

# 宇宙ステーション補給機 (HTV) 量産機の成果と HTV 後継機開発による将来宇宙機構想の構築

松本達也\*  
Tatsuya Matsumoto  
堀田成紀\*  
Shigeki Hotta  
中村浩四\*  
Hiroshi Nakamura

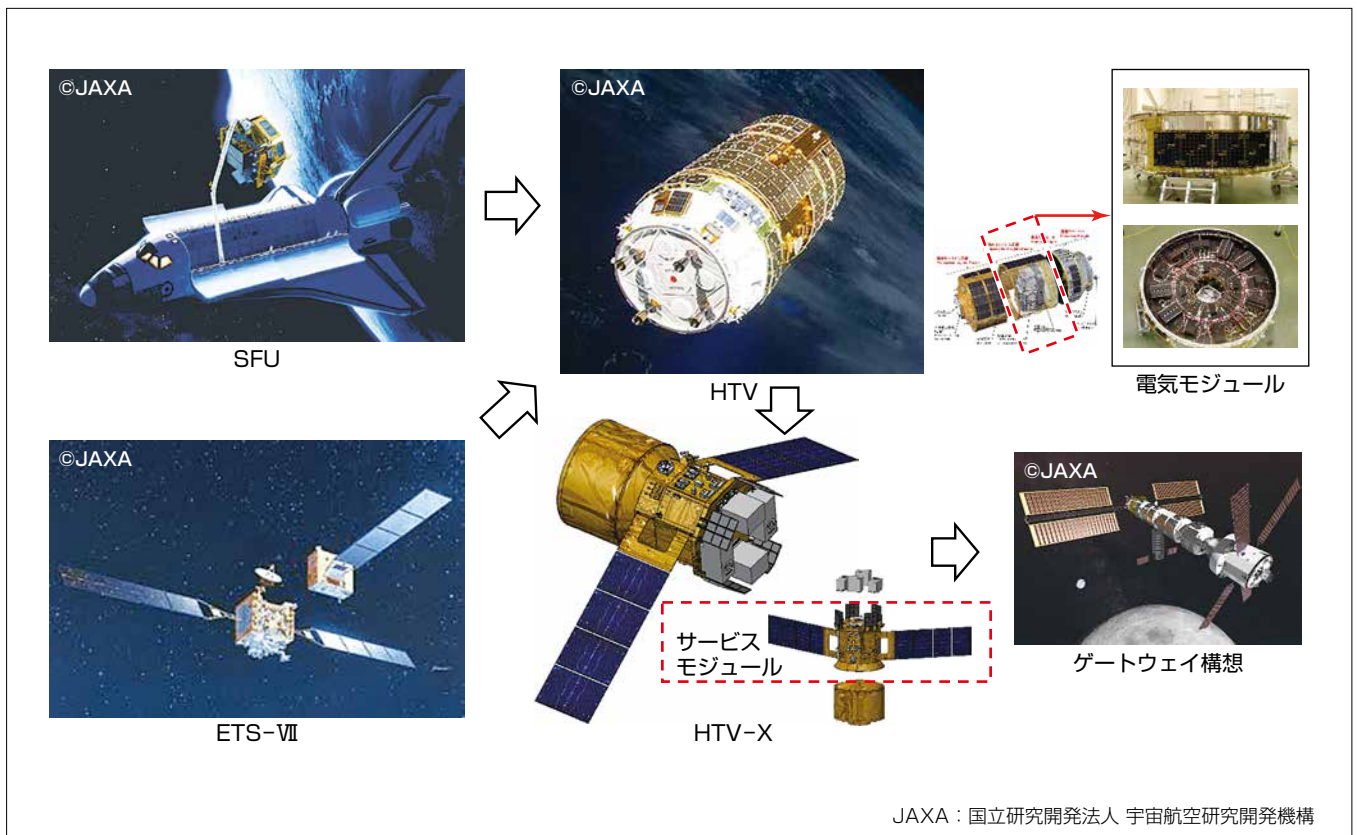
*Achievements of HTV (H-II Transfer Vehicle) and Construction of Future Spacecraft Concept by Development of HTV-X as Successor to HTV*

## 要 旨

三菱電機は、国内初の宇宙輸送量産機である“宇宙ステーション補給機 (HTV)”の電気モジュールの開発・製造試験・運用をHTV 1号機からHTV 9号機まで全て担当してきた。現在はHTV量産機の後継機になる“新型宇宙ステーション補給機 (HTV-X)”の開発に参画し、電気モジュールと推進モジュールと曝露(ばくろ)カーゴ搭載支援系を統合したサービスモジュール (SM)の開発・製造試験を担当している。

