

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—

桐谷浩太郎* 小鐘幸雄***
千葉隆文**
津屋直紀**

Development and Future Application of H-II Transfer Vehicle (HTV)—Applications of the Rendezvous Technology and Road to Future Manned Spaceship—
Kotaro Kiritani, Takafumi Chiba, Naoki Tsuya, Yukio Koyari

要旨

宇宙ステーション補給機 (H-II Transfer Vehicle : HTV) は 1号機が2009年9月に、2号機が2011年1月に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (International Space Station : ISS) へのランデブ・ドッキングに成功し、ISSに必要な物資を届けた。HTVは、今後もISSに物資を届けるという重要なミッションを担っており、HTV 7号機までの5機の打ち上げが計画されている。

HTVシステムはフライトセグメント (軌道上部分)、グラウンドセグメント (地上運用設備)、ISSセグメントで構成される。三菱電機は (独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の指導によってフライトセグメントの電気モジュール/アビオニクス、及びグラウンドセグメント、ISSセグメントの開発、並びに飛行運用を担当している。

三菱電機は、フライトセグメントでは、誘導制御系・電力供給系・通信データ処理系の各電子機器が搭載されている“電気モジュール”の製造、試験を担当している。

グラウンドセグメントでは、JAXAの筑波宇宙センターに設置されたHTVを制御監視するための地上運用設備であるHTV運用管制システム (HTV OCS (Operation Control System)) の開発を行い、飛行管制、飛行計画、訓練試験支援作業をJAXAとともに実施している。

ISSセグメントではISS上と日本実験棟JEM内に設置している近傍通信システム (PROX) の開発を担当した。

HTVで開発されたランデブ技術とHTVフライトセグメント構成技術は、有人安全要求が適用されるISSへの輸送機の実用技術として確立している。この技術は、単に安定的にISSに物資を届け、離脱時に廃棄物を搭載し、大気圏へ突入するという現在のミッションを支えるだけでなく、回収機能を付加したHTV (HTV-R) にも貢献するものである。さらに、将来的には無人の月探査ミッションや軌道間輸送への応用、利用が期待できる技術を含んでいる。本稿ではその概要について述べる。

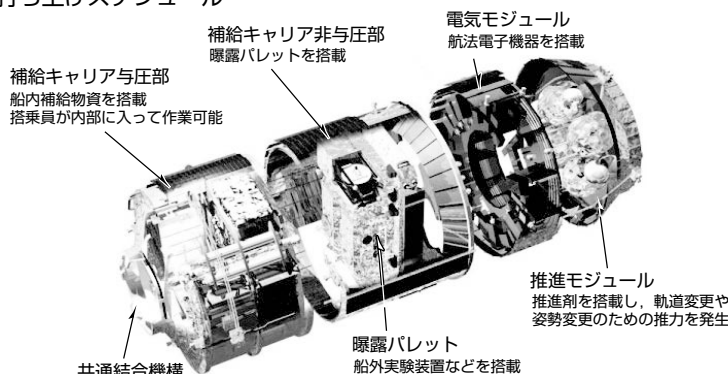
2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度
						
2009年9月 打ち上げHTV1	2011年1月 打ち上げHTV2	打ち上げHTV3	打ち上げHTV4	打ち上げHTV5	打ち上げHTV6	打ち上げHTV7

HTV打ち上げスケジュール



JAXA提供

ISSのロボットアームに把持される直前のHTV2号機



JAXA提供

HTVフライトセグメント構成

HTV概要

HTVは2009年度から原則1年に1機打ち上げが計画されている。三菱電機はHTVフライトセグメント内、電気モジュールの製造、試験を担当している。

1. ま え が き

HTV 1号機は2009年9月11日に打ち上げられ、ISSとのランデブ・ドッキングに成功し、ISSに物資を届けた。45日間の係留期間を経て、ISS内の廃棄物を搭載してISSから離脱し、同年11月2日大気圏に再突入し、そのミッションを完遂した。

ミッション完了の約1年3か月後の2011年1月22日にはHTV 2号機が打ち上げられ、HTV 1号機同様、3月30日に大気圏へ再突入しミッションを完了した。HTV 2号機では、HTV 1号機より2日短縮した5日間でISSまでの飛行を実現、開発時に想定していなかったISSノード2天頂側結合ポートへの移設などの複雑な運用を実施、60日間のISS係留期間も実現した、さらに再突入後の飛行及び破壊後のデータを取得し将来の回収機運用への技術データの蓄積を行い、大きな成果を得た。

