

# 宇宙ステーション補給機 (HTV) の開発

## Development of H-II Transfer Vehicle (HTV)



三木 陽一郎\*1  
Yoichiro Miki

阿部 直彦\*2  
Naohiko Abe

松山 行一\*3  
Koichi Matsuyama

増田 和三\*4  
Kazumi Masuda

福田 信彦\*5  
Nobuhiko Fukuda

佐々木 宏\*6  
Hiroshi Sasaki

10年以上の開発期間を経て平成21年9月18日ドッキングに成功した宇宙ステーション補給機 (HTV) は、宇宙ステーション (ISS) に船内物資と宇宙空間に曝露される船外物資を補給する軌道間輸送機である。HTV は宇宙飛行士が船内物資を運び出すため有人仕様となっており、また、スペースシャトル以外で船外物資の輸送を実現した初の宇宙船である。本報ではミッションの信頼性と安全性を高めるため実績のある技術を採用する方針の中で、HTV 固有の有人に対する安全設計と物資の輸送を可能にするため新たに開発した技術について開発の経緯と合わせて紹介する。

## 1. はじめに

H-IIB ロケットにより打上げられ ISS に物資を輸送し、初号機のミッションに成功した日本初の宇宙ステーション補給機 HTV は船内物資、船外物資合わせて約6トンの補給物資を ISS に輸送することができる。ロケットのペイロードとして搭載される点及びその飛行運用からは HTV は衛星に近いが、ロケットペイロードとしては過去に類を見ない大型構造物であることから構造的にはロケットに近い。また、船内物資は ISS 結合後、宇宙飛行士が入室し荷物を運び出すことから、従来のロケットや衛星にはない有人仕様の安全要求が適用されておりこの点は日本実験棟“きぼう” (JEM) に近い。本稿ではロケットや衛星、JEM の特徴を合わせ持つ HTV の開発作業の概要と、技術的課題と成果について述べる。

## 2. HTV の概要

HTV の概要を図1に示す。HTV は大きく分けて4つのモジュールから構成されており、船内物資を輸送する与圧部、船外物資を輸送する非与圧部、アビオニクス機能を持つ電気モジュール、自力飛行のための推進系を持つ推進モジュールからなる。電気モジュールと推進モジュールを組合わせた形態は本体と呼び、衛星のバス部に相当し HTV の基本的な機能である電源系、誘導制御系、推進系、熱制御系、データ処理系等のサブシステムが集約されている。

輸送される物資は与圧部内に搭載される船内物資として宇宙飛行士のための衣類、食料、水及び実験装置などがあり、非与圧部に搭載される船外物資として ISS の交換部品である姿勢制御装置や電池及び曝露実験装置などがある。表1に諸外国の補給機との比較を示す。船外物資を輸送できることが HTV の特徴である。

