

宇宙ステーション補給機（HTV）の  
再突入に係る安全評価

質問に対する回答

平成 21 年 6 月 19 日

宇宙航空研究開発機構

**【本資料の位置付け】**

本資料は、平成21年6月12日に開催された第3回宇宙開発委員会安全部会におけるH-II Bロケット試験機による宇宙ステーション補給機（HTV）技術実証機の打上げ及びHTV技術実証機の再突入に係る安全評価において、宇宙ステーション補給機（HTV）の再突入に関する報告に対して同部会構成員から提出された質問等に対し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が回答をまとめたものである。

## ● 目次

1	HTV 搭載推進薬量	3 ページ
2	残余推進薬量	4 ページ
3	TDRSS	5 ページ
4	着水予測区域算出	6 ページ
5	タンブリングについて	7 ページ
6	タンブリング	9 ページ
7	落下候補域	10 ページ
8	落下区域についての調査	11 ページ
9	着水予測区域について	12 ページ
10	ノータムの通知および調整	13 ページ
11	落下物について	14 ページ
12	HTV 推進系タンク材質	15 ページ

【質問番号 1】 HTV 搭載推進薬量

【質問内容】

安全 3-3-4 の資料 P10 では MMH 918kg、MON-3 1514kg が搭載されていることが示されている。ISS への接近、離脱、再突入制御等個々の制御に必要とされる Budget Plan を説明してください。

【資料の該当箇所】 安全 3-3-4 10 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

HTV 打上げ前に、打上げ時質量や ISS 軌道をもとに、ロケット分離～再突入に至るまでの各イベント毎の増速量、消費推進薬量を解析しています。

消費推進薬量は、往路での緊急離脱の有無や何らかの理由による接近のやり直し、軌道上待機、及び復路での廃棄カーゴ質量等に応じて変わってしまうため、実際の解析では、各ケースを詳細に分けて検討しています。以下に、各イベント及びそれに対応した推薬消費量の代表例を示します。

イベント	消費推薬量
(ノミナル)	
・ ロケット分離～キャプチャ	約 870kg
・ 各種デモンストレーション	約 100kg
・ ISSからの離脱	約 30kg
・ 軌道離脱、再突入	約 500kg
(小計)	約1500kg

ノミナルで必要となる推薬量は約1500kgであるため、推薬搭載量が2432kg (MMH 918kg、MON-3 1514kg) の場合、余剰推進薬量は約932kgとなります。この余剰推進薬量により、接近のやり直し、軌道上待機または緊急離脱等を実施することになります。(参考までに、ISSでの把持点まで到達しながら、緊急離脱を行い、再度キャプチャまで実施する場合の消費推薬量は約250kgほど必要です)

【質問番号2】 残余推進薬量

【質問内容】

DOM-3 時点における残余推進薬量はいくらと予測されているか？この量が多い場合、投棄されるのだろうか？ また、サブシステムシステムの健全性が確認できない場合は、軌道上昇もありうると説明されている。DOM-3 時における残余推進薬に対しての判断基準と手順をお示しいただきたい。

昨年2月米国が制御不能となった NRO 偵察衛星の爆破を行っている。このケースでは500kg のヒドラジンの地上への落下、それによる人的な被害を懸念して爆破したとされる。コロンビアの事故例では、タンクが堅牢であったため、地上に到達したヒドラジンがあったと認識されていたようで、今回も偵察衛星のヒドラジン量に比べて決して少ない量ではないと思う。

参考 <http://www.defenselink.mil/news/newsarticle.aspx?id=48974>

(Navy to Shoot Down Malfunctioning Satellite)

【資料の該当箇所】 安全3-3-3 14ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

DOM-3時点における残余推進薬量は、打上げ時質量や、搭載推薬量、ISS軌道、往路でのデモンストレーション有無、アボート等のオフノミナル運用の有無、廃棄カーゴ質量等によって大きく変化します。技術実証機では、推薬を最大量搭載するため、DOM-3終了時点の残余推進薬量は約300kg～900kgとなります。