本稿ではHTVの心臓部である電気モジュールを活用した将来の利用技術と今後の展望を示す。

2. HTV利用技術

HTVは、日本初の宇宙船であり、そこにはこれまでの日本の宇宙開発技術のすべてが凝縮されている。

特にHTV向けに開発した目的の時間に目的の場所に正確に到達するというランデブ技術は、若田宇宙飛行士によって1995年にスペースシャトルに回収された無人宇宙実験フリーフライヤ(SFU)に始まり、“おりひめ・ひこぼし”(ETS-VII)実験で習得した技術を、厳格な有人安全要求が適用されるISSへの輸送機への実用技術に高めたものである。

三菱電機はこの航法誘導制御分野において20年以上の歴史と実績を持っている。

また、電気モジュールには航法誘導系の他にもすべての

アビオニクス機能を含んでおり、特長として、2故障まで安全、1故障でも自立的に故障を分離して動作を継続できる故障許容/故障安全機能が各所に含まれている。この技術によって、HTVが有人システムであるISSへ安全にかつ、安定的に物資を運ぶためのランデブ・ドッキングを達成できることは、HTV 1号機、HTV 2号機の運用実績から証明された。しかし、このランデブ技術は現在のHTVのミッションの範囲にとどまらず、将来、ISSから実験、研究の成果物を地上に持ち帰る回収機能付加型HTV (HTV-R)へ発展させ、さらには無人の月探査ミッション、軌道間輸送機への応用にも発展可能な技術である(図1)。

将来的に有人宇宙機を開発していく場合、HTVのアビオニクス技術を2故障まで帰還可能に発展、冗長化していくことによって、搭乗員を必ず生還させるための技術に発展させることが可能と考えられる。HTVの開発、ミッションによって培われたランデブ・ドッキング技術を発展させることが、わが国の有人宇宙機開発の近道となる。

また、ほかの応用として、デブリ回収ミッション、月ミッションへの応用も考えられる。以下ではHTVの技術を利用した具体的な発展構想について述べる。

3. HTV発展構想

3.1 HTV-Rの検討

HTVの技術を応用し、更なるニーズにこたえる次世代の宇宙機として、現在回収機能付加型宇宙ステーション補給機(HTV-R)の開発が始まろうとしている。これは、HTVでは実施できなかった、宇宙ステーションからの物資を地上に持ち帰るというミッションを実現するために、HTVに回収カプセルを搭載した宇宙機である。これについては、JAXAでも2010年にHTV-R研究開発室が発足し、その準備が開始されている。現在は2017年ごろの打ち上げ