\*1 名古屋誘導推進システム製作所電子システム技術部主席技師 \*2 名古屋誘導推進システム製作所電子システム技術部長

\*3 名古屋誘導推進システム製作所電子システム技術部主幹プロジェクト統括

\*4 名古屋誘導推進システム製作所電子システム技術部主席チーム統括

\*5 名古屋航空宇宙システム製作所宇宙機器技術部主幹プロジェクト統括

\*6 宇宙航空研究開発機構 主幹

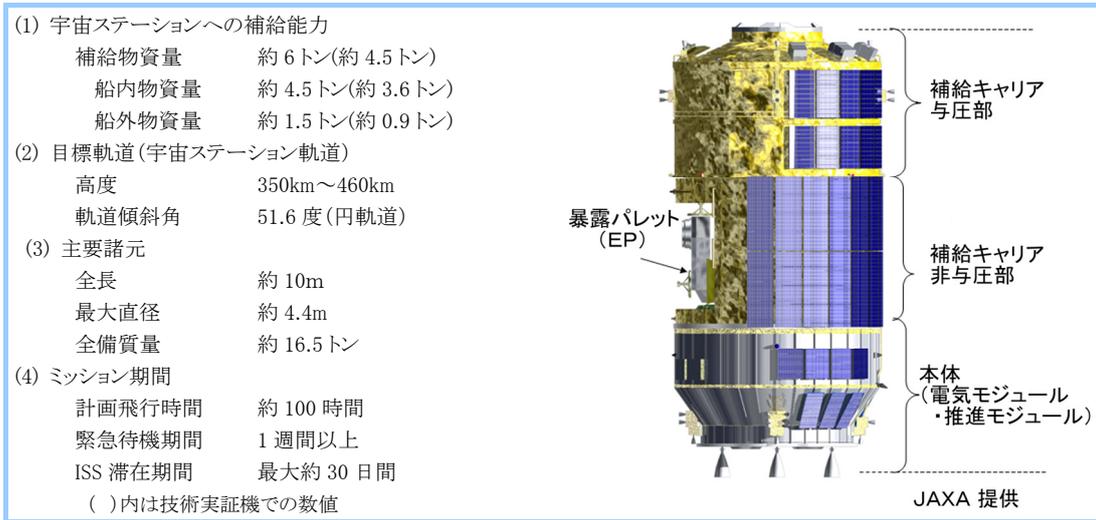


図1 HTV の概要

表1 各国のISS補給機の比較

補給機	HTV (日本)	ATV (欧州)	プログレス (ロシア)	スペースシャトル (米国)
補給能力	6トン	7.5トン	2トン	9トン
総重量	16.5トン	20.5トン	7.2トン	94トン
打上げロケット	H-II B	アリアン5	ソユーズ	スペースシャトルシステム
輸送カーゴ	・船内カーゴ ・船外カーゴ	・船内カーゴ	・船内カーゴ	・船内カーゴ ・船外カーゴ

船内物資においてもHTVは1.2m×1.2mの大型ハッチ(出入り口)を有しているため国際標準ラック(ISPR)を輸送できる。一方、欧州のATVはロシアのドッキングポートを使用しておりハッチの直径が0.8mのため船内物資の大きさが限定される。ATVは実績のあるドッキングポートを採用することによりISSへの自動ドッキングを可能にしたものと思われるが、HTVは自動ドッキングより大型の荷物の輸送を優先したため、ISSのマニピュレータで把持されISSにドッキングする運用となった。また、船内物資の輸送環境においても表2に示すようにスペースシャトルによる輸送よりHTV/H-II Bのほうがやさしくなっている。(4),(5)

表2 HTVとスペースシャトルの輸送環境(船内物資)

	機軸方向 加速度(G)	機軸直角方向 加速度(G)	機軸まわりの 角加速度(rad/sec <sup>2</sup> )	機軸直角方向まわりの 角加速度(rad/sec <sup>2</sup> )
HTV/H-II B	±5.1	±2.3	±13.5	±11.5
スペースシャトル	±7.0	±8.0	±70.8	+36.8 -34.8

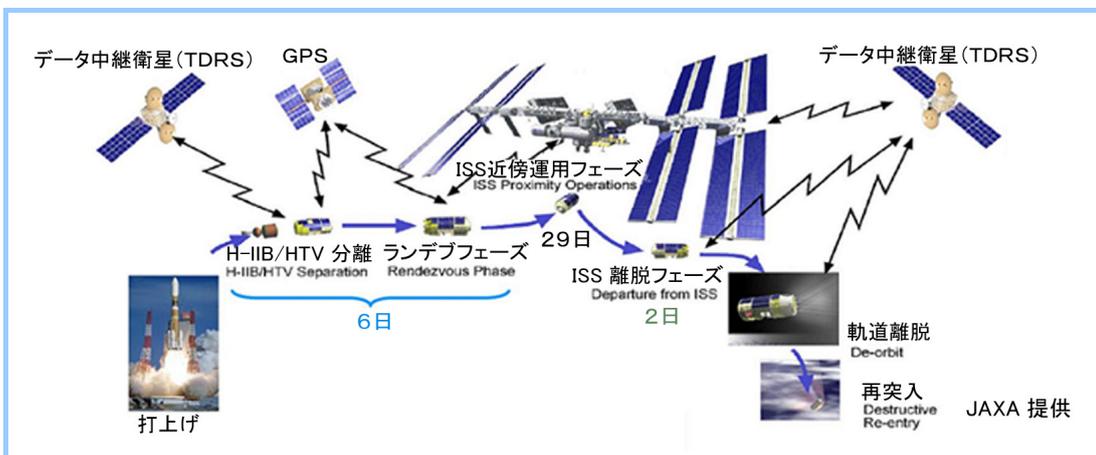


図2 HTV 飛行運用

次に、図2にHTVの運用概要を示す。(3)