HTV-Xの開発と並行し、将来の深宇宙活動への発展化構想である月周回有人拠点(ゲートウェイ)にも、HTV-X

と当社の衛星技術をベースにした、SMの改良による有効活用と重要な役割を果たすために取り組む。宇宙輸送機を事業の柱として更に発展させ、物資輸送にとどまらずに宇宙活動拡大に向けた新たな付加価値を実現していくため、HTV量産機開発までの実績と経験に加えて当社の衛星技術も積極的に適用して、多目的な技術ミッションを達成するとともに、品質確保、コスト低減、工程短縮等の更なる改善を推進し、様々なニーズに対応できるように進化していく。



## 量産宇宙機開発の経緯・成果と将来発展化構想

NASA (National Aeronautics and Space Administration) 有人宇宙システムとのインタフェースを取り入れた実験・観測フリーフライヤ (SFU) で確立した宇宙機システム技術と、技術試験衛星Ⅶ (ETS-Ⅶ) によるランデブッキングの軌道上実証実験の成果を融合し、HTVでは当社初の宇宙機量産化を事業化した。HTV量産機の実績・経験を基に将来の宇宙機開発事業計画に参画して重要な役割を果たすことで、日本の宇宙活動に貢献する。

\*鎌倉製作所

## 1. ま え が き

当社は国内初の宇宙輸送量産機であるHTVの電気モジュールの開発・製造試験・運用をHTV 1号機からHTV 9号機まで全て担当してきた。現在はHTV量産機の後継機になるHTV-Xの開発に参画し、電気モジュールと推進モジュールと曝露カーゴ搭載支援系を統合したSMの開発・製造試験を担当している。また、HTV-Xの開発と並行して将来の深宇宙活動への発展化構想であるゲートウェイにも、HTV-Xと当社の衛星技術をベースにした、SMの改良による有効活用と貢献を検討中である。

本稿では、HTV量産機の成果と後継機HTV-Xの開発状況及び将来宇宙機構想について述べる。

## 2. 量産宇宙機開発の経緯と当社の取組み

### 2.1 量産宇宙機開発の経緯

当社の宇宙機開発は、H-IIロケットで打ち上げ後に軌道上で様々な実験を行ってスペースシャトルで回収するために有人宇宙システムへの要求を取り入れたSFUが元祖であるが、その後ランデブドッキング技術の軌道上実証を行ったETS-VIIの成果を融合させて、HTV初号機を開発し、以降は9号機まで約1年のペースで製造試験・運用することで、宇宙機の量産化事業として確立し、量産機ならではの経営的な安定化にも貢献した。また、HTV量産機で培った近傍通信技術は、米国の商業軌道輸送サービス(COTS)の宇宙機(シグナス)にも採用され、輸出事業促進による相乗効果も生み出して、宇宙機事業の新たな海外進出への先駆けを果たした。

### 2.2 当社の取組み

国際宇宙ステーション(ISS)への物資補給に継続的に貢献するため9機の飛行実績を持つHTV量産機に引き続き、3機のHTV-X開発に取り組んでいる。さらに将来動向も踏まえて、物資補給機としての国際貢献、プレゼンスの向上を目指し、将来輸送機の構想検討にも着手している。宇宙輸送機を事業の柱として、更に発展させるため取り組んでいる。物資輸送にとどまらず、宇宙活動拡大に向けた新たな付加価値を実現していくため、HTV量産機開発までの実績と経験に加えて当社の衛星技術も積極的に適用して、多目的な技術ミッションを達成するとともに、品質確保、コスト低減、工程短縮等の更なる改善を推進し、様々なニーズに対応できるように進化を目指す。

## 3. HTV量産機の成果

HTV量産機では、毎号機の製造実績と飛行実績を踏まえて、継続号機へのたゆまぬ改善を重ねてきた。改善事項としては、機体の機能・性能に係るハードウェア及びソフトウェアの改良、不具合抑制のための品質向上、射場や実運用での作業性改善施策など多岐にわたる。ここでは、HTV量産機で実施した改善事例を述べる。