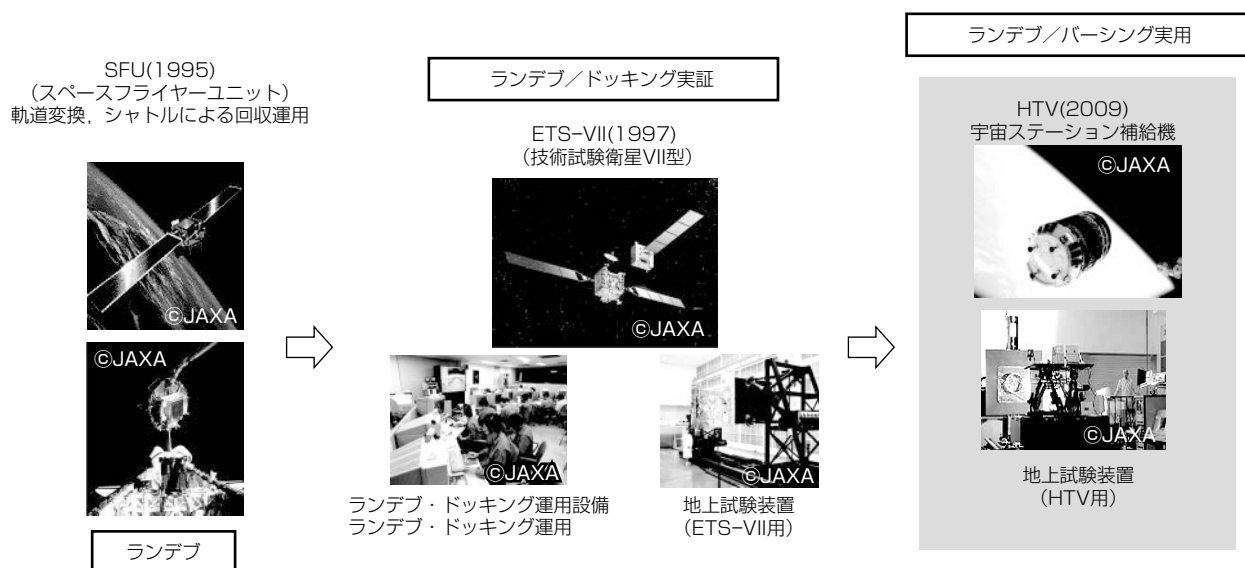


図1. ランデブ・ドッキング技術の進化

を想定している。

実現の方式としては、以下の2つの方式が考えられている。

- オプション1：補給キャリア非与圧部に曝露(ばくろ)パレットの代わりに中型のカプセルを搭載する案(図2)
- オプション2：補給キャリア与圧部の代わりに回収カプセルを搭載する案(図3)

現在はオプション2をベースとした検討が進んでいる。

オプション2は、現在の与圧部がそのままカプセルになった構造で、将来の有人カプセルにも発展可能なサイズである。そのため、将来の有人宇宙機の再突入の検討にも応用できる実証を行うことができる。

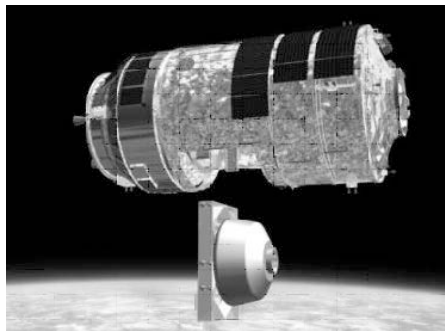


図2. オプション1



図3. オプション2

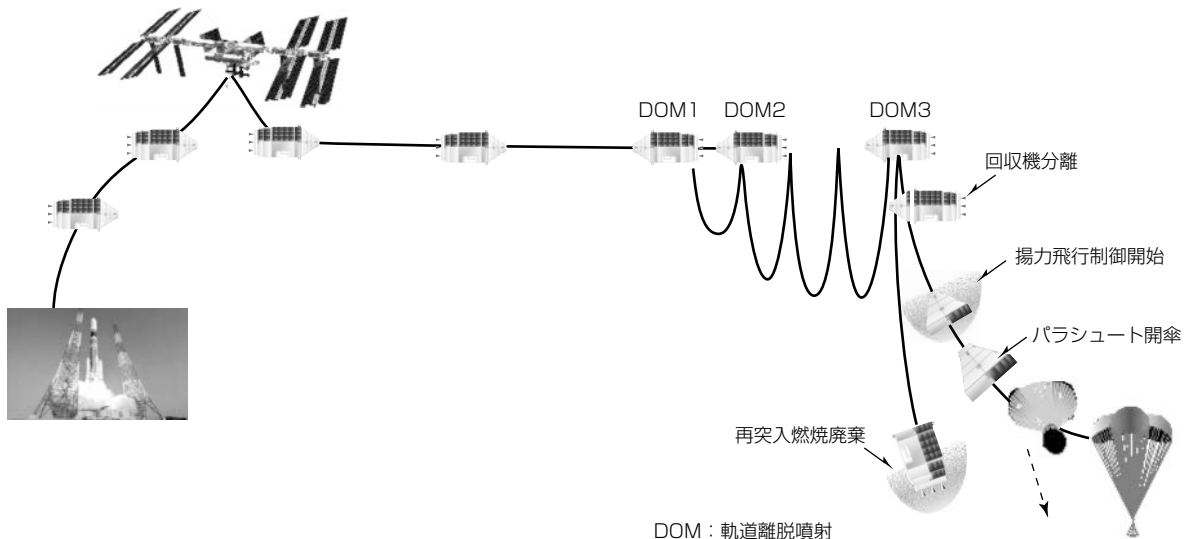


図4. HTV-Rのミッションプロファイル

三菱電機でも、HTV-Rに搭載する回収機HRV (HTV Return Vehicle) などについての検討支援を行っている。次に、その三菱電機案について述べる。

