

宇宙ステーション補給機“こうのとり”の安定した量産に向けて

For Steady Production of H-II Transfer Vehicle “KOUNOTORI” Series



三木 陽一郎*¹
Yoichiro Miki

松山 行一*²
Koichi Matsuyama

増田 和三*³
Kazumi Masuda

佐々木 宏*⁴
Hiroshi Sasaki

宇宙ステーション補給機 (HTV) は国際宇宙ステーション (ISS) に補給物資を運ぶための輸送手段として、我が国が開発した有人対応型の無人物資補給船で、初号機が 2009 年 9 月 11 日に打ち上げられて以来、2012 年 7 月に打ち上げられた 3 号機まで 3 機連続で成功している。今後 7 号機までが計画されており 2 号機からは当社がプライムとして製造を取りまとめている。米国のスペースシャトルが退役した今、HTV への期待は高まっており、本稿ではこの HTV が連続して成功を続けるために実施している製造上の施策について述べる。

1. はじめに

宇宙ステーション補給機 HTV (H-II Transfer Vehicle) は 2009 年 9 月に初号機である技術実証機を H-IIB ロケットで打ち上げたあと、2 号機を 2011 年 1 月に、3 号機を 2012 年 7 月に打ち上げ、連続してミッションを成功させた。これに遡る 2007 年 3 月、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) による技術提案要請 (RFP) 競争入札の結果、2 号機以降の運用機について当社が製造プライムとして指名を受けた。すなわち HTV 2 号機、3 号機は当社による製造とりまとめの下機体を完成させ、ミッションを成功させている。これまでの 3 機で輸送した荷物の種類は多岐にわたり、HTV の利便性を示すことになった。さらにスペースシャトルが退役した今、アメリカ航空宇宙局 (NASA) からの緊急依頼による荷物の輸送も実施するなど、HTV の重要性は高まっている。なお、運用機である 2 号機からは“こうのとり”の愛称がつけられ 7 号機までの打上げが計画されている。

2. HTV の概要

“こうのとり”の概要を図 1 に、ISS にドッキングしている状況を図 2 に示す。“こうのとり”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、そして ISS に向けて飛行するためのスラスタを有する推進モジュールからなる。与圧部には乾燥空気が 1 気圧で充填されており、ISS にドッキング後、宇宙飛行士がハッチを開けて入室することができる。非与圧部は過去の宇宙機では前例のない大きな開口部を有しており、ISS の曝露部 (ISS の外側、宇宙空間にさらされている場所) に取り付ける実験装置等の船外物資が搭載される。ISS にドッキング後にマニピュレータでこの船外物資が乗ったパレットが引き出され、船外物資が曝露部に取付けられた後、空のパレットは“こう

*1 航空宇宙事業本部誘導エンジン事業部電子システム技術部 主席技師 技術士 (航空宇宙)

*2 航空宇宙事業本部誘導エンジン事業部電子システム技術部 主幹プロジェクト統括

*3 航空宇宙事業本部誘導エンジン事業部電子システム技術部 次長

*4 宇宙航空研究開発機構 サブマネージャー

のとり”に挿入される。電気モジュールと推進モジュールを組み合わせた形態は本体と呼び、衛星のバス部に相当し“このとり”の基本機能である電源系、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。