DOM3マヌーバ終了後に、RCSスラスタ噴射によりHTVをタンブリングさせ、残余推進薬量の消費を行う計画です。なお、残余推進薬量の多少によらず、タンブリング以外の積極的な推薬投棄運用を実施しない計画ですが、落下域に確実に落とすことを目指した運用を行うことで、再突入による空力加熱や海面衝突時の衝撃により、タンクは破壊されると判断しています。

DOM-3に移行しようとする前にシステムの健全性を確認し、異常があった場合にはトラブルシュートを実施した上でDOM-3へ移行します。

【質問番号3】 TDRSS

【質問内容】

- ・ 1 局の TDRS のみで可視区間が設定できることを確認していると説明されている。Hand Over がないと理解できるが、これがある場合どのような問題が生ずるのだろうか？ TDRSS はプライマリーが故障した場合、即時の切り替えがされるとされるが、このような事態にも対処できるのだろうか？
- ・ TDRSS は NASA (ISS, S/S, 地球観測衛星) だけでなく、DOD の利用があり、他国のユーザに対しては利用が制限されることもあると聞いている。HTV の再突入制御は優先的な使用が認められているのかどうか、確認したい。

【資料の該当箇所】 安全 3 - 3 - 3 11 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

前者の質問についてですが、計画段階において、TDRSS 1 衛星によって DOM3 燃焼フェーズにおける可視時間が得られるように再突入計画を立案しております。解析上でもそれが可能であることを確認しており、Hand Over がなされないような運用計画としています。

仮に、Hand Over が発生した場合は、10~20 秒程度のテレメトリ未受信・コマンド不可時間帯が発生しますが、その程度の不可視であれば運用には影響いたしません。

次に TDRSS の故障時の対応ですが、再突入フェーズにおいて用いる TDRSS は TDRS-ZOE (インド洋上空に位置) です。この衛星のカバーエリアは他の TDRSS によりカバーできないため、DOM3 実施前に TDRS-ZOE に不具合が発生し、使用不可となれば軌道離脱は NoGo となります。しかし、TDRS には複数のトランスポンダを持っているため、1 つの送信機の故障だけでは完全な機能喪失とはならないことから、TDRSS の故障による影響は少ないと考えます。

後者の質問に対しては、DOM3 実施区間は「Critical」という最優先期間の扱いとすることで NASA と合意しており、優先的な TDRSS 予約割り当てが受けられることが既に調整されております。

【質問番号4】着水予測区域算出

【質問内容】

ロケット等の評価でも使用している実績のあるツールを使用しているとある。過去、安全部会に提示され議論されている落下物予想区域はロケット一段目であるが、今回はもっと高い高度からの落下であり、記載されているツールは応用可能なのだろうか？上段の落下についてもデータを持っているようにも思えるが、それならば実績をリストしていただきたい。

【資料の該当箇所】安全3-3-3 16ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

HTVの再突入においては高度120kmに目標ポイントを設定し、最終軌道離脱燃焼(DOM3)の後にそのポイントに向けて弾道飛行をさせます。その目標ポイントからの着水予想区域の算出はロケット一段の場合と違いはありません。

なお、HTVの解析ツールでは、ロケットの解析に用いているツールに対してHTVの条件に適合するように以下の機能を有しています。

- ・ 大気密度及び大気密度の分散のモデルを導入
- ・ 着水領域付近の風速及び風速の分散のモデルを導入
- ・ 再突入運用に必要なマヌーバの時刻と減速度量の計算
- ・ 再突入マヌーバ実施時のTDRS可視解析

着水予想区域の算出にあたっては、特に大気密度と風速のデータが重要ですが、それぞれ、

米国にて整備され、大気密度はUS Standard Atmosphere、風速についてはThe Global Reference Atmosphere Model (GRAM95) を使用しております。

予測区域の設定は、計算値に対して余裕をもって設定しています。

【質問番号5】 タンブリングについて

【質問内容】

タンブリングは自動で行われるとのことだが、どのようなタンブリングが行われるのか。機構方向及び機軸に垂直方向の重心オフセットを考慮しているのか。最悪状態はどういう状況を考慮しているのか。