HTV-Rで想定しているミッションプロファイルを図4に示す。HTV-Rでは、宇宙ステーションとランデブシ、カーゴを移設後離脱するところまではHTVとほぼ同じプロファイルとなる。その後、大気圏突入軌道に入った後に、HRVを分離し、残ったHTV本機とHRVが別々に大気圏に突入する。HTV本機側は現行のHTVと同様に燃え尽きるが、HRVはパラシュート(又はパラフォイル)を開傘して着水する。

このミッションに与えられた技術実証項目は次のとおりである。

- (1) 揚力飛行制御技術
大気圏再突入において加速度4G以下の実現
- (2) 定点誘導技術
所定の着水点に所定の分散で誘導する技術
- (3) 緩降下技術
パラシュート(又はパラフォイル)によって減速する技術
- (4) 熱防護材の製造・組立技術

大気圏再突入で高温となる外部環境から船内を防護する防護材の製造・組立技術

- (5) 回収技術
着水したHRVを安全・確実に回収する技術

これらの技術分野で特に“(2)定点誘導技術”については、宇宙空間ではHTVの航法誘導技術が、大気圏内では、三菱電機の実績ある飛翔体の航法誘導技術が応用できる。また、この大気圏内の誘導制御技術は、“(1)揚力飛行制御技術”の4G以下の加速度を実現する上でも有効である。

(4)の熱防護材については、三菱電機がシステム取りまとめを行った2002年に打ち上げられた無人宇宙実験システム

(Unmanned Space Experiment Recovery System : USERS)に搭載された再突入カプセル(REcovery Module : REM)で使われたアブレータを用いることも選択肢として検討している。ただし、REMのアブレータは比較的小規模であったが、HRVにはそれを大型加工する技術が必要になると思われる。

“(3)緩降下技術”及び“(5)回収技術”については、HRVよりは一回り小さいが、REMにおいてもパラシュート開傘及び船舶による回収を実施しており、実績のある技術といえる。

このように、HRVの実証項目については、これまでの宇宙開発の実績の延長上にあるものであり、開発要素はあるものの、現在想定されている2017年頃の打ち上げまでには実現可能な範囲にあると思われる。

またHRVに搭載する電子機器には、将来の有人化を想定して有人安全要求を満足したアーキテクチャが必要である。有人安全性については、三菱電機はHTVの電気モジュール

において10年以上の長きにわたって開発され、NASA (National Aeronautics and Space Administration)の安全審査に合格した表1に示す数々のコンポーネントを持っている。これらのコンポーネントは、完全に流用できるもの、又は一部改修することでHRVのコンポーネントとして利用できるものである。これらのコンポーネントを用いて構成したHRVのブロック図の案を図5に示す。

HRVには、そのほかにも与圧部に搭載される環境維持装置、大気圏突入後の熱防衛装置、姿勢維持のための推進系、パラシュート、着水後のフローティングバック等の回収系が必要となるが、基本的にHTV又はこれまで国内で実績のある技術又はその延長で実現可能と考えられる。

3.2 HTVによるデブリ回収

現在宇宙空間にある人工物体は直径10cm以上のものだけで21,000個ほど観測されており、その内で機能していない人工物体(以下“デブリ”という。)は95%以上ある。これ

表1. HRVの電気機器候補

コンポーネント略称 (())内はHRVでの呼称)	名称	機能概要
GCC (RGCC)	航法誘導制御装置	地球センサ及びSIGIからの情報に基づき宇宙機の位置、速度、姿勢を推定し、所定の軌道・姿勢に誘導するように制御する装置
BIU (RBIU)	バスインタフェースユニット	各機器からのテレメトリを収集、各機器へのコマンドを送信する装置
CDP (RCDP)	CCSDS処理装置	CCSDS ^(注1) 勧告に基づくデータ処理を行う装置
TRX (RTRX)	RF通信機	外部と通信するための通信機
DIP (RDIP)	ダイプレクサ	送信波と受信波を分岐させる装置
VDE (RVDE)	バルブ駆動装置	推進系のバルブを駆動する装置
SIGI (RSIGI)	宇宙用統合航法誘導装置	ジャイロ、加速度、GPSを統合した宇宙用の航法誘導装置
ESE (RESE)	地球センサ制御装置	地球センサの制御部
ESH (RESH)	地球センサヘッド	地球センサのセンサ部
MBU (RMBU)	メインバスユニット	複数のソースからの電力供給を制御する装置
BDCU (RBDCU)	バッテリー放電制御装置	バッテリーの放電を制御する装置
PBAT (RPBAT)	バッテリー	電力を供給するバッテリー