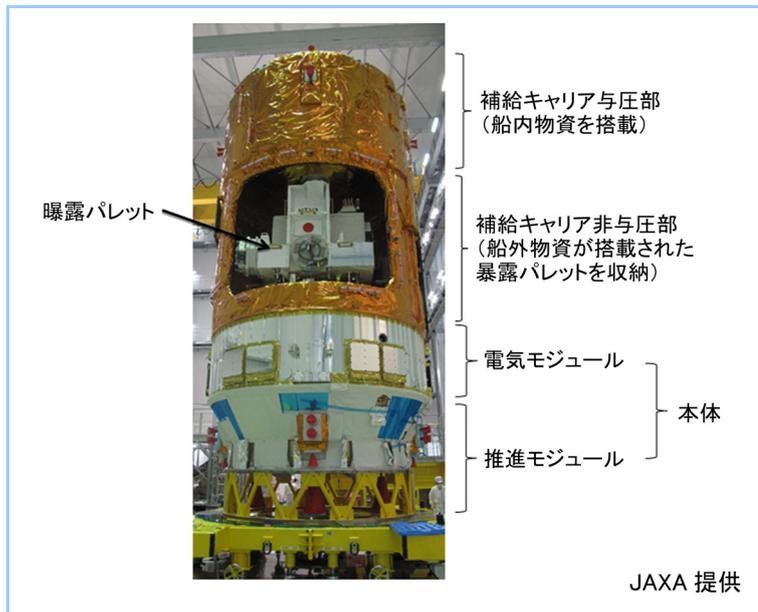


図1 “このとり”3号機の概要

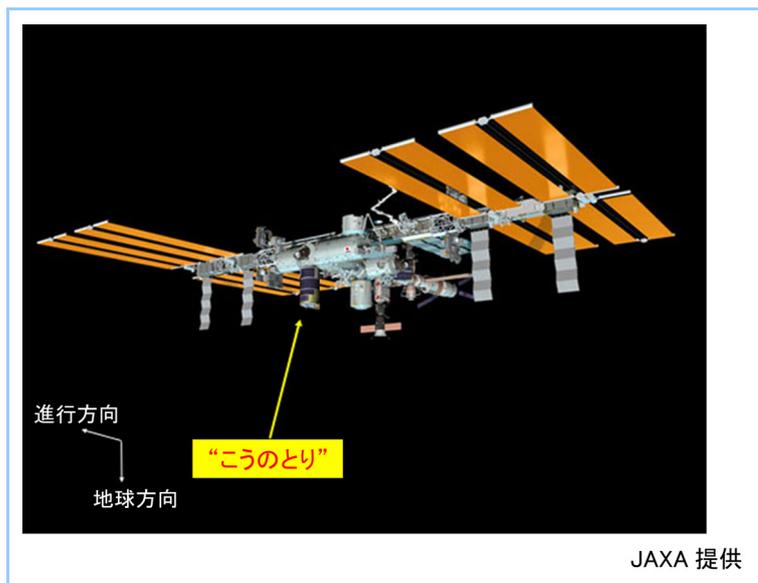


図2 ISS における「このとり」のドッキング位置

3. “このとり”3号機の特徴と輸送した物資

3号機では下記に示す主要な部品が国産化されこれまでの輸入品に置き換わった。

- ・メインエンジンと RCS スラスタ
- ・通信装置(トランスポンダ, ダイプレクサ)

さらに、非与圧部に荷物を搭載するためのパレットが新たに多目的暴露パレットに置き換わり、また、これまでの1, 2号機の運用結果から ISS 搭乗員のロボット操作だけで暴露パレットを HTV に挿入できることが確認できたため、暴露パレットの引き込み機構が削除された。運用面では打上げ直前に積み込み(レイトアクセス)可能な貨物量を増やした。

次に1, 2号機と3号機の違いを表1に示す。

表1 “こうのとりの”3号機と1号機, 2号機の比較

	1号機 (技術実証機)	2号機	3号機
ISS への補給量			
船内物資	3.6トン	約4トン	約 3.5トン
船外物資	0.9トン	約 1.3トン	約 1.1トン
合計	4.5トン	約 5.3トン	約 4.6トン
総質量	約 16トン	約 16トン	約 15.4トン
目標軌道			
高度(円軌道)	347km	352km	約 400km
軌道傾斜角	51.6 度	51.6 度	51.6 度
ミッション期間	約 53 日間	約 67 日間	約 49 日間
ランデブ飛行期間	7日間	5日間	6日間
ISS 滞在期間	43 日間	60 日間	41 日間
離脱・再突入期間	3日間	2日間	2日間

3号機では船内物資の質量がこれまでで一番軽くなっているが、質量は小さくてもかさばる装置もあるため、補給実績を質量だけでは単純比較できない。3号機では船内物資は容積的には十分搭載されている。3号機で輸送した主な船内物資は以下である。

- ・ 食料
- ・ 水棲生物実験装置 (図3: 当社が開発したメダカの水槽, メダカは別途ソユーズで輸送)
- ・ 小型衛星放出機構 (図4)
- ・ JAXA 公募小型衛星3機
- ・ 再突入データ収集装置 (i-Ball)
- ・ NASA 提供小型衛星2機
- ・ 再突入データ収集装置 (REBR)

