

# 宇宙ステーション補給機(HTV)の連続成功と今後の技術発展

桐谷浩太郎\* 堀田成紀\*\*  
 千葉隆文\*\* 蒲原信治\*\*  
 佐藤正則\*\*

*Continuous Successes of H-II Transfer Vehicle(HTV) and Future Technology Evolution*

*Kotaro Kiritani, Takafumi Chiba, Masanori Sato, Shigeki Hotta, Nobuharu Kambara*

## 要旨

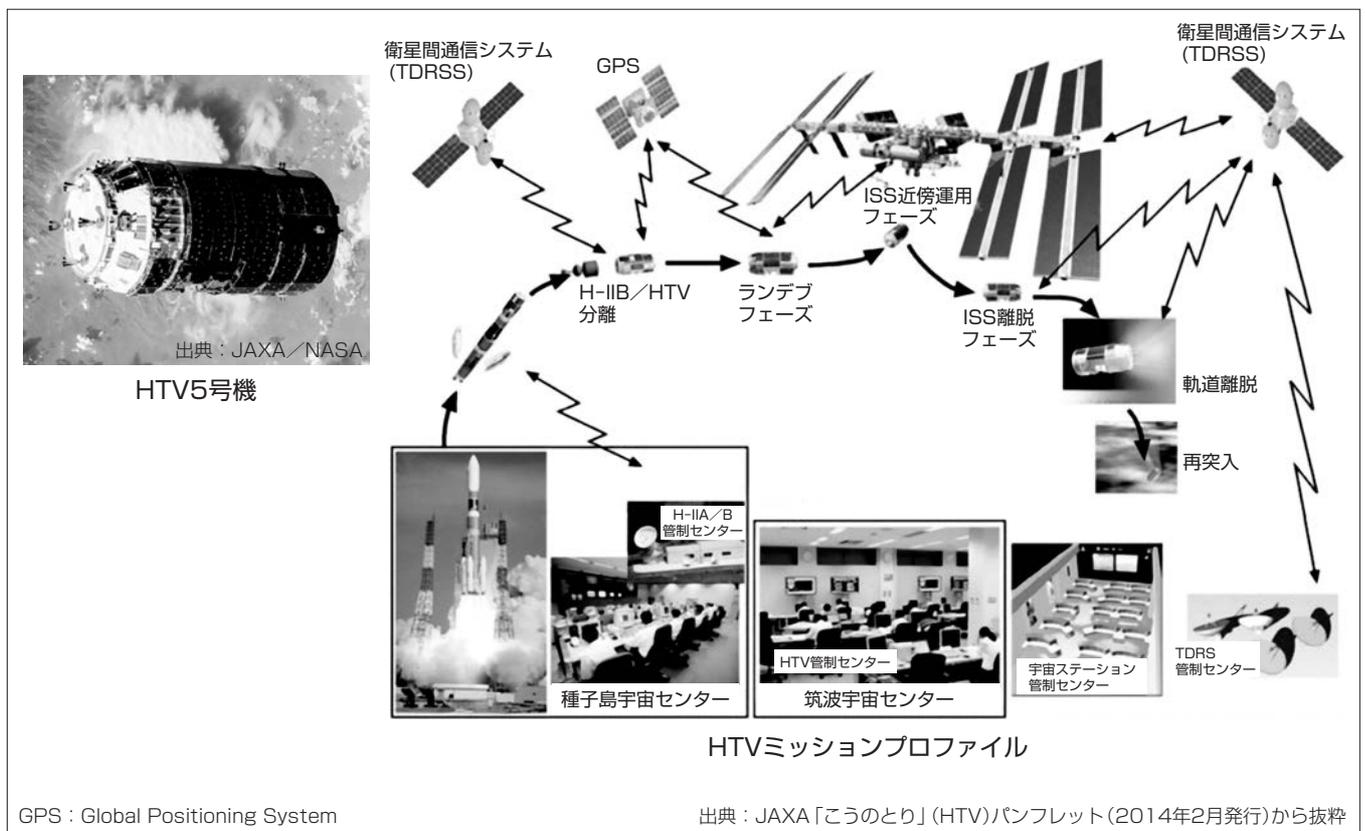
宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle : HTV) “このとり”は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) (当時、宇宙開発事業団(NASDA))が開発し、2009年9月の技術実証機の打ち上げからほぼ年1機の割合で打ち上げられ、2015年8月に打ち上げられたHTV5号機まで5機連続で成功を収めている。三菱電機は、HTVの頭脳である電気モジュール(機体表面の太陽電池パネルを含む)を担当しており、ランデブミッションを支える航法誘導制御系の開発メーカーとして、JAXAの下でランデブ運用の全般的な運用支援及び運用管制系のとりまとめを行っている。

