ノイズ、インラッシュ特性等)要求に対応していないので、HTV-X 専用の DC/DC コンバータを新規開発した。開発手戻りを防止するため、以下の3段階開発を行った。

- ① BBM(ブレッドボードモデル):特に厳しいインピーダンス要求に対して、DC/DC コンバータの2次側出力のフィードバック回路方式の見直し・回路定数のチューニング等の対応で実現性があることを確認した。
- ② EM(エンジニアリングモデル):BBM を基に製作して、カーゴ電源特性を模擬したシミュレータとの組合せ試験を実施した。その取得データを基に NASA とインタフェース調整を行い、設計妥当性を確認している。
- ③ PFM(プロトフライトモデル):レイトアクセスは打上げ直前の作業であり、万が一のインタフェース不整合は打上げ延期に直結するので、給電カーゴと CCU の双方フライト品を使用した共同インタフェース試験を行う計画である。

3.3 カーゴ熱制御

給電カーゴは、最大 150W 強の発熱がある。HTV-X は、HTV と同様、カーゴ搭載量最大化のため、排熱装置を用いない受動熱設計を採用している。本設計制約の下、給電カーゴ自身の発熱による許容温度逸脱を防止するため、以下2点の工夫を行うことで設計成立性を確認した。

① 初期温度の低温化

通常衛星では、PAF に開口部がなく、PAF 内部とフェアリング全体の空気循環が限られるため、フェアリング空調効果は限定的になる。給電カーゴは、PM と PAF の境界部付近に搭載される点に着目して、HTV-X 対応の特有形状である PAF 開口部を解析モデルに組み込み、フェアリング空調で冷却された空気の PAF 内部循環を模擬した。解析模擬度を上げて冷却効果を追求したことにより、給電カーゴを低温化でき、成立解を導出できた(図8)。

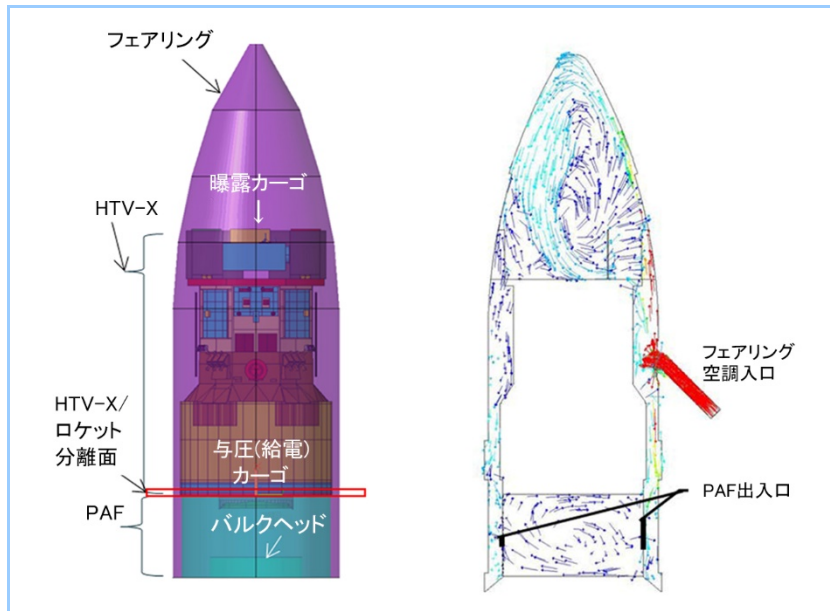


図8 フェアリング空調解析(左:解析モデル概要, 右:空調解析結果)

② 飛行中の温度上昇の抑制

HTV は太陽電池パネルをボディマウント型にして、姿勢一定の常時地球指向としていたが、HTV-X は発電効率向上のために展開型にしているので、飛行中は発電用の太陽指向姿勢と通信用の地球指向姿勢の2種類の姿勢を取る。PM は地球指向姿勢時に太陽光の照射面になることがあり、給電カーゴ温度を上昇させる。HTV と同様の常時地球指向の単純条件は、過剰に厳しい評価になるため、実運用の飛行姿勢シーケンス条件を反映して、熱解析条件をより実環境に近い条件として、過剰なマージンを削除した。さらに、HTV と異なり、給電カーゴ近傍の PM ハッチ外部周辺の多層断熱材を取り外して、放熱性を向上させている。これらにより、給電カーゴ温度上昇を抑制でき、許容温度範囲内の温度プロファイルを導出することができた。

4. 深宇宙探査への HTV-X 適用に関する今後の展望

人類の活動領域の拡大に向け、月面での持続的な活動の実現を目指すアルテミス計画を、米国が参加各国と協力して推進している。本計画のアーキテクチャの拠点要素である月周回有人拠点“ゲートウェイ”に対して、日本が行う物資補給の貢献は、HTV-X の発展形態で実施する構想が文部科学省・宇宙開発利用部会で議論されている(図9)。

ゲートウェイでは、少なくとも建設の初期段階においては宇宙飛行士の滞在期間が最大 30 日間に限られ、常時滞在の ISS に比べて、物資補給機運用の自律化が求められる。これより、HTV-X のような宇宙飛行士操作を伴うロボットアームによる結合方式ではなく、自律的な自動ドッキング結合方式に対応しなければならない。このため、HTV-X は2号機において、自動ドッキング実証機器を搭載し、ISS との自動ドッキング実証実験を通じて技術獲得を図る計画である。