HTVはH-IIBロケットにより打ち上げられた後、米国のデータ中継衛星経由データの送受信を行い、また、GPSにより自分の位置を把握しながら自力飛行を行う。約90分で地球を一周しながら、ISSの位相や高度に調整していく。近傍域では直接ISSと通信を行いISS下方10m手前で停止する。その後、ISSのマニピュレータで把持されドッキングし、物資を補給する。帰路は荷物を積み出した後の空間にISSの使用済み実験装置などを積み込み、HTVと使用済みの荷物はともに大気圏再突入時の摩擦熱等で燃え尽きることになる。なお、帰路においてISSの不用品を最大6トン廃棄できる。

### 3. 開発経緯と成果

#### 3.1 開発経緯

ISS全体の運用における日本の分担義務を履行する目的で、ISSに物資を輸送し、また廃却する宇宙ステーション補給機の開発が始められた。表3に開発スケジュールを示す。平成8年度頃から概念設計が開始され予備設計を経て平成9年度の後半から基本設計がスタートした。最初の計画では初号機の打上げはH14年度と設定されていたがISS計画の見直し等の影響で、H21年9月の打上げとなった。当初のHTVの構想には図3に示すように与圧短型、与圧長型、与圧・非与圧混載型の3形態があり、輸送する荷物の種類によりモジュールを組替え対応することを検討していた。打上げ形態をモジュールの組替えで対応することは輸送の効率化の点で非常にメリットがあったが、一方で開発費がそれに伴い増加することが予想された。

表3 HTV 開発スケジュール

年度	FY8 (1996)	FY9 (1997)	FY10 (1998)	FY11 (1999)	FY12 (2000)	FY13 (2001)	FY14 (2002)	FY15 (2003)	FY16 (2004)	FY17 (2005)	FY18 (2006)	FY19 (2007)	FY20 (2008)	FY21 (2009)
	プロジェクト移行前審査	予備設計審査 システム要求審査		基本設計審査 (PDR)		追加基本設計審査 (ΔPDR)			詳細設計審査 (その1) CDR#1	詳細設計審査 (その2) CDR#2				技術実証機 打上げ
					Phase1 安全審査		ΔPhase1 安全審査			Phase2 安全審査	ΔPhase2 安全審査		Phase2 安全審査	ΔPhase2 安全審査
HTV 開発 マイルストーン	概念設計 予備設計		基本設計			詳細設計					維持設計			
技術実証機 EM/STM						開発モデル(EM/STM)開発試験								
技術実証機 PFM											FFM 製作試験			