電気モジュールには、航法誘導制御系、通信データ処理系、電源系、熱制御系等が含まれ、これらの品質を維持・

安定させることが連続成功を支える基盤となっている。

航法誘導制御技術ではランデブフライトソフトウェア(RVFS)がその中核となっているが、号機ごとにランデブ運用をスムーズに遂行するために、このRVFSをいかに維持管理していくかが重要である。

運用支援業務では数多くの訓練・リハーサルを実施しており、実際の軌道上運用や訓練からのフィードバックを反映して、より現実的かつ緊急対応性の高いものへ常に進化し続けている。運用管制系については、運用管制メンバーが気付いた“使いにくさを低減し、より使いやすくミスが少なくなる”提案を反映することで、ヒューマンエラーの少ない安定したシステムへと逐次発展させている。



## 国際宇宙ステーションの下方を飛行する“このとり”5号機(HTV5)

宇宙ステーション補給機“このとり”5号機(HTV5)は、国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)に向けて最終接近を実施した後、8月24日19時29分(日本時間)にISSロボットアームで把持された。その後、8月25日2時28分(日本時間)にISSロボットアーム運用によってISSとの結合を完了した。

1. ま え が き

宇宙ステーション補給機“こうのとり”は、ISSへの物資輸送を目的として、JAXAの指導の下、1997年から基本設計が開始され、2009年9月に技術実証機が打ち上げられた。

HTV 2号機から、機体製造は三菱重工工業(MHI)に移管され、それ以来ほぼ年1機の割合で打ち上げられ、2015年8月に打ち上げられたHTV5号機まで連続成功を取めている(表1)。日本の宇宙機、衛星の歴史で、HTVほど同じミッションを繰り返し、長期にわたって連続成功を取ってきたプログラムは他にない。

当社は、HTVの頭脳である電気モジュール(機体表面の太陽電池パネル含む)の製造を担当しており、またランデブミッションを支える航法誘導制御系の開発メーカーとしてJAXAの下でランデブ運用の全般的な運用支援及び運用管制系のとりまとめを行っている。

本稿では、HTVが連続成功を取ってきた要因について、

表1. HTVのミッション

号機	ミッション期間	備考
HTV1 (技術実証機)	2009年9月11日～ 11月2日	①技術実証 HTV1(技術実証機)ミッションでは、初打ち上げのH-IIBロケットとともに、初号機にして日本初のISSへの補給物資の輸送を達成した。
HTV2	2011年1月22日～ 3月30日	①運用結果の反映 HTV1(技術実証機)ミッション結果を受け、次の改良を行った。 ・誘導制御ソフトウェアの改修 ・航法センサソフトウェアの改修 ・温度センサを耐熱温度の高いものに変更 ②機体の改良、通信装置の国産化と軌道上実証 ・バッテリーの性能向上及び搭載数の削減 ・近傍通信システム(Proximity Link System: PLS)のトランスポンダ(送受信機)2系統のうち1系統を国産品に変更 ③東日本大震災の発生 ISS係留期間中に東日本大震災が発生したが、NASA等の支援もあり計画通りミッションを完遂した。
HTV3	2012年7月21日～ 9月14日	①主要機器の国産化 メインエンジン/RCS(Reaction Control System)スラスタを始め、様々な主要機器が国産化された。
HTV4	2013年8月4日～ 9月7日	①再突入をISSから観測 再突入軌道をISSから夜間観測可能な軌道に調整し、再突入で生じた光球を観測(将来の改修型宇宙機に参考となるデータの取得)した。 ②表面電位センサ(ATOTIE-mini)の搭載 ISS係留前後のHTVの表面電位とその変化を計測(HTVの表面電位が宇宙飛行士の船外活動等へ与える影響を調べるためのデータ取得)した。
HTV5	2015年8月19日～ 9月30日	①宇宙環境観測装置(KASPER)の搭載 HTV4に搭載したATOTIE-miniの発展型のセンサで、デブリモニタ用のセンサも持っている。
HTV6 (予定)	未定	①導電性テザー実証実験(KITE)の搭載 軌道上デブリ回収技術の1つである導電性テザーの原理実証実験。電気モジュールは実験環境の支援と、ISS接近用のレーザーレーダを用いてテザー先端の重りの位置計測を行う。