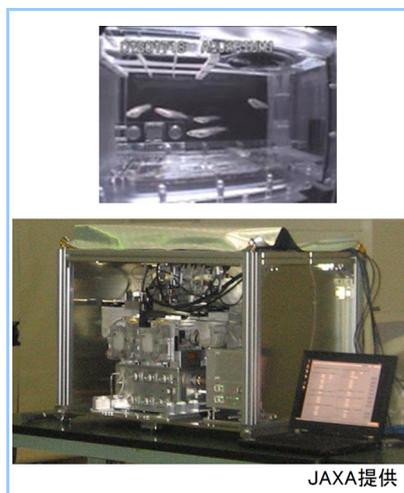


図3 水棲生物実験装置

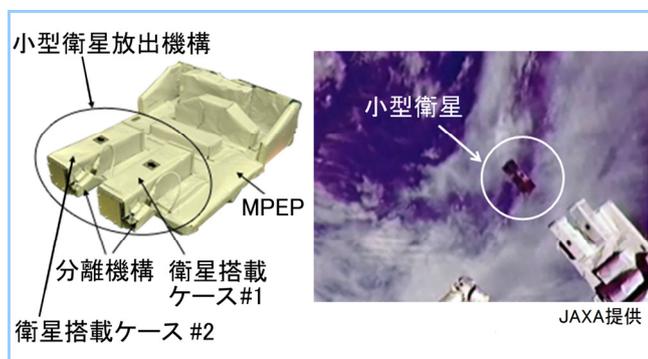


図4 小型衛星放出機構と放出の様子

さらに、今回、故障のため緊急に必要となった ISS の部品として、NASA の触媒反応器(水再生システムの機器の一つ)や、日本の実験モジュール(JEM)の冷却水循環ポンプの代替品を輸送している。

また、変わったところでは今回初めて生き物として”ハエ取りグモ”が搭載された。ジャンプして蠅を捕るクモが無重力環境下でどのように蠅を捕るのか実験が行われる予定である。

また、船外物資としてはNASA の SCAN Testbed (衛星間通信実験装置)とJAXA のMCE (ポート共有実験装置)を輸送した。MCE には図5に示す当社が開発した船外活動(EVA)支援ロボット REXJも搭載されている。

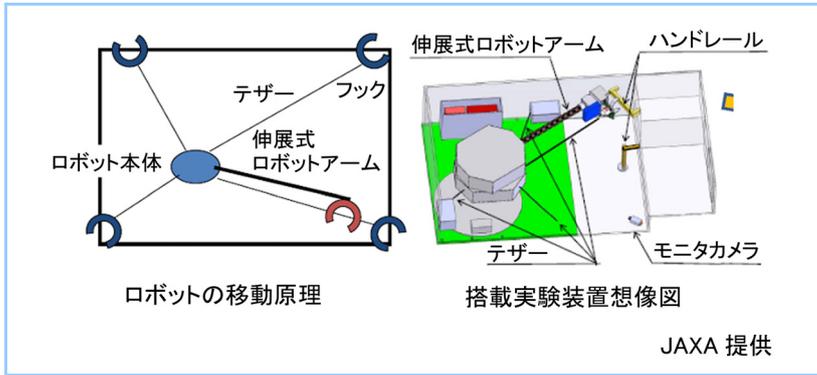


図5 EVA 支援ロボット(REXJ)

4. 連続成功のための施策

4.1 運用機の製造体制

技術実証機では JAXA が機体開発を取りまとめていた。2号機の運用機からは各社の製造分担は変わらないものの図6に示すように当社が製造を一元的に取りまとめ管理し、最終的に JAXA に対する納入責任を持つことになった。ただし、曝露パレットは、毎回形態が異なる可能性が高いこと、及び船外物資が搭載された状態で当社に引き渡されることから、船外物資同様 JAXA から引渡品となっている。