### (1) 一次電池台数、太陽電池パネル枚数の削減

毎号機の電力運用実績を反映させ、一次電池(図1)は7台搭載から、6号機では1台、7号機からは2台削減した。また、太陽電池パネル(図2)は57枚搭載から、5号機では8枚、6号機からは9枚削減した。この削減によって、コスト削減及び機体質量削減による物資輸送能力向上に寄与した。

### (2) 試験形態変更による射場でのアンテナ着脱削除

射場での機能試験では、航法誘導制御(GNC)系アンテナ(4台)、HTV衛星間通信装置(IOS)/近傍通信装置(PLS)系アンテナ(8台)を取り外し、アンテナに接続されていたケーブルに試験ケーブルを接続してハードライン試験を実施後、再度アンテナの取付け作業を行っていた(図3)。

5号機からは、過去の実績等からGNC系のハードライン試験を削除し、6号機からは、IOS/PLS系の試験ケーブル接続箇所を、アンテナ接続部から中継コネクタ部に変更した(図4)。接続箇所変更にあたっては、5号機でアクセス性に問題ないことを確認して万全を尽くした。

この改善によって射場でのアンテナ脱着作業がなくなり、アンテナの損傷リスクの排除(不具合未然防止、作業性向上)、工程短縮に寄与した。

### (3) ヒーターとサーミスタラインの接続方法の改善

熱制御用に構体やブラケットに実装されるヒーター、及びサーミスタのケーブルと、機器につながるケーブルとの接続は、ケーブルがカシメ加工されたコンタクトピンを工具で挿入する方式のターミナルブロック(TB)を使用していた(図5)。作業性が悪いところでTB接続作業を行うと、接続不良を発生させるおそれがあった。



図1. 一次電池

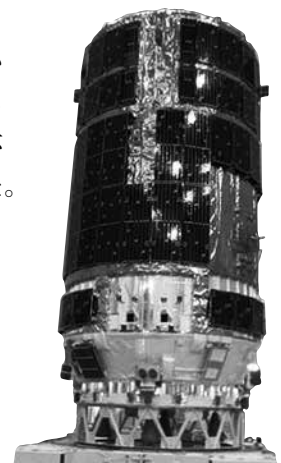


図2. 太陽電池パネル  
(ボディマウント)

接続不良発生リスクの軽減と品質向上のため、8号機からは、作業性が悪い環境でTB接続をせざるを得なかったもの(ヒーター12系統全て、サーミスタ60系統中26系統)に対しては、TB接続をコネクタ接続に変更する作業性改善を行った(図6)。

また、ヒーターとサーミスタラインの電氣的接続確認は受入れ試験中に実施していたが、前工程の製造段階でサーミスタの温度テレメトリ確認と、ヒーターラインの導通確認を行うように変更し、異常検知の前倒しによる品質確認向上と製造工程維持を実現した。

なお、HTV-Xのヒーターとサーミスタラインの接続は、全システムをコネクタ化することになっている。

#### (4) 製造・試験での手順読み合わせ活動

製造・試験手順書作成で、手順書の不備を含めて過去のトラブルの是正対策を確実に盛り込むようにした。作業開始前には手順書の読み合わせを作業員全員で行い、共通認識も持って作業に臨み、品質向上につなげた。

また、工場での作業時はもちろん、筑波宇宙センターや



図3. 試験ケーブル接続(従来)  
(アンテナ取り外し後)

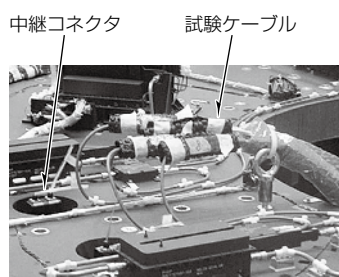


図4. 試験ケーブル接続箇所変更(改善後)

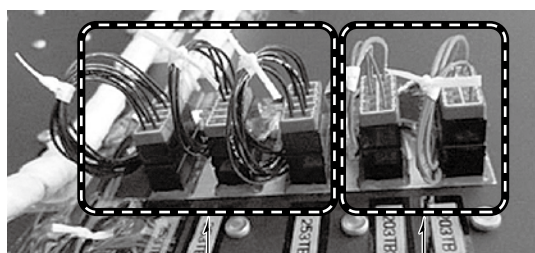


図5. TB接続(従来)