電気モジュール製造、航法誘導制御技術、訓練を含んだ運用支援、及び運用管制系技術の観点から分析した結果を述べ、それらを今後につないでいく技術の発展について述べる。

2. HTVミッション連続成功の要因

2.1 電気モジュール製造

HTVは量産機であるが、表1に示すような改善や設計変更があり、変更点に対しては設計から運用まで確実な対応が必要である。また、各号機のライフサイクルで発生した不具合は徹底して原因究明を行い、次号機以降に確実に反映している。量産機ならではの長い生産期間を通して、絶え間なく品質改善活動に取り組んできた。これらの活動が製品及び作業の高い品質の維持、ひいては連続成功の基盤となっている。

2.1.1 射場作業への申し送り事項

HTVでは、毎号機、当社鎌倉製作所での試験作業で得られた知見や発生した不具合情報等を“射場作業への申し送り事項”として整理して顧客であるMHIへ報告する活動を継続することで、射場作業での同様事象の再発防止及びスケジュールの厳守を実現している。

<射場作業への申し送り事項の例>

- ①特性値管理が必要な地球センサやGPSR(GPS Receiver)のデータ
- ②通信装置搭載コンフィギュレーションとその取扱以上の注意点
- ③搭載機器ソフトウェアバージョンと適用が必要となる再プログラム

2.1.2 次号機への申し送り事項

各号機の製造・試験での気付き事項や改善点、射場作業とりまとめのMHIが整理した知見を“次号機への申し送り事項”として管理し、次号機の試験開始前までにそれらを設計文書/試験手順書に反映させる。それによって、製品品質の改善、ヒューマンエラーの予防を行い、また諸作業の品質向上と効率化を継続的に実施している。

<次号機への申し送り事項の例>

- ①試験手順書の間違いやすい表現を改訂して明確化
- ②複雑な試験装置の接続手順には写真・図等を添付
- ③設計変更に伴う手順修正・要反映事項の反映確認

2.1.3 軌道上事象の反映

前号機の軌道上で発生した事象で、電気モジュールで対処が必要なものを次号機で対処し、同様の事象を軌道上で発生させない、また発生した場合でも即座に対処できる準備をあらかじめ行っておくことで、ミッション成功の確率を向上させている。

<軌道上事象の反映事項の例>

- ①航法誘導制御系搭載ソフトウェアの改良・最適化のためのバージョンアップ及び検証

②バス系機器搭載ソフトウェアの軌道上動作改善のための再プログラム製作及び検証

③発生事象原因の明確化，対処手順・運用への申し送り

## 2.2 航法誘導制御技術

航法誘導制御技術では，軌道上で発生した事象や気付き事項を分析し，次号機のRVFSに反映することで同じ事象を発生させないようにするとともに，類似事象への対策を行っている。

図1にRVFSを改修する場合のフローを示す。

このように，RVFSを改修する場合には，改修点が正常に動作することだけでなく，その改修が他の動作に悪影響を与えていないことを確認するために，航法誘導制御計算機上でのソフトウェア検証，及び各号機の実際の質量や運用手順を反映した打ち上げ前解析を行うことで，全体の動作が正常で，RVFSとしての品質を持っていることを検証している。

### 2.2.1 軌道上事象への対処

軌道上事象への対処の一例として，技術実証機で発生した姿勢制御システム(Reaction Control System：RCS)のスラスタ過熱事象への対処について述べる。

HTVは，ISSへの最終接近時にISS下方から接近するRバー接近という軌道を採用しているが，技術実証機ではRバー投入後の最初の停止点であるISS下方300mのHP点(Hold Point)でRCSスラスタが温度センサの許容温度以上に高温化する事象が発生した。そこで，主従2系統あるRCSスラスタを交互に切り換えて許容温度以上の高温化を防ぎ，ミッションを継続させた。ミッション完遂後の原因調査の結果，スラスタ噴射のデューティ(間欠的な噴射での噴射期間の割合)が高まるとスラスタが加熱することが判明した。

