特　集　論　文

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構造物の設計／検証

The Development of H-Ⅱ Transfer Vehicle(HTV) -Design and Verification for Large Structure with a Wide Opening

河野秀文*1 Hidefumi Kawano
久野敦史*1 Atsushi Kuno
中村敏夫*2 Toshio Nakamura
三木陽一郎*3 Yoichiro Miki

スペースシャトル運用の在り方が議論される中，国際宇宙ステーションへの物資輸送システムとして，HTV（H-Ⅱ Transfer Vehicle）が注目されている．特に，宇宙空間に曝露された非与圧環境下での物資輸送についてはニーズが高く，その能力を有するのは，スペースシャトル以外にはHTVのみである．その目的を達するための大開口部構造設計・検証は，難易度が高く，かつ興味深い内容である．厳しい重量軽減要求を満足しつつ，当該構造の開発を成功させたことによるプロジェクト玉成への貢献度は大きい．

1. は　じ　め　に

HTV(H-Ⅱ Transfer Vehicle)は，H-ⅡBロケット(H-ⅡAの能力向上タイプ）で打ち上げられ，国際宇宙ステーションに物資（ペイロード）を補給するための宇宙機である．(独)宇宙航空研究開発機構（JAXA）の下で開発が進められており，当社は，全体システム取り纏めのほか，ペイロードを収納する与圧部／非与圧部，及び推力を発生する推進モジュールの設計・製造を進めている．

HTVは，4つのモジュールから構成される（図1）．与圧部／非与圧部は，輸送物資（ペイロード）を収納するためのモジュールである．与圧／非与圧ペイロードを合わせて，最大6トンの輸送能力を持つ．特に，非与圧部は，宇宙空間に曝露した状態でペイロードを輸送･廃棄するための“曝露パレット”を搭載するため，“大開口部”を有する．電気モジュール，推進モジュールは，軌道間輸送機能を受け持つ部分であり，電装系及び推進系の構成品を搭載するための内部構造（二次構造）を有している．

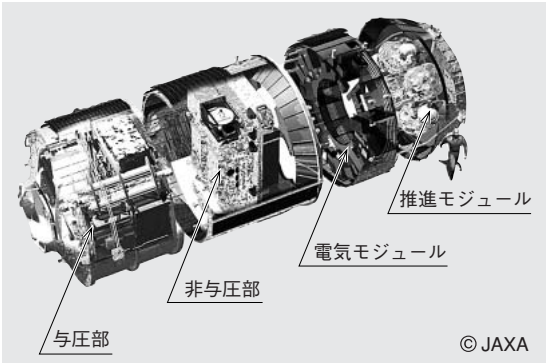

図1　HTV概要

本稿では，HTVの主構造(一次構造)に着目し，ベースとなる設計思想等を述べる．また，“大開口部”の設計・検証の内容について紹介する．

2. 主構造設計の考え方

2. 1　荷重条件の設定

衛星構造体においては，通常，“打上げ時”荷重が設計評定となる.打上げ時における衛星の荷重条件は，CLA（Coupled Load Analysis）に基づいて設定される．CLAは，衛星側（HTV）と打上げ機体（ロケット）の数学モデルを柔結合し，打上げ時のロケット側外力を入力して，衛星側の過渡応答を出力する解析である．HTVにおいても，開発仕様（数学モデル仕様）の進捗に伴い，過去4回のCLAを実施している．

2. 2　構造設計の考え方

HTV主構造は，基本的にセミモノコック（ストリンガ，スキン，フレームによる骨組み構造）である．

ストリンガは，最も厳しい機体軸方向の圧縮力荷重を伝達させる働きを有しており，各モジュール間を通じて，周方向同一位相に配置している（HTVでは，基本的に周上48本の伝達経路となっている）．

スキンは，機体軸直角方向（横揺れ加速度）の荷重を受ける．ストリンガ，フレームに周囲を支持された

*1 名古屋誘導推進システム製作所誘導・電子機器技術部構造装備設計課
*2 技術本部長崎研究所強度研究室主席
*3 名古屋誘導推進システム製作所誘導・電子機器技術部宇宙システム設計課主席