(注1) Consultative Committee of Space Data Systemの略。宇宙空間で使われる通信・データ処理の方式を定めるために構成された国際委員会。

RF : Radio Frequency, GPS : Global Positioning System

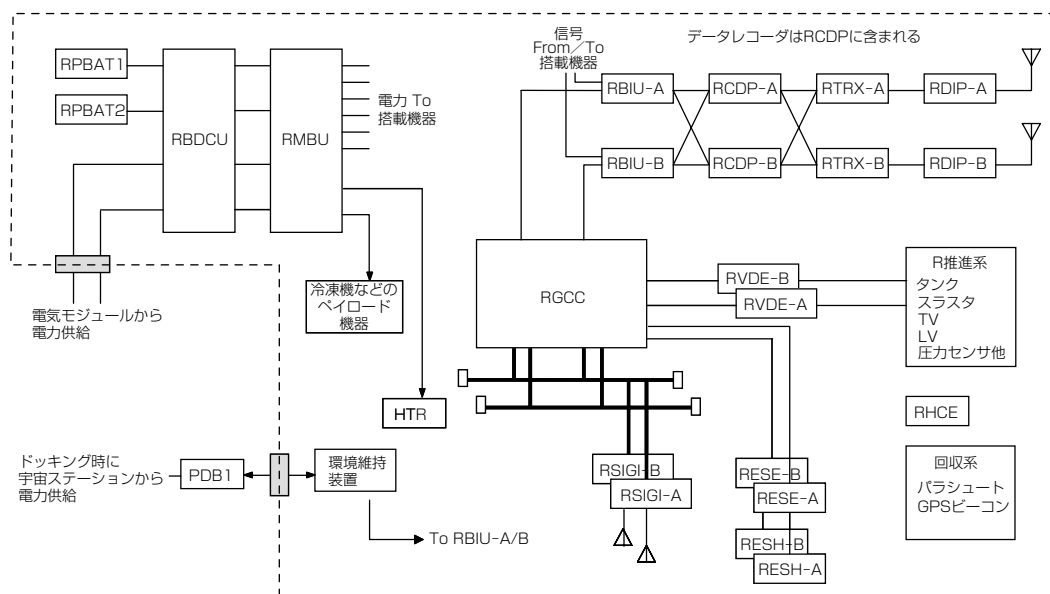


図5. HRVのブロック図

らのデブリは不要となった人工衛星やロケット、及びそれらの構成部品や断片等である。宇宙ステーションへデブリが衝突した場合には人命への影響が出る場合もあるため、常時デブリを監視しており、デブリを回避する軌道制御が年に数回の頻度で発生している。HTVのフライトにおいても、デブリとの衝突を回避する時には、デブリ回避軌道制御(Debris Avoidance Maneuver : DAM)を実施するように計画している。デブリは宇宙ステーション運用上の脅威のみならず、その回収は今後の宇宙空間利用において喫緊の課題の一つである。

HTVでは宇宙ステーションの不用品を機体とともに大気圏内で燃やし尽くし安全に廃棄するが、このミッションを更に発展させ、積極的にデブリを回収してから大気圏に再突入して廃棄するのがデブリ回収ミッションである。このHTV発展構想では、図6に示すようにHTVの非与圧部にデブリの捕獲機構を搭載し、ターゲットとなるデブリとランデブして、非与圧部にてデブリを保持し、そのまま大気圏に突入する。

宇宙ステーションと異なり、デブリは自身の位置情報の伝送手段やレーザ計測のための反射板を持たず、自由な回転運動をしている。いわゆる非協力型ターゲットであり、ランデブ及び捕獲には高度な技術が要求される。三菱電機では光学カメラに距離情報を取得できるレーザセンサなどを組み合わせ、デブリとの相対位置・姿勢を計測可能な複合航法系を検討中である。

この発展構想は、まだ検討の余地が多くあるが、従来のHTVミッションとデブリ回収の機能を抱き合わせることによって、デブリ回収専用のサービス宇宙機を単独で打ち上げる場合に比べて、打ち上げ費用を抑えることが可能となる。