【資料の該当箇所】 安全3-3-3

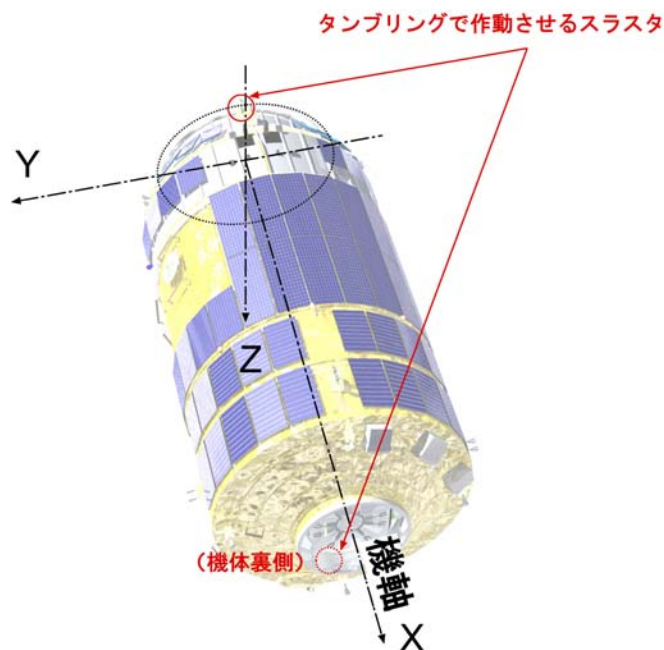
【回答者】 JAXA

【回答内容】

タンブリングは以下のシーケンスで実施されます。

- 3回目（最終）軌道離脱燃焼（DOM3）終了
- 軌道離脱燃焼事後確認（600秒）
- タンブリング準備（60秒）
- タンブリング開始

タンブリング自体は、ピッチアップ方向へ RCS スラスタ 2 基を連続噴射を継続します（停止コマンドは発しないため、そのまま HTV の分解まで継続します）。使用するスラスタは前方下面、及び後方上面のそれぞれ 1 基ずつになります（下図を参照ください）。



タンブリング自体はピッチ方向への回転ですが、機軸方向（X 軸方向）については問題ありませんが、機軸に垂直方向（Y、Z 方向）の重心オフセットとして、廃棄カーゴの積み方の不均一などを考慮して、最大 200mm までのズレを許容する設計となっており、その重心オフセットによって最終的にフラットスピン方向への回転が発生する可能性があります。



フラットスピン時には、縦のタンブリング時と比較して空気抵抗が増える（弾道係数が小さくなる）事になり、より手前に落ちることになります。が、現在の破片落下解析では再突入直後に HTV からもっと軽くて空気抵抗が大きな部材が分離して落下することも考慮して落下区域を設定しており、縦のタンブリング、フラットスピンによる空気抵抗の増減については、その範囲内に包括されています。

（後半の部分については、質問番号 6 もご参照ください）

【質問番号6】 タンブリング

【質問内容】

Tumblingの持続時間が示されていないので、よく分からないが、結局はFlat Spinに行きつく。その場合、大気からより多くの抵抗を受けるはずであり、着水区域が予測と異なることが心配される。Tumblingについては地上における品質保証は「解析」によっているのではないかと考えるが、この件についてはどのように決着しているのだろうか？

【資料の該当箇所】 安全3-3-3 13ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現在、Tumblingは最終の軌道離脱燃焼(DOM3)の完了後、600秒の待機時間によって機体の状況を確認し、続く60秒間の準備モードを経た後に連続のピッチアップ燃焼によって実施します(シーケンスの詳細は質問番号5をご参照ください)。

従って、ご指摘の通り、再突入までに時間があり、最悪フラットスピンに至る可能性があります。フラットスピン時には、縦のタンブリング時と比較して空気抵抗が増える(弾道係数が小さくなる)事になり、より手前に落ちることになりますが、HTVの落下安全解析では、途中でもっと軽くて空気抵抗の大きな部材が分解し、落下したケースを想定して、弾道係数として $10\text{kg/m}^2 \sim 500\text{kg/m}^2$ と非常に広く設定した落下解析によって安全を保障しています。従って、フラットスピンによって空気抵抗が増大する(弾道係数が低くなる)方向には、特に大きな余裕を有しており、フラットスピンのままずっと続くような飛行姿勢でも想定海域内に着水します(実際には空力加熱で途中で分解し、フラットスピンのまま着水まで続くことはありません)。