板が，せん断応力に耐荷する形となるが，軽量化要求の厳しい宇宙機構造としての事情から，“弾性領域での座屈は許容する”設計となっている．座屈後のスキンは，“不完全張力場”を形成し，機軸直角方向の荷重に耐荷するが，永久変形（残留ひずみ）が生じてはならない．また，ストリンガと結合されている部位の近傍（有効幅）領域は，機軸方向荷重の伝達にも寄与する．

フレームは，ストリンガ／スキンによる荷重伝達を円滑にするための剛性保持を主目的とした部材である．ストリンガ端末支持，スキン周辺境界支持に加えて，全体の機体剛性を保つために，適切な断面形状と配置が必要である．

3. 非与圧部開口部構造設計

非与圧部の一次構造はセミモノコックであるが，曝露パレットを引出／挿入するための大開口部を有している（図２）．当該開口部に起因して，周辺部位は，厳しい集中荷重に晒される．また，機体全体としての剛性（特に捩り方向剛性）は極端に低下する．

以下では，主に強度上の課題に対する設計アプローチと，検討手法の概要について述べる（剛性低下に対する評価については，別の機会に論ずるものとする）．

3. 1 補 強 仕 様

開口部の両側には，一般部位のストリンガの10倍以上に当たる強度／剛性を有する縦通材（ロンジロン）を配置した．また，その両脇の領域に配置されるスキンについては，一般部位の３倍以上の板厚とし，“いかなる座屈も許容しない”思想としている．さらに，開口部コーナー部位には，応力集中を緩和するための補強ブラケット（ガセット）を配置した．

3. 2 強度評価（開口部）

(1) 基本手順

開口部強度評価の基本手順を図３（①～④）に示す．

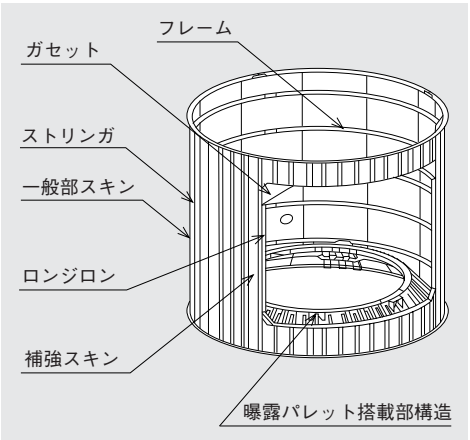

図２　非与圧部主構造概要

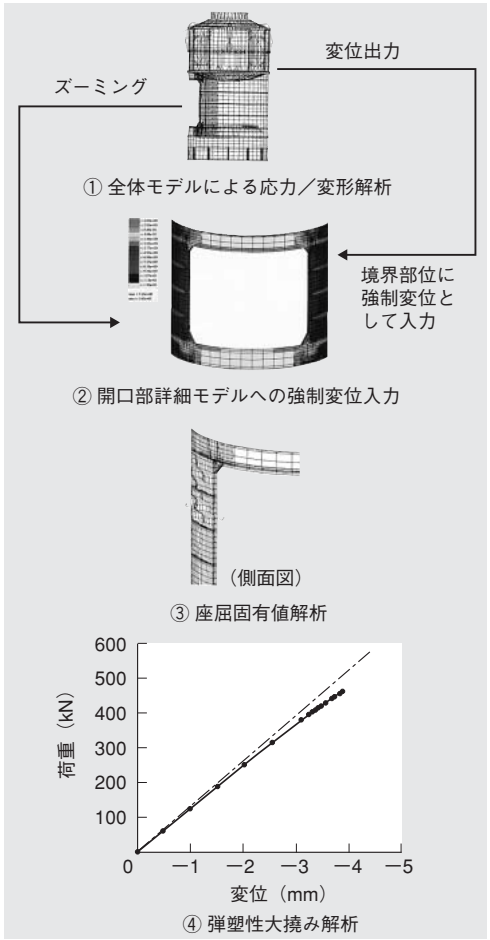

図３　開口部強度評価解析の基本手順

① 打上げ時荷重（加速度）を負荷した全体モデル解析により，非与圧部開口部境界部位の変位を算出．

② ① で得られた開口部変位を，詳細ズーミングモデルに強制変位として入力し，応力分布を算出（本操作により，計算機能力の制約にとらわれることなく，開口部周辺構造に特化した詳細評価モデルを構築できる．以下に示す ③，④ の解析評価が可能になったのも，本作業によるモデルの最適化ゆえである）．