また、ゲートウェイのカーゴ補給に関しては、HTV-X 相当の与圧カーゴ量及び HTV-X の 10 倍以上の与圧カーゴ給電が求められる。前者は、カーゴ輸送量の最大化に向け、与圧構造の複合材適用による軽量化に取り組んでいる。後者は、与圧部にラジエータ等を艤装して排熱機能を付加することを検討している。

なお、アルテミス計画が進む一方で、ISS 運用延長の可能性が高まっている。2021 年6月8日、米国上院で承認された NASA 授權法案は、ISS 運用を 2024 年から 2030 年まで延長することを要請している。ISS 運用には、物資補給が必須であるため、日本が継続して HTV-X で物資補給することは十分考えられる。このような周辺状況を踏まえ、HTV-X 追加号機を想定して、上述の複合材構造や排熱機能を部分的に取り込んで事前実証することも検討している。

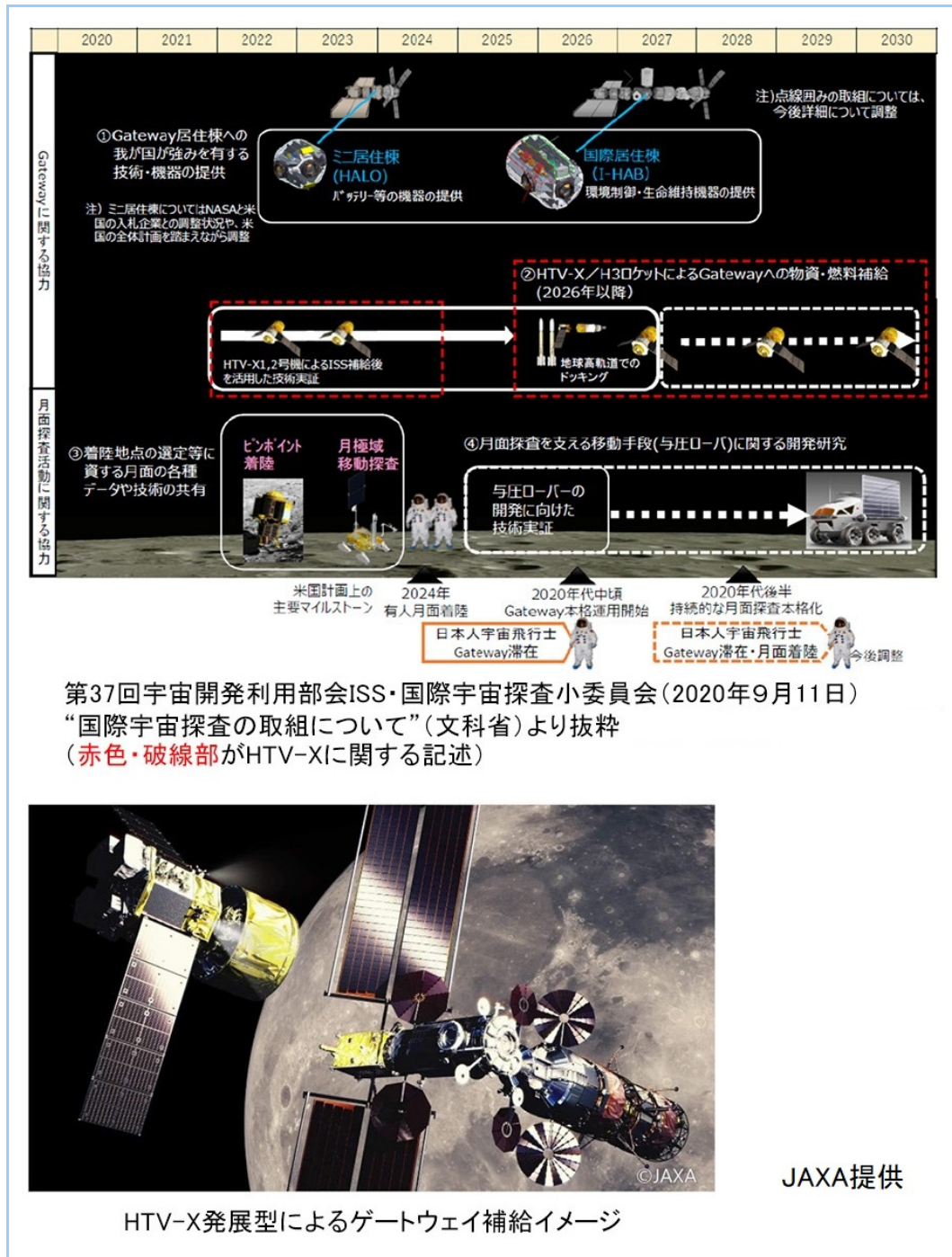


図9 宇宙開発利用部会で議論されている国際宇宙探査の取組み(左側)とHTV-X発展型によるゲートウェイ補給イメージ(右側)

5. まとめ

本報では、HTV-X が周辺状況の変化に伴い多様化するカーゴ要求に対応した詳細設計を完了し、HTV よりも発展した機体であることを紹介した。今後は、HTV-X 1号機のミッション達成に向けて、当社はPM製造を進めるとともに、システム担当として、全機形態の検証を行うシステム試験・カーゴ搭載を含む射場作業・運用文書準備を確実に実施していく。また、アルテミス計画への物資補給貢献に向けて、HTV-X による技術実証機会も活用して、必要な新規技術の検討を進め、地球低軌道から月近傍までの更なる輸送技術の発展向上に貢献していく。

参考文献

- 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会 資料 60-5(第 60 回 2021.2.9)
- 辻田大輔ほか、HTV-X の開発、三菱重工技報、Vol.56, No.1(2019)