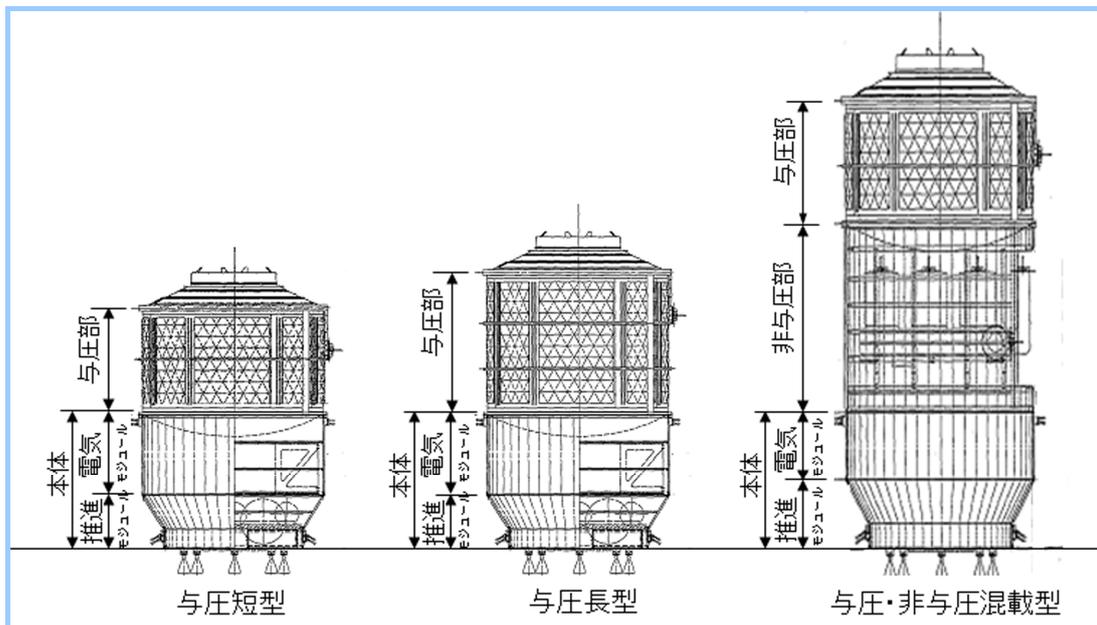


図3 初期検討時のHTV3形態

当時スペースシャトルが活躍しISSを建造中であり、日本がシャトル以外の新しい輸送機を開発するためにはシャトルの利用より新規開発の方が費用対効果があることを示す必要があった。そのためには開発費の削減が必須であり基本設計段階でHTVの形態は与圧・非与圧混載型一本に絞られた。これが現在のHTVである。

HTVはロケット、JEM、衛星の技術が融合されたものであるため、基本設計段階ではロケット、JEMのメーカーであるMHIと衛星メーカーである三菱電機(株)が宇宙航空研究開発機構(JAXA)取りまとめの下、ダブルプライムとして開発に臨んでいたが、最終的にはシステム設計、全機組立/機能試験、発射整備作業をMHIが、飛行運用を三菱電機(株)が主担当となりそれぞれのメーカーが得意分野を取りまとめることになった。<sup>(6),(7)</sup>

HTVの開発検証は表2に示すように設計、開発試験の各段階ごとに審査会を実施し、さらにシステムレベルの審査会はメーカー主催の審査会のみならずJAXA主催の審査会(アメリカ航空宇宙局NASAも参加)も実施することで行われた。

また、特筆すべきは設計審査以外に安全審査も行っていることであり、これはメーカー安全審査、JAXA安全審査さらにNASAの安全審査も実施している。安全審査は各開発フェーズごとに行っており、安全要求を満足しかつコスト/スケジュールをミニマムにするため何度もNASAと調整を実施した。その結果、フェーズ1(基本設計段階)、フェーズ2(詳細設計段階)、フェーズ3(システム試験後評価段階)合わせて合計6回のNASA安全審査を受審した。

## 3.2 成果

HTVは信頼性、安全性を重視し、極力、新規開発ではなく過去のロケットや衛星、JEMで実績のある機器を採用し実績のある設計を行う方針とした。それでも、HTV固有の課題はいくつかあり、その都度新規開発や新たな設計を行ってきている。以下HTV固有の課題に対する安全設計とMHIが新たに開発したハードウェアについて説明する。

### 3.2.1 安全設計

HTVは衛星やロケットと異なりミッションの成功のために1Fail Operative(故障や操作ミスが1つ起きてもミッションが継続できること)、有人安全のために2Fail Safe(故障や操作ミスが2つ起きてもISS搭乗員の死傷に至らないこと)の耐故障設計を行っている。JEMと同様の設計思想であるが、主に以下のハザードに対する安全設計がHTV固有である。

#### ①衝突に対する安全設計

HTVがISSの下方10mで停止せず衝突した場合、ISSを損傷することで船内の空気が抜け、搭乗員の死傷に至る可能性がある。衝突を生じる要因としては誘導制御系、センサ系、推進系、電源系の異常または故障、通信システムの遮断等があり、個々の要因ごとに機能の多重化または適切な設計余裕の確保により衝突に対して2Fail Safeとしている。

#### ②推進薬による汚染に対する安全設計

HTVの燃料(モノメチルヒドラジン)と酸化剤(四酸化二窒素)は共に人体に有害であるため、HTVから推進薬が大量に漏洩し一部が宇宙服に付着すると、有害な物質が船内に持ち込まれる可能性が生じ危険である。そのため船外活動が想定される前方スラスト近辺はバルブを3重に設置し大量漏洩を避けるとともに、船外活動中は不意のスラスト開放指令を出さないよう制御系を停止させている。