③ 上記 ② の数学モデルを基に，座屈固有値解析を実施．開口部周辺部位のストリンガ・スキンが，所定荷重に対して座屈しないことを確認．

④ 更に，大変形を模擬した解析（弾塑性大撓み解析：解析ツールはABAQUS）により，当該部位が極度な非線形変形を引き起こさないことを確認．

(2) 特記事項

“弾性座屈を許容する”ことを考慮し，スキン部分の数学モデル要素は，基本的に“Shear Panel”（軸方向剛性を有さない）としている．ただし，開口部周辺部位スキンは，“座屈させない”思想であるため，“Shell Panel”（軸方向剛性を有する）と

している．一方，一般部のスキンについても，“Shell”と“Shear”の要素を使った解析をそれぞれ実施している．前者は，弾性座屈以前の挙動，後者は，弾性座屈後の挙動を模擬したものとなる．

また，開口部の存在により，HTV機体は対称構造となっておらず，打上げ時加速度の機軸直角方向負荷方向により，挙動が変わる．よって，上記解析では，機軸直角加速度の方向を変動させた複数ケースの計算を実施し，各部位における最も厳しい荷重を適用して，強度評価を行っている．

4. 強　度　試　験

4. 1　強度試験形態

強度試験供試体及び試験装置の組立て状況を図4に示す．

試験では，打上げ時慣性力荷重を実機条件に近い分布で模擬する方が望ましい．そこで，図5に示すように，与圧部ダミー部，曝露パレット部及び電気モジュール二次構造ダミー部の3断面に，機軸方向及び機軸直角方向荷重を個別に負荷できるようにし，荷重分布を再現した．また，実際の慣性力負荷方向は任意となるため，機軸直角方向の負荷は，90度離れた位置に油圧ジャッキを配置し，各々の荷重レベル制御によるベクトル形成により，任意方向に負荷できるように設計した（実際の試験では，4方向の荷重負荷ケースを設定した）．

さらに，スキンの座屈挙動／残留変形を確認するため，4台のビデオカメラにより撮影を行い，画像解析によりスキンパネルの座屈挙動データの取得を行った．

4. 2　試　験　結　果

4つの試験ケースすべてにおいて，供試体は設定荷重条件（制限荷重／終極荷重）に耐荷し，構造設計の妥当性を確認できた．

以下では，代表的な試験ケースとして，非与圧部開口部方向に機軸直角方向荷重を負荷した試験ケースの計測結果例を紹介する．なお，図中の縦軸は，負荷荷重（F）を評定荷重（FLMT）で無次元化している．

図6は，せん断応力が最大となる箇所のせん断方向ひずみと負荷荷重の関係である．F/FLMT = 50 %で座屈が生じるが，スキンはせん断応力場を形成して荷重を分担するため不安定にはならず，最大負荷荷重まで安定し増加する．除荷時は，ほぼ同じ履歴でひずみは減少し，残留ひずみは生じていない．

図7は，開口部の補強材のひずみと負荷荷重の関係である．一般部スキンに座屈が生じるF/FLMT = 50 %でひずみの増加が若干見られるが，その後はほぼ負荷荷重に比例して増加する．また，除荷後の残留