【質問番号7】 落下候補域

【質問内容】

詳細設計終了時には、着水予測区域はニュージーランド東沖とオーストラリア南西沖が提案されていた。今回、後者は除外されたことが説明されている。詳細設計で二つ考慮した理由と、今回一つに変更した理由を説明していただきたい。今回の資料 P11 でも、両再突入軌道について確認されているようで、一つに絞ったのが今回の部会開催の直前に突然決められた様子であり、説明を求めたい。

【資料の該当箇所】 安全 3-3-3 13 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

もともと着水予測区域選定に当たっては、「陸域がない海域であり、かつ、排他的経済水域外であること」という JAXA 基準を考慮して選定しており、上記の基準に対する適合性という意味においては、オーストラリア南西沖区域も適合しています。

ニュージーランド東沖とオーストラリア南西沖の双方の落下区域を両方設定した場合、2つの着水予測区域をターゲットにすることよりも、1つの区域をターゲットとするほうが運用面での混乱が避けられると考えております。また、オーストラリア南西沖は、着水予測区域の幅が狭く、本区域に期待できる再突入機会は1日1回と限られるため、ニュージーランド東沖を設定しています。

【質問番号8】落下区域についての調査

【質問内容】

落下区域を飛行する定期航空機ルート、航行する貨客船の定期航路について事前調査は行っているか？ また、落下時期に漁場（マグロ漁）とはなっていないかどうかについて確認しているか？

【資料の該当箇所】安全3-3-3 17ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

着水予測区域の航空機及び船舶に対する安全確保については、定期航空路／貨客船航路の有無にかかわらず国際的に取り決められたノータム及び水路通報等の手続きを適切に行うことで実現することとしております。従って、定期航空路や貨客船航路の有無は着水予測区域設定の条件とはしておりません。

ただし、今回設定している海域については可能な範囲で以下の調査を実施しておりますので、参考に示します。

<定期航空路>

- ・ 定期航空便の航行についてはその発着国においてそれぞれ許認可を行っておりますが、航空路は天候等の影響で適宜変更されるため、規制されておられません。
- ・ 民間機関の編集する世界航空路チャート（ジェプセン社（Jeppesen）のエンルートチャート）によれば、当該空域は、定期航空路路線としては現在存在しない、もしくは、あったとしても航空路の密集地帯ではないと考えられます。

<貨客船航路>

- ・ 当該区域を航行する船舶の定期航路は10本程度（大洋航路誌P25、海上保安庁刊行）です。

<漁場>

漁場については、水産庁の情報を参考に以下の魚種（南太平洋域で漁が想定される主なもの）について確認しており、ビンナガ及び南マグロの分布域が今回設定する安全区域（南緯45度以南）と一部重なるものの、一般的な漁場との干渉はありません。