#### ③推進薬供給システムの爆発に対する安全設計

推進薬供給システムが万一設計圧力より高圧に至る場合には、最悪爆発してISSへの構造破壊を引き起こし、宇宙飛行士が死傷する可能性がある。設計圧力より高圧になる要因としては機器の故障による推進薬供給系の過大な加圧やヒータ系統の故障による異常過熱が考えられる。これに対しては適切な圧力に設定する調圧弁を直列冗長にすると共に、その上流に遮断弁を配置して2Fail Safeとしている。

さらに、破裂板を設置し、万一設計圧力以上になった場合には破裂板が破裂し機器に過大な圧力が加わることを防いでいる。ヒータ故障に対しては温度センサが異常を検知するとヒータ制御装置内のスイッチをOFFし異常加熱を防ぐ設計としている。

#### ④電池セルの破裂に対する安全設計

電池の不適切な設計による破裂は HTV の構造破壊を引き起こしその結果、宇宙服を破損することで船外活動中の宇宙飛行士が死傷する可能性がある。この要因としては短絡に起因する電池温度の上昇に伴う内圧上昇や不適切な電圧制御、容器の不適切な耐圧設計が考えられる。これらについてはヒューズや過電流保護回路の設置、および内圧上昇時に圧力リリーフを行うための破裂機構を設置することでハザードを制御している。

以上が HTV 固有の安全設計であり、その設計の妥当性は図面確認や製造の品質保証、さらに試験により検証しており、最終的に JAXA および NASA のレビューを受けている。

### 3.2.2 非与圧部構造

非与圧部の一次構造様式は、H-IIA/H-IIB ロケットと同様のセミモノロック構造であるが、船外物資を搭載した曝露パレットを引出/挿入するため図4に示すように過去の宇宙機では実績のない大開口部を有している。打上げ時において、当該開口部の周辺部位は厳しい応力集中に晒されるため、補強のため一般部位の10倍以上の強度/剛性を有する縦通材(ロンジロン)や応力集中を緩和するための補強部材を配置している。この開口部強度の評価では、非線形有限要素法解析プログラムを用いて弾塑性大撓み解析を実施し、試験結果と比較を行い設計の妥当性を確認した。

この技術にて HTV は大きな開口部を有しかつ強度を補う蓋なしでフライトに供することが可能となった。図5は荷物を取り出した後の空の曝露パレットを非与圧部の開口部から HTV に挿入しているところである。一方、開口部以外の一般部位では厳しい軽量化要求を満足させるため、打上げ時においてセミモノロック構造のスキンが弾性領域で座屈することを許容する設計としていることが特徴である。(1),(2)



JAXA 提供

図4 大開口部を有する HTV  
(曝露パレット挿入済)



NASA/JAXA 提供

図5 ISS マニピュレータで把持される  
曝露パレット

### 3.2.3 非与圧部機構系

船外物資の補給手段として、非与圧部機構系は打上げ時には曝露パレットを機体に固定、ISS 結合後に分離する役割を担っている。曝露パレットを挿入するために非与圧部側に長いガイドレールと曝露パレット側には8個のホイールが装備されている(図6、図7)。