2号機以降への反映として，航法誘導制御系サブシステムでHP点を50m上方へ移動し，ISS下方250mとする軌道設計変更を行った。これは，ISSからの距離が近いほど，停止するために必要なスラスタ噴射を相対的に減らすことができるからである。また，推進系サブシステムで温度センサを換装し，スラスタ自体の限界までの温度範囲の計測を可能とした。

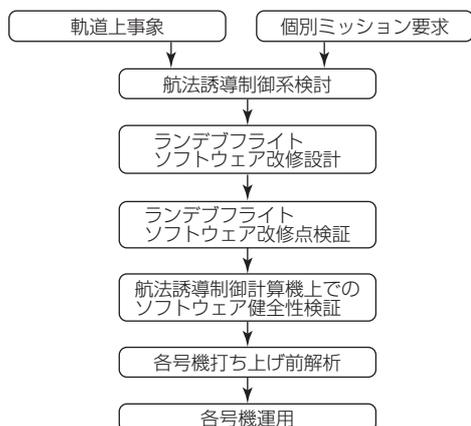


図1. RVFS改修から運用までのフロー

HTVのRバー接近の軌道制御はRVFSで自動で実施されるため，軌道設計変更を反映するためにRVFSの軌道制御ロジックを改修して対応した。この軌道設計変更は，ISSに接近するHTVの異常検知のしきい値にも影響するため，これについても設計変更を実施した。これらの変更を反映したRVFSの改修後の機能・性能検証では，HTV開発時に実施した401ケースのソフトウェア検証のうち，軌道変更及び異常検知しきい値変更の影響を受ける56ケースの再検証を実施した。検証結果の例として，図2にHP点を50m近づける軌道設計変更実施後のRバー接近のシミュレーション結果を示す。

改修結果を見ると，曲線で示されるRバー接近の飛行経路で，接近開始後の最初の停止点がISS下方300mから250mに正しく変更され，かつ最終的にISS直下まで接近できていることが分かる。

このように，検証されたRVFSを適用して飛行したHTV2号機では，軌道保持のためのRCSの噴射デューティを減少させることで，スラスタ高温化を防止することができた。

## 2.3 ランデブ運用及び運用管制系

### 2.3.1 ランデブ運用準備

HTVでは，有人の宇宙ステーションへのランデブ運用という日本が未経験の技術を確認するため，機体開発及び運用管制系の開発と同時並行で運用検討を行い，運用成立性の検証，開発への運用検討結果のフィードバックを行いながら，運用手順を固めていった。試験フェーズでは運用手順を試験に取り込み，試験で検証されたとおりの手順書を運用に提供することを徹底した。

運用手順書の整備に当たっては，網羅性の確保に努め，次の観点から手順書をリスト化・整理し，約2,080件の手順書を整備した。

- (1) 機体の全動作を網羅：約1,000件
- (2) 運用イベント失敗時の処置手順を網羅：424件
- (3) アメリカ航空宇宙局(NASA)安全要求への運用解を網羅：56件
- (4) 故障モード影響解析(FMEA)の網羅：534件

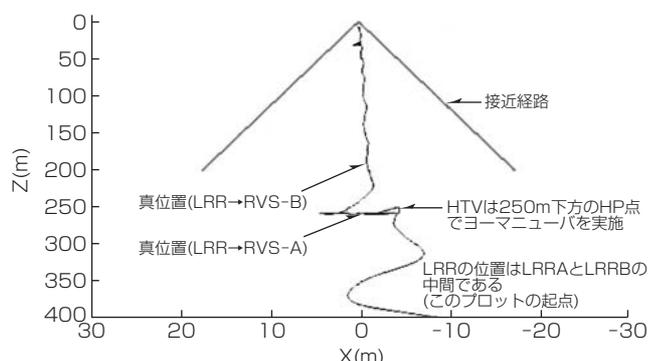


図2. ISS下方250mHPに変更後のシミュレーション結果 (スラスタ高温化対策でのRVFS改修後の検証結果)

(5) 想定異常のフォールトツリー解析(FTA)の網羅：70件

HTV各号機の運用終了後は、軌道上不具合や訓練を通じて得た不具合対応策を不具合対応データベースとして整備し、維持改訂を継続している。このデータベースによって、実績のある不具合対応策を素早く確実に、なおかつ運用管制チームで情報共有しながら手順進行できるようになり、緊急時対応能力が運用経験ごとに高まっていった。

### 2.3.2 運用訓練

HTVの訓練環境は実運用に限りなく近い。訓練装置は、航法誘導制御系の試験にも提供されるシミュレータをベースに各種サブシステムのモデルを組み込み、RVFSは実機と同じものを使用している。