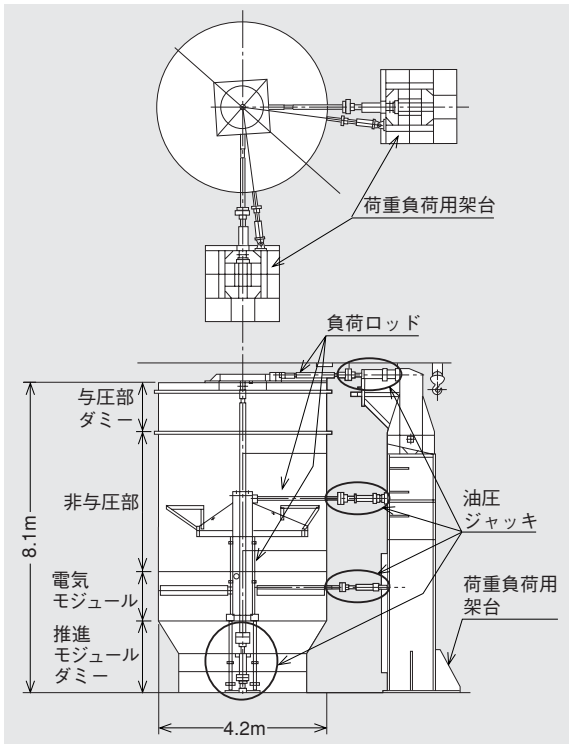

図5　供試体及び強度試験装置概要

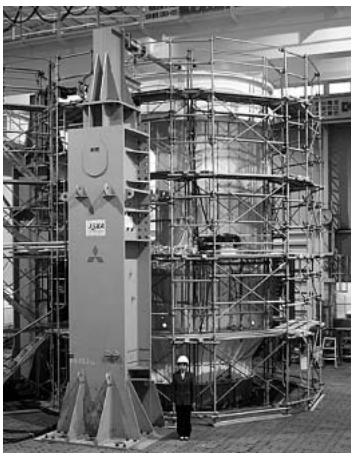

図4　主構造の強度試験概要

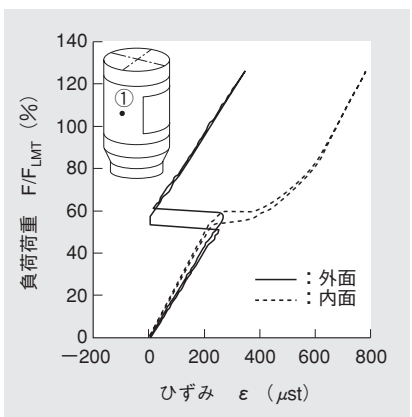

図6　負荷荷重とスキンパネルのひずみの関係

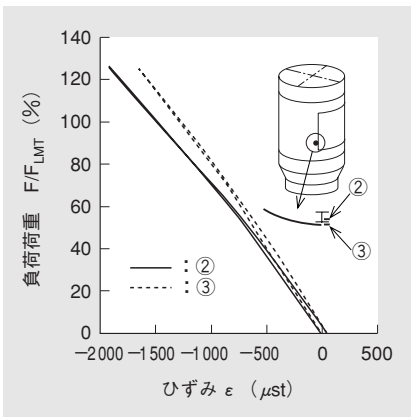

図7　負荷荷重と開口部補強材のひずみの関係

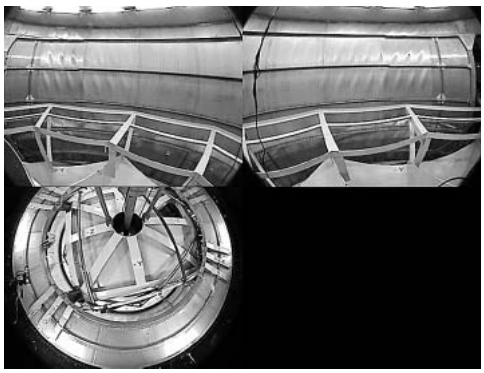

図8　スキンパネルの座屈発生状況

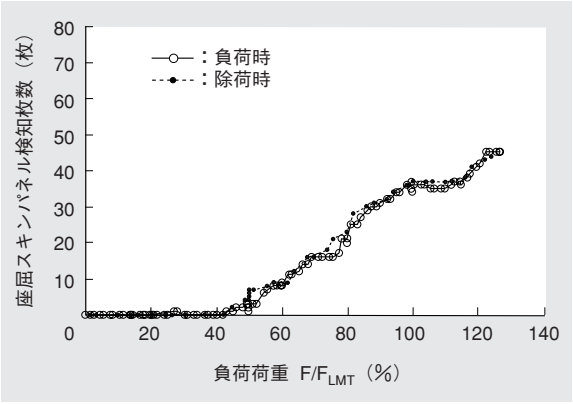

図9　負荷荷重とスキンパネルの座屈発生数の関係

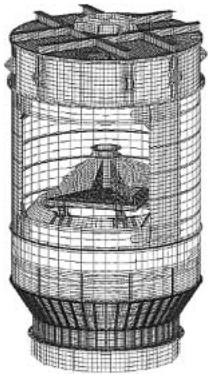

図10　解析モデル（試験体系）

ひずみも生じていない．

また，スキンパネルのビデオ撮影を行い（図8），画像解析によりスキンパネルの座屈判定を行った．負荷荷重と判定されたスキンパネル数の関係を図9に示す．F/FLMT = 50 %から座屈パネル数が増加し，最大負荷時には45箇所判定された．除荷時も負荷時と同様の履歴となり，除荷後は全スキンパネルにおいて残留変形がないことを確認できた．

4．3　強度解析（試験対応モデル）

上記の通り得られた試験結果に基づき，解析数学モデルの妥当性を検証する必要がある．そこで，試験結果と試験に対応した解析結果を比較した．

解析モデル概要を図10に示す．上述の通り，スキンパネルを“Shell”と“Shear”にした2種類のものを準備した．