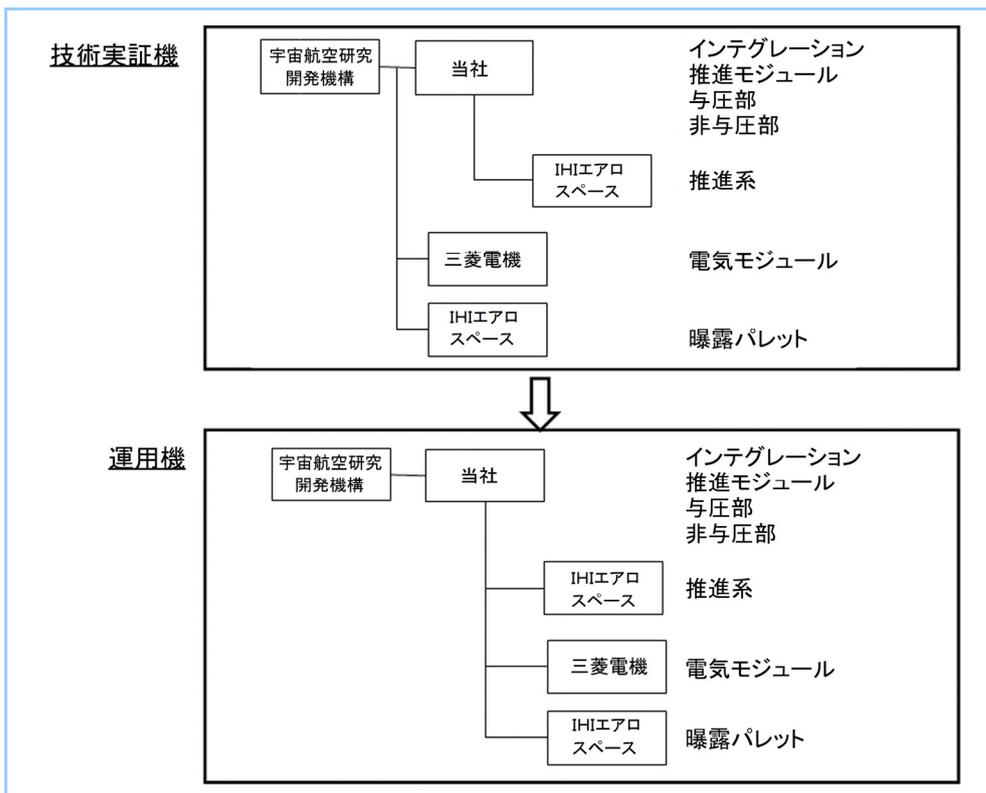


図6 技術実証機から運用機への製造体制変更

4.2 運用機の確実な製造に向けての施策

量産である運用機を確実に製造するために次の4項目の施策を重点的に実施した。

- ① 各社協力体制の確立
- ② 部品・材料のまとめ買い
- ③ 製造・品質の管理強化
- ④ 射場作業の確実化と効率化

(1) 各社協力体制の確立

JAXA 及びパートナー会社と当社の間で信頼関係を築くことがもつとも重要である。意思の疎通を図り、情報を共有化し、共通の認識のもと一致団結して作業を進めるため、毎月1回各社主要メンバーが一同に会して運用機製造の定例会議を開催している。その会議では主にスケジュール、調達状況、技術的課題、不適合など問題点を洗い出し解決するための協議を行っている。さらに、当社はプライムメーカとしてパートナー会社である三菱電機(株)や(株)IHIエアロスペース(以下IA)と個別に会社間で毎月1回調整会議を行い、作業進捗状況の確認や個別事項についての調整を実施している。

(2) 部品・材料のまとめ買い

各社が、長納期部品やまとめ買いによりコスト低減が図れる部品を、2号機から7号機までの6機分について纏めて手配することとした。対象としたアイテムは輸入機器や輸入電子部品であるが、のちに製造中止になった部品もあり、結果としてコストダウンに加えて安定して製造することにも寄与した。

(3) 製造・品質の管理強化

製造プライムとしてのもつとも重要な仕事は、パートナー会社が製造したハードウェアも含めて一元的に責任を持って製造を取りまとめることである。このため、社内及びパートナー会社に対して以下のような管理を推進してきた。