（確認魚種）

クロマグロ、ビンナガ、キハダ、メバチ、ミナミマグロ、クロカジキ、カツオ

【質問番号9】着水予測区域について

【質問内容】

安全3-3-3 P16の200海里の赤い線は必要ない。削除すべき。

【資料の該当箇所】安全3-3-3 16ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

以下のように修正しました。



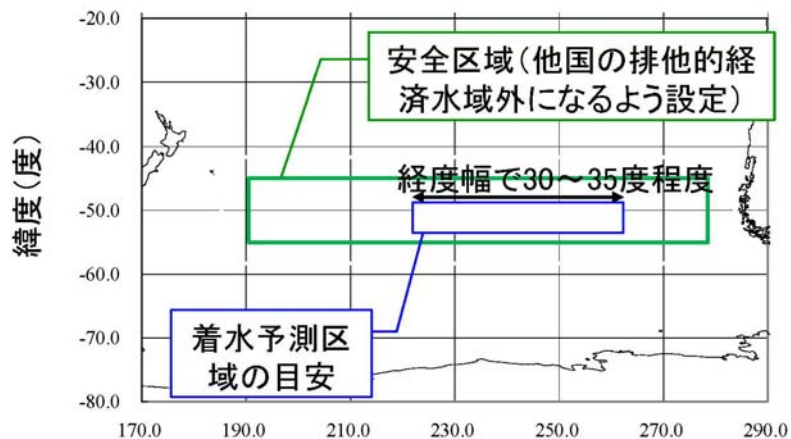
## 4. HTVの再突入飛行の安全対策

### 4.7 着水予測区域の設定

再突入後の着水予測区域の算出については、ロケット等の評価でも使用して実績のあるツールを使用している。また、その際以下を誤差要因として加味しており、それでも安全区域に対して十分小さい領域であることが確認できているため問題ない。なお、実際の着水予測域の位置は、再突入を実施するタイミング等によって異なり安全区域内で一定ではない。

#### 誤差要因

- ・機体の再突入時初期条件の変動
- ・大気密度の変動
- ・風



経度(度)

16

【質問番号10】ノータムの通知および調整

【質問内容】

国交省は関与せずに直接文科省（JAXA?）が影響国の関係機関に対して行うこととなっている。独自に行うことで国交省が行う場合に比較して発信元、受信元で効果に違いはあるのだろうか？

【資料の該当箇所】安全3-3-3 17ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

国際条約上、当該空域を担当する国（HTVの再突入の場合はニュージーランド及びチリの）の航空当局がノータムを発信することとされておりますため、ニュージーランド及びチリの航空当局から適切なタイミングで必要な情報が出されるよう、JAXAと各担当局とで調整を進めているところであり、その効果には何ら相違はありません。

（参考）HTV 技術実証機の着水予想区域は日本の国土交通省が所管する領域ではありませんが、参考情報として、航空路誌補足版に再突入の概要を記載していただくことを国土交通省航空局に依頼しております。

【質問番号 1 1】 落下物について

【質問内容】

燃え尽きずに落下するのはどのくらいの量か。計画通りにいった場合の量と、うまく燃えなかった場合の最大量を示してほしい。

【資料の該当箇所】 安全 3 - 3 - 3

【回答者】 J A X A

【回答内容】

現在、実施している溶融解析では、物体の熱容量と潜熱に対して、空力加熱で発生する熱量が超えると、溶融したと判断しています。そのため燃え方に差があるという評価は行っていません。

バッテリー、ラック、タンク、スラスタが融点に至らない結果となっており、残存する結果となっています。ただし、解析を簡略化するため、ラックはアルミ塊（最大 800kg）、バッテリーはステンレス塊（75kg）で仮定していますが、実際は板構造であり溶融するものと考えています。

燃料タンク（27kg、チタン合金、1mΦ）

気蓄器（19kg、チタン合金、56cmΦ）

スラスタ（4kg、ニオブ・チタン合金、38cmΦ × 67cm）

評価にあっては質量ではなく、落下域に影響を及ぼす面積として行っており、所定の落下区域内に収まる評価を得ております。

【質問番号 1 2】 HTV 推進系タンク材質

【質問内容】

大気圏で溶融することなく、地上に到達する落下物はチタン製のタンクであると報告されている。実証機だけならこれで良しとするも、今後も一年に一度 HTV が運用されることを考えると、タンク材質は溶融するものに変えるべきではないか？

【資料の該当箇所】 安全 3 - 3 - 3

【回答者】 J A X A

【回答内容】

推進タンクにつきましては、燃料としてモノメチルヒドラジンと酸化剤として四酸化二窒素というハザードな流体を高圧で充填して使用するため、ISSの共通のタンク設計基準に適合させる必要があります。HTVのタンクはその基準を満足するために開発したものです。また、複合材はその破壊のモードが金属と異なることから、NASAからは解析だけではなく、試験による実証をすることから求められるため、直ちに複合材に置き換えることは、HTVの運用期間中においては困難と考えます。