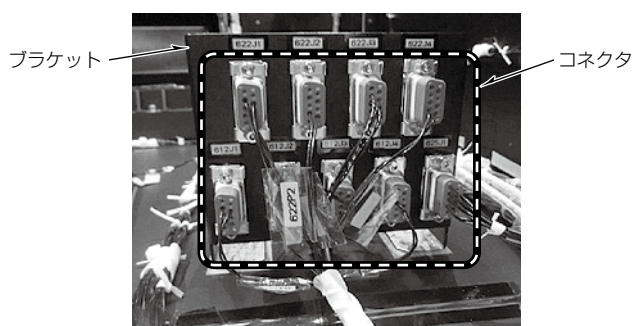


図6. コネクタ接続(改善後)

種子島宇宙センターなど違った環境で設備を扱うときは、作業員全員でリスクアセスメントを行い、リスク低減を図った上で作業を行った。

これらの活動を定常化させた結果として、号機を重ねるごとに不具合発生件数は抑制され、初期計画どおりの工程維持と品質確保に寄与した。

## 4. HTV-Xの開発状況

HTV量産機の後継機であるHTV-XのSM開発を2016年度から予備設計に着手し、SMの基本設計審査は2018年5月に完了した。現在は開発モデルの製造・試験を実施中であり、2020年度から順次開発試験報告会や詳細設計審査会及びフライトモデルの製造前確認会を経てフライト品製造着手を行う計画である。

SMレベルの開発試験としては、2019年度から2020年度にかけて簡易熱真空試験、太陽電池パドル(SAP)展開衝撃環境測定試験、音響試験の機械・熱システム試験を行って完了している。HTV量産機からの変更点としてHTV-Xでは軌道上での複数形態(単独飛行又はISS係留中及び太陽指向姿勢要否)に対応してSMの温度環境均一化の改善を図るために八角形構体の全周をつなぐ連結ヒートパイプを採用しており、熱真空試験によって連結部の熱コンダクタンスや排熱方式の設計検証を終えた。また、HTV-Xでは軌道上ISSへの係留中にも自己発電による電力確保が必要になり、SAP方式をHTV量産機のボディマウント式から展開式に変更したが、SAP展開時の衝撃環境への対応が課題になったため、SAP展開時の衝撃環境緩和を目的として従来の火工品展開デバイスから非火工品の低衝撃展開デバイスへ変更し、後述の新規構造様式の構体組合せでも、衝撃環境レベル低減効果が期待どおり得られることを実測済みである。

HTV量産機とは異なる新規様式としてアルミ削り出しの外板パネルとセントラルシリンドラにフレームやリブによる補強を行って組み合わせる構体を採用してコスト削減と軽量化を図り、音響試験で新規構体上の搭載機器ランダム振動環境を測定した。ランダム振動環境は一部予想以上になる箇所が観測されたため、現在はその対策有無を検討中である。SM開発モデル試験の外観を、図7、図8に示す。

電気系はHTV-Xで新規開発要素のあるコンポーネントを識別して部分モデルに絞ることによってコスト低減及びスケジュール短縮効果も考慮した開発モデルの製造・試験を実施中である。図9にコンポーネント開発モデルの外観を示す。

また、新規要素の大きい統合化制御系サブシステム(データ処理系と航法誘導制御系)は搭載ソフトウェアを

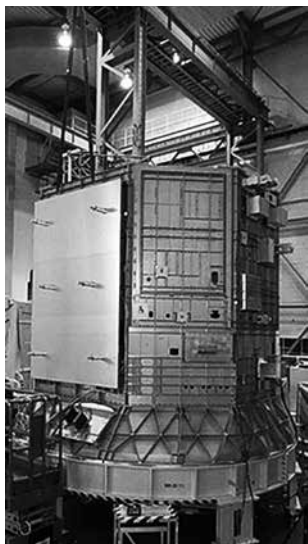
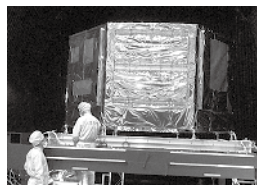
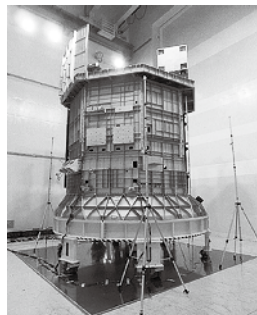