(a) コンフィギュレーション管理

運用機の量産においては、開発完了し飛行実証されたコンフィギュレーションを変更せずに製造し続けることが大原則である。しかしながら枯渇する部品・材料への対応、設計・製造の改善、不適合への対策、飛行結果の反映などで必ず変更が必要になる。そのなかで軽微な変更や改善のつもりの変更が結果として予想もしなかった悪影響をシステムに与えてしまうことはこれまでに何度も経験している。これを避けるために重要なのがコンフィギュレーション管理と次の変更管理である。

コンフィギュレーション管理で重要なことはコンフィギュレーションのベースラインをどこに設定するかということである。“こうのとりの”では各号機のベースラインを審査会により確認する方式とした。各モジュール及び主要サブシステム、主要コンポーネントに対し MRR (Manufacturing Readiness Review: 製造前確認会)を開催してその中でコンフィギュレーションのベースラインを示す。そのベースラインとは図面、スペックや手順書等である。これら文書に基づき、前号機からの変更点の識別とその変更の妥当性を審査の中で確認することとした。

(b) 変更管理

宇宙機器では仕様書の上位(客先)要求に抵触する変更や、客先に承認された製造工程等を変更する場合には、客先に変更を申請し承認を得るが、それ以外は自社内で変更可能という考え方が一般的である。しかし、後々の重大不適合を未然に防ぐという観点からは慎重に変更内容を確認することが望ましい。そこで、“こうのとりの”では変更の影響が自明でないかぎり、その変更は「重要な変更」と捉え、変更内容とその妥当性を上位者に申請し承認を得るシステムを採用することとした。パートナー会社である三菱電機(株)やIAは重要な変更を当社に申請し当社が評価する。その中でさらに当社が重要と判断した変更はJAXAに申請する。当社の内製部位での重要な変更もJAXAに申請する。なお、製造開始以降に発生したコンフィギュレーションの変更は都度変更管理が実施されるが、PSR(Pre-shipment Review: 出荷前審査会)にてMRR同様一括審査することで、確認漏れがないよう2段階のチェック体制としている。

(c) 品質管理

品質管理で重要なことは不適合管理である。重要な不適合はJAXAも交え十分に議論

する。軽微な不適合は都度審議しないまでも毎月の定例会議や MRR, PSR で報告され、対策の妥当性の確認を行う。開発段階で JAXA が実施していた製造中及び完成後の検査は当社が引き継いだ。三菱電機(株)担当の電気モジュールは開発時当社が直接製造に関与していなかったため、JAXA の指導、協力を得ながら進めている。

(4) 射場作業の確実化と効率化

“こうのとり”の各モジュールはそれぞれ担当会社の工場で製造され、種子島宇宙センターに搬入される。そこで各モジュールを組み合わせ、機能試験を行い、打ち上げるための機体に完成させる(作業状況は図7～図11 参照)。