3.3 月ミッションへの応用

HTV発展型の別のアプリケーションとしては月ミッションへの応用がある。2章で述べたようにHTVはISSの有人安全性を満たした宇宙船であり、ランデブ航法誘導能力も持っており、これらの技術をベースにした月ミッションの実現は有力な発展型といえる。

3.3.1 月ミッションのロードマップ

月ミッション計画は、図7のロードマップに示すように3期で構成されている。HTVの技術を応用するのは、第二期以降であり、月周回軌道への投入・月着陸・月滞在・月離脱・帰還の一連のプロセスを実現する。月周回フェーズまでの技術は、小型衛星による月探査で獲得できていることを前提とすると、第二期に特徴的なフェーズは月着陸フェーズ及び月滞在フェーズであり、着陸誘導技術、航法センサ技術、アクチュエータ技術、構造技術、及び有人安全技術等が必要となる。

HTVは輸送船として基本的な機能を備えており、与圧部には多くの物資を搭載できる機能を持っている。また、

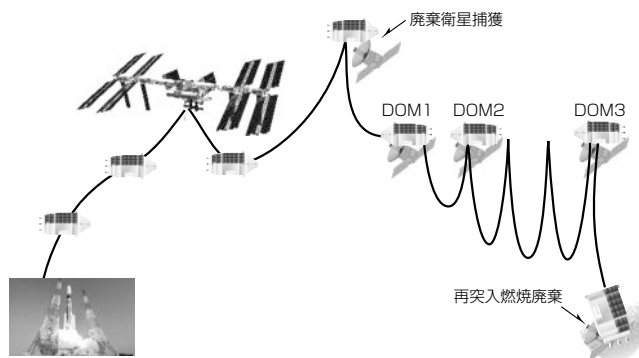


図6. HTVによるデブリ回収・廃棄プロセス

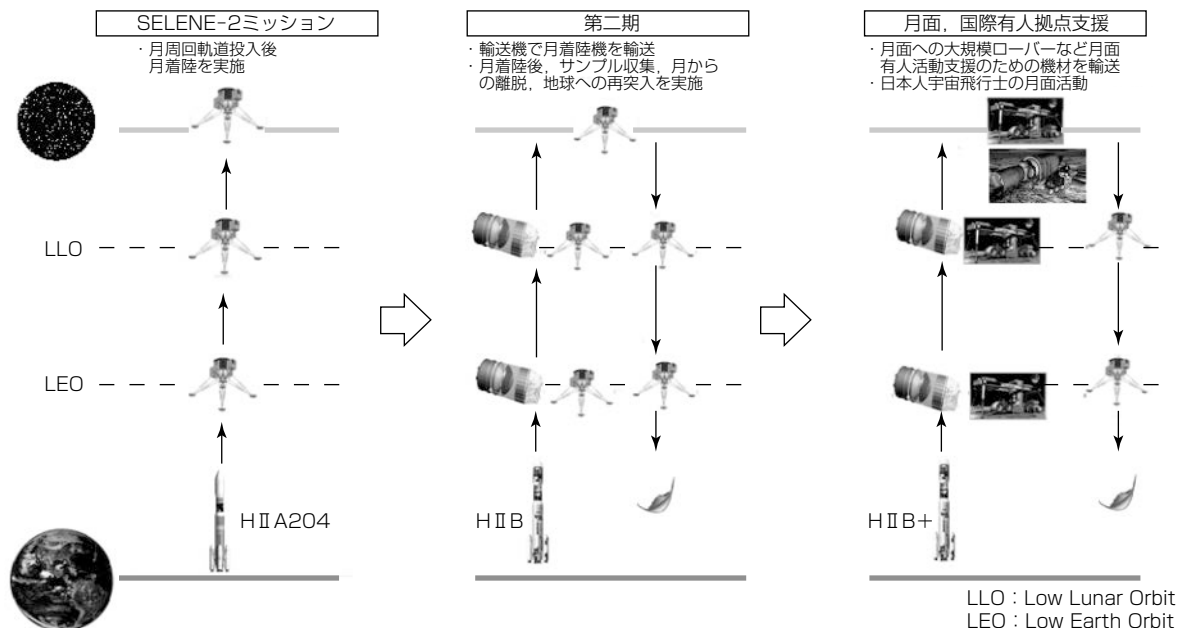


図7. 月ミッションのロードマップ

電気モジュールに搭載されている航法誘導装置は月周回におけるランデブ・ドッキングを実現する技術の核となる。この機能は月周回衛星、月着陸船、又は月面基地に物資を輸送するために活用でき、この意味において、HTVは月ミッションに対するシーズを十分に持っていると言える。