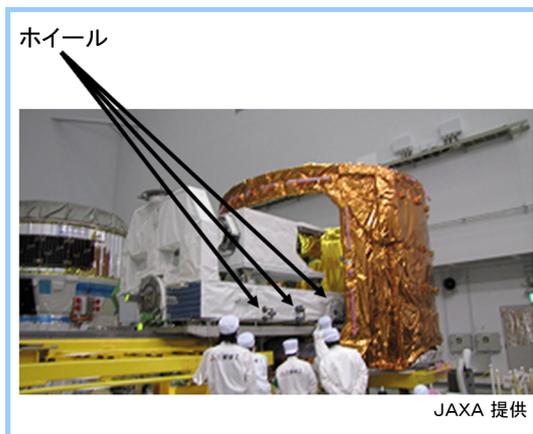


図6 非与圧部への曝露パレットの挿入

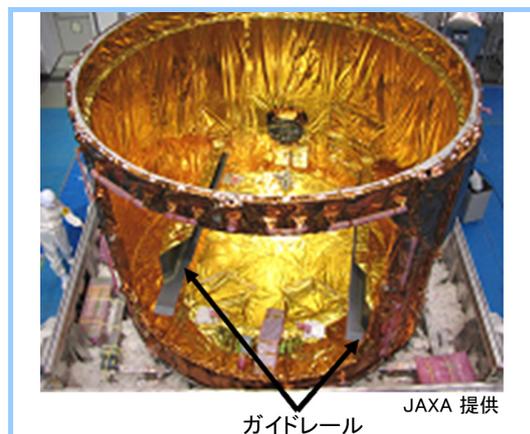


図7 非与圧部開口部とガイドレール

このホイールは自己潤滑性を持つ材質(ベスペル)でできておりさらにその上に固体潤滑皮膜を施し、パレット挿入/引出時の抵抗を所定の値以下にするため1 Failure Tolerance(1故障許容)の仕様となっている。また、曝露パレットの挿入、固定、分離、引出のために以下の3つの機構があり船外物資の輸送を可能なものとしている。

①拘束分離機構:

打上時に曝露パレットを拘束し、軌道上で分離する。また、軌道上で挿入された曝露パレットを固定する。

②ハーネス分離機構:

打上時及び軌道上で電気分離コネクタの結合を保持するとともに分離信号により電気分離コネクタの分離ができる。

③軌道上捕捉機構:

ISS のマニピュレータによって把持された曝露パレットを非与圧部の中へ挿入後、引込み、位置決めする。

### 3.2.4 有人仕様の与圧部

与圧部はその名のとおりのモジュール内部に空気を封入し1気圧の圧力を保持、ISS 結合後の宇宙飛行士の入室を可能としている。図8に示すように与圧部内には補給物資(実験ラック、飲料水、衣料など)が搭載され、クルーが結合部のハッチから内部に乗り込み荷物を運び出す。その後、与圧部にはISS で使用済みになった実験装置などが搭載される。クルーが入室するため与圧部には JEM 同様いくつかの安全上の対策が施されている。



図8 与圧部に搭載された船内物資と宇宙飛行士が入室し設置した日の丸

以下に示す対策のうち安全弁の設置とフライト中の熱制御が自力飛行するHTV固有の技術である。

- ①宇宙塵(デブリ)の衝突に対するデブリバンパの設置
- ②火災を起こさないようにするための難燃性材料の採用
- ③火災を検知するための煙センサ
- ④クルーの吐く息(CO<sub>2</sub>)が滞留しないようにするための空気循環ファンの設置
- ⑤飛行中に日照による温度上昇で内圧が過大になることを防ぐための安全弁の設置
- ⑥飛行中に日陰による温度低下で結露することを防ぐための熱制御

また、JEMと同様の技術とはいえ有人飛行に不可欠な空気循環技術はJEMでは海外メーカーのファンに頼っていたが、HTVでは宇宙用の低騒音ファンの国産化に挑戦し成功している。

## 4. まとめ

開発が本格的に立ち上がってから約12年、概念設計から数えると約14年かけて宇宙ステーション補給機HTVの初号機打上げ/飛行運用が成功した。次の運用機からはMHIが製造プライムとして1機/年製造し、合計6機の打上げが実施される予定である。HTVは有人仕様であるため今後いろいろな発展型が考えられる。今回の成功をアピールし今後の運用機の製造台数増につながると共に、回収カプセルや月探査等HTV発展型にも取り組んでいきたい。

## 参考文献

- (1) 河野秀文ほか、宇宙ステーション補給機(HTV)非与圧部主構造の設計・開発、第47回構造強度に関する講演会講演集、日本航空宇宙学会(2005-7) p.123
- (2) 河野秀文ほか、宇宙ステーション補給機(HTV)の開発—大開口部を有した大型建造物の設計/検証、三菱重工技報 Vol. 42 No.5(2005-12)
- (3) JAXA Presskit-HTV
- (4) HTV カーゴ IRD(NASDA-ESPC-2875)
- (5) MPLM ICD(SSP41017)
- (6) 津屋ほか、HTVとその将来展望、三菱電機技報 Vol83.No.3 2009
- (7) 中井ほか、HTV推進系の開発、IHI技報 H21年9、12月合併号(49-3)