4．2項の試験ケースに対応した解析結果と試験結果の比較を図11に示す．本図は，負荷荷重と与圧部ダミーの機軸直角方向変位量の関係を示している．図中の実線は試験結果であり，破線及び1点破線はそれぞれ“Shell”要素及び“Shear”要素を用いた解析結果である．

試験結果では，F/FLMT = 50 %より変位量の増加に非線形性が見られ,その後はほぼ直線的に増加する．この剛性の低下は，前述したスキンパネルの座屈によるものである．解析結果と試験結果を比較すると低荷重領域では，Shell要素の解析結果に近く，スキンパネルに座屈が発生した後は，Shell要素とShear要素の解析結果の中間になる．このことから，強度設計での解析モデルは十分な精度を有しており，安全側の評価が実施できていたことが確認できた．

なお，図11では，除荷後に1 mm程度の残留変位が生じているように見えるが，これは供試体下端固定位置から約8 000 mm位置での変位量であり，角度に換算すると十分に微小である．各モジュール間はファスナ結合されているため，その間の微小なずれ量が積

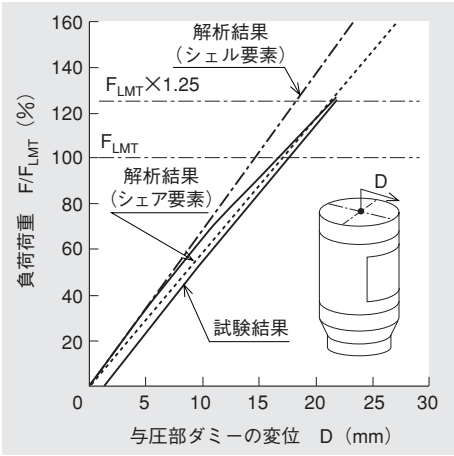

図11　負荷荷重と与圧部ダミー上端変位量の関係

分されて生じたものと考えられる．

5．ま　と　め

国内宇宙機開発史上，主構造体がこのような大きな開口部を有し，かつ“蓋無し”でフライトに供される例は皆無であり，技術的にチャレンジングな開発を遂行することができた．その結果，HTVは非与圧ペイロード搭載能力を有し，スペースシャトルに替わる有力な軌道上補給システムとなり得るに至った．

河野秀文

久野敦史

中村敏夫

三木陽一郎