図7. SAP展開衝撃環境測定試験



(a) 熱真空試験



(b) 音響試験

図8. 熱真空試験と音響試験

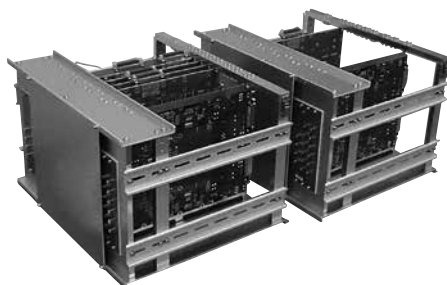
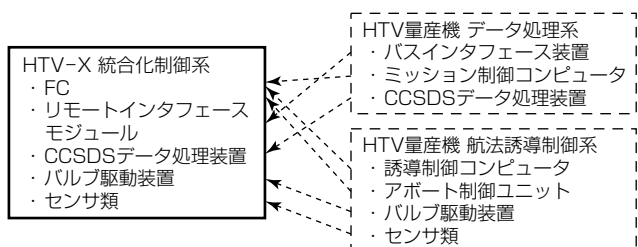


図9. 統合化制御系のFC開発モデル



CCSDS : Consultative Committee for Space Data System

図10. HTV-X統合化制御系の機能集約

含めた開発モデルのサブシステム試験を今後実施するが、SMレベルの電気試験はHTV量産機及び当社衛星開発実績から省略する計画である。図10にHTV-X統合化制御系の機能集約結果を示す。データ処理系サブシステムと航法誘導制御系サブシステムを統合し、計算機もフライトコンピュータ(FC)に集約した。FC搭載ソフトウェアも2019年度に要求仕様確認会と設計確認会を終えて開発モデル搭載ソフトウェアを作り込み、現在はFCへの実機搭載試験を実施中である。この統合化制御系とFCは今後の当社宇宙機開発計画でのキー技術及びキーコンポーネントになる。

## 5. 深宇宙機への発展化構想

HTVとHTV-Xの発展化構想として、深宇宙への物資

表1. 月輸送機開発での改良ポイント(検討例)

サブシステム	HTV-X	月輸送機
航法誘導制御系	GPS航法, レーザ航法	地上電波航法, 画像航法, レーザ航法
電力系	2系電源バス構成	単系電源バス構成(簡素化, 軽量化)
通信系	中継衛星通信, 宇宙機間通信, 地上通信(地球周回)	宇宙機間通信, 地上通信(地球周回及び深宇宙)
構造・熱制御系	アルミニウム材による大型・高荷重耐性の構体	軽量・高剛性の既開発衛星構体(DS2000バス)の活用
推進系	22N級スラスタによる3系構成	22N級スラスタ構成に月軌道遷移のため500N級スラスタを追加

GPS : Global Positioning System

輸送機としての活用が活発に議論されている。具体的な国際探査ミッションとして米国主導によってアルテミス計画が立ち上がっており、その足掛かりになるゲートウェイの構想検討が進められており、日本も参加を表明している。当社でもJAXAと連携し、有人拠点になるゲートウェイへの物資輸送機として、HTV-Xをベースにした月輸送機の構想検討を進めている。HTVとHTV-Xで獲得した技術を活用し、月輸送機固有の新規技術を付加することで効率的に開発することが可能と考えている。表1にHTV-Xをベースにした月輸送機開発での改良ポイントを示す。HTVとHTV-Xで実績がある技術に、観測衛星や静止衛星で使用されている当社既存の衛星技術を取り込むことによって、HTV-Xをベースにした新たな深宇宙輸送機を実現することが可能である。特に、月を始め深宇宙への物資輸送能力確保のためには、機体軽量化が重要であり、この観点では、既に多数の衛星開発で実績のある当社衛星技術が活用できる。HTVとHTV-Xに続く当社宇宙機の新たな活躍の場として、国際協力ミッションになるゲートウェイ有人活動への物資輸送という役割を担うことで、新たなステージの宇宙活動に貢献できるものと期待する。

## 6. むすび

当社の量産宇宙機開発の成果と後継機の開発状況及び今後の発展化構想を述べた。HTV量産機は全9機とも成功し、2020年度にその役目を終えた。現在は後継機であるHTV-Xを開発中であり、SMに加えてドッキング技術実証検討も加速して2020年代初頭の打ち上げを目指している。また、将来の深宇宙機ミッションへの足掛かりとしてゲートウェイ計画にも積極的に参画して重要な役割を果たすことで日本での宇宙機開発のリーディングカンパニーとしてJAXA、関係メーカーとも連携し、貢献していく。

## 参考文献

- (1) 堀田成紀：新型宇宙ステーション補給機“HTV-X”サービスモジュール、三菱電機技報、93, No.2, 149~153 (2019)