3.3.2 月ミッションに活用できるHTVの技術

HTVの技術の中で月ミッションに活用できる主要な技術を次に示す。

(1) ランデブ・ドッキング技術

月ミッションにおいては、月遷移／周回軌道投入、月着陸／離脱誘導制御が重要であり、これらの機能・性能を実現するためには、HTVによって実証された以下のランデブ技術がコアとなると考える。

①遠方ランデブ技術

打ち上げ後、ISS近傍迄到達するためのランデブ技術

②近傍ランデブ技術

ISS近傍で有人安全性を満たしつつ接近する技術

③大気圏再突入

所定の地点・軌道で再突入させるコントロールドリエントリー技術

④ランデブ飛行、自動計画技術

ISS軌道条件に基づく自動計画技術

⑤NASAとの協調運用技術

NASAとの協調運用のノウハウの蓄積

(2) HTVアビオニクス技術

HTVの電気モジュールは、電力供給機能、航法誘導機能、通信・データ処理機能等のHTVのアビオニクス全体を制御・統括している。これらの機能は、HTVがISSに接近・係留されることから2fail safe要求を満たすように構成されている。

しかしながら、月ミッションを想定した場合には初期には無人宇宙船として使われることになるため、HTVのアビオニクス技術をベースとしつつ、有人安全・ISS対応機能は削除することが可能であり、軽量化・省電力化を実現できるものと思われる。

(3) 有人安全技术

月ミッションが順調に進むといずれ有人の宇宙基地の建設が始まる。このとき、有人拠点へのアクセスに対しては、有人安全が要求されると考えられる。HTVで獲得した有人安全技术は、このときに利活用できると考えられる。特に、次のハザード制御及びCBCS要求についてはHTVで実現した技術・経験を活用することができる。

①ハザード制御

2つの故障又は2回の誤操作、又はそれらの組合せによってもカタストロフィックハザードが起きない。

1つの故障又は1回の誤操作によってもクリティカルハザードが起きない。

②CBCS(Computer Based Control System)要求

Must Work Function(MWF)要求

意図せぬ機能停止がハザードとなる場合の要求

Must Not Work Function(MNWF)要求

意図せぬ動作がハザードとなる場合の要求

4. 有人技術への課題

HTVの技術をHTV-R、月ミッションからさらに発展させた次のステップとしては、日本初の有人宇宙船への挑戦がある。

HTVは、有人安全性を満たしてはいるが、当然のことながら有人機ではない。有人化するためには、以下の主要課題の解決が必要である。

①環境・生命維持装置の開発

②緊急脱出装置の開発

③クルーが操縦するためのコンソールの開発

④2fail operativeの実現

⑤打ち上げ環境を緩和した有人に適した打ち上げ機の開発

⑥大気圏再突入から着水までの船内環境維持

④の2fail operativeとは、2故障が発生しても運用を継続できる設計であり、HRV開発の延長としてそのアーキテクチャを確立することができると考えている。また、⑥については、3.1節で述べたHTV-Rの開発におけるHRVの主要課題であり、HTV-Rミッションの中の実証がその第一歩となると考えている。

その他の課題については、それぞれ国産技術にとってはチャレンジングな問題であり、その開発には相応のリソースが必要になると思われる。しかしながら、例えば、HTVによって築かれた日米の相互信頼と実績に基づき、協力して進めることができれば、より早く有人宇宙機の開発を達成できるものと考えられる。

5. む す び

HTVの発展型として、回収機能付加型宇宙ステーション補給機(HTV-R)、デブリ回収ミッション、月ミッションについての構想を述べた。

HTVの開発によって得られた技術成果は、本稿で述べたこと以外にも、多くの発展的な要素を持っており、サブシステムレベル、コンポーネントレベルにおいても今後応用が期待できると考えている。

参 考 文 献

- (1) 桐谷浩太郎, ほか: HTV発展型構想について, 日本航空宇宙学会第41期年会講演会(2010)
- (2) 虎野吉彦, ほか: HTVとその将来展望, 三菱電機技報, 83, No.3, 199~202(2009)