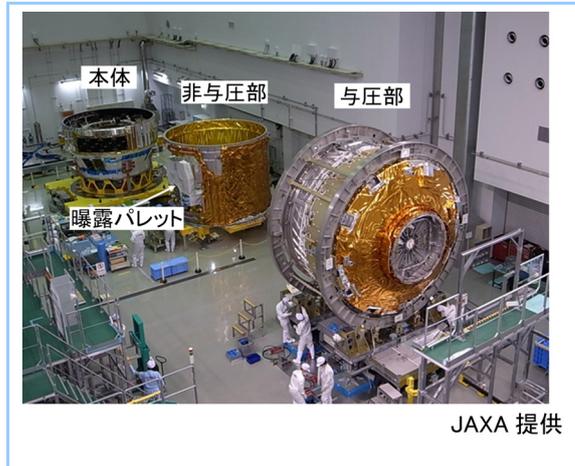


図7 射場作業状況

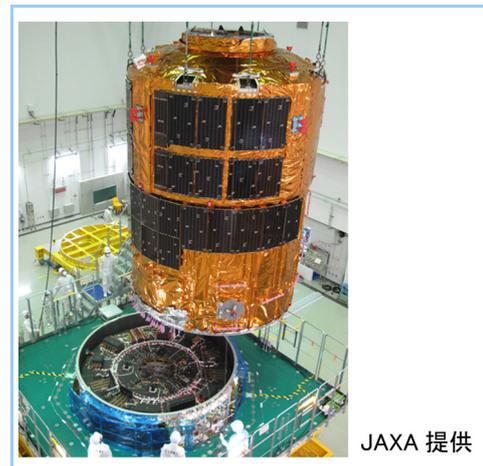


図10 “こうのとり”全機組み立て状況



図8 与圧部内の船内物資搭載状況



図11 ロケット引き渡し前の状況



図9 非与圧部に船外物資を搭載した曝露パレットを挿入した状況

“こうのとり”製造の特徴の一つはこの射場作業が約半年と長いことである。組み立て期間が長いのはISSに輸送する物資を搭載しながら機体を組み立てるからである。長期間の現地作業において、安全・確実に効率よく作業を実施するために以下の施策を実施している。

(a) 射場作業チームの編成

当社では射場作業を実施するにあたって、複数の工場の各部、各課からスペシャリストを選定し射場に派遣している。いわば通常の職制とは異なる混成チームで作業を実施している。そのため現地での指揮命令系統を明確にし作業管理、安全管理の一元化を図るため SHOT (Successive HTV Launch-site Operation Team) という射場作業チームを編成し一体感をもって作業を行っている。他社も同様にチームを編成しており、当社と各社間で毎朝のミーティングを通じ、安全に対する意識の共有化、情報の共有化、ミッション成功に向けての仲間意識の醸成を図っている。

(b) 効率化

機数を重ねるごとに作業の習熟度が上がり、またスケジュールの最適化、省略可能な工程の削除などで効率化を図っている。その結果、2号機では6か月以上かかった射場作業を3号機では5.5か月(実働5か月)で実施することができた。

(c) 審査会

各モジュール単独作業完了後、機体組立完了後、及び推進薬充填後(ロケットへの引き渡し前)の3つの節目で審査会を開催し、作業結果の妥当性確認と以降の作業の準備状況の確認を実施し、次のフェーズの作業に進むにあたって見落としの無いようにしている。また、H-IIA ロケットの審査会で実施し効果を上げた手法である、推進系、電気系、機構系等系統ごとに専門の評価責任者を指名し工場作業から射場作業まで一貫して責任を持って品質評価を行う活動(系統別評価)と、“こうのとりの”各モジュールに対し専任の評価者を指名し、取りまとめの視点で品質を確認する活動(モジュール別評価)を行っている。

5. まとめ

HTV3号機は2012年7月21日に打ち上げられ9月18日に無事にミッションを完了した。これで“こうのとりの”としては3機連続、当社とりまとめの運用機としては2機連続の成功であった。4号機については来年度の打上げをめざし各工場ではモジュールの製造が順調に進んでいる。

このようにこれまで順調に進めることができたのは次の点が功を奏したと思われる。

- ・ 量産体制への移行を早期に進めたこと…………… 開発と並行して製造プライム体制を構築した。
- ・ 6機部材まとめ買い…………… 早期に6機打上げが決定し部材のまとめ手配ができた。
- ・ 会社間の情報の共有化とクロスチェック…………… プライムメーカーもパートナー会社も相互の審査会に出席するなど可能な限りオープンであった。
- ・ H-IIA の量産経験を活かしたこと…………… H-IIA で採用し効果を上げた品質管理手法を取り入れた。

最後に、3号機では NASA からの緊急の依頼で ISS で故障した機器の代替品である触媒反応器を急遽搭載した。NASA は米国 SPACE-X 社のドラゴン初号機で運ぶか“こうのとりの”で運ぶか検討した結果、信頼性があるとの理由で“こうのとりの”での輸送を決めたと聞く。NASA に評価されたことは“こうのとりの”の製造に携わる者としてこれほどうれしいことはない。“こうのとりの”で輸送することができる荷物は多岐にわたる。これからも、連続成功を続けてさまざまな荷物を ISS に届けたいと思う。

参考文献

- (1) 松山ほか, HTV 運用機 確実な製造に向けての努力と成果, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会
- (2) JAXA HTV3 Press Kit
- (3) 三木ほか, 宇宙ステーション補給機(HTV)の開発, 三菱重工技報 Vol.47 No.1 (2010)