HTV運用の大きな特徴の1つとして、ISSとの協調運用が挙げられる。訓練で実運用環境を模擬するために、日本ではISSの情報が、米国ではHTVの情報が必要となる。そこで、日米合同でHTV運用の訓練を実現するため、“分散シミュレーション(Distributed Simulation：DIS)”技術が採用された。これは、複数の場所にあるシミュレータ(コンピュータ)同士をネットワークで接続し、あたかも1つのシミュレータが動作しているかのように見せる仕組みである。今回HTVプロジェクトでこの技術を初めて宇宙分野で実用化した。

DISの導入によって、日米それぞれのシミュレータを見た目上は1つのシミュレータとして動作させることが可能となり、HTVとISSの複雑なシステム同士のインタフェースをリアルに模擬した訓練が可能となった。

このような高度な訓練環境の下に、毎号機15～20回の運用訓練を実施している。ちなみに、初号機では約100回に及ぶ訓練を実施した。

訓練では、不具合対応データベースの練度を上げるため、毎回違うタイミングで違う不具合をランダムに投入する。また、答えのある不具合対応にとらわれず、“ありえない”と言われるような異常事象をあえて発生させ、運用管制チームにリアルタイムで対処を考えさせるような訓練を織り交ぜる。そうすることで、実運用で起こるかもしれない“想定外の事象”への対応能力を磨き上げている。

実運用より先に訓練で経験することでスムーズに対処できた最も顕著な例が、HTV3のISS離脱時である。ロボットアームで外乱が印加されたことによって、HTVの衝突回避機能が働き、予定していた軌道とは大きく異なった軌道に入ってしまった。しかし、結果的に当初の計画通りの日時に地球へ再突入できたのは、事前にこの事象を想定した訓練を積み重ね、課題を抽出して全て解決しておいた賜物(たまもの)と考えている。

### 2.3.3 HTVミッション管制室(MCR)運用管制システム

HTVのランデブ及び係留運用を管制する運用管制システム(HTV Operation Control System：HTVOCS)は当社が開発したシステムである。

HTVOCSは、実運用や訓練・リハーサルでHTVの運用管制チーム(FCT)が気付いた“使いにくさ”や“より使いやすくミスが少なくなる”提案を次のポイントで評価し、ヒューマンエラーの少ない安定したシステムへと逐次発展させている。

- (1) 次号機の機能・性能の変更に対する地上支援機能(シミュレータモデル更新を含む)の付加必要性(最優先)
- (2) 前号機運用での、使いにくさやミスを誘発しそうな箇所の地上支援機能の改修(優先)
- (3) 前号機運用での、作業効率の向上が期待される地上支援機能の改修

## 3. 今後の技術の発展

HTVを更に高度化した次世代HTV(HTV-X)の開発を、現在JAXAで検討している。HTV-Xは、

- (1) 製造コストの半減
- (2) 将来への波及性のある技術
- (3) 汎用性の高いプラットフォームとしての技術実証等への活用

を目標として掲げている。目標(3)の汎用性の高いプラットフォームとしての活用は、これまでのHTVにはないコンセプトであるが、当社はこれまで複数の技術実証衛星の開発・運用を手掛けており、実験ペイロードインタフェースのノウハウを活用できると考えている。

HTV-Xでも、HTVと同様に連続成功を継続させるために2章で述べたような地道な努力が必要である。また、HTV-Xでは、これらをより効率よく実現していく仕組みを作ることで、同等の品質を低コストで実現することも重要となる。

## 4. む す び

HTVの連続成功と言っても、その1つ1つを見れば、号機ごとに機体製造・試験、軌道上運用の各フェーズで大小様々な課題が見つかる。しかし、課題が見つかるたびに、その対応策を、ハードウェア/ソフトウェアの両面で継続的に適用することで連続成功が成し遂げられてきた。

今後は、これらのノウハウをHTVに続く将来型宇宙機にも適用することで、日本の宇宙機開発に貢献していきたい。

本稿の作成に当たって、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の御指導を仰ぎ、三菱スペースソフトウェア(株)に支援いただいた。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 桐谷浩太郎, ほか：宇宙ステーション補給機(HTV)の開発と利用—ランデブ技術の応用と有人宇宙機への発展構想—, 三菱電機技報, **85**, No. 9, 530～535 (2011)