通常の宇宙機とは異なる運用環境に遭遇する供試体の試験条件設定とその実際
-HTV搭載小型回収カプセルを例に-

1. 背景・目的

- JAXAにおける一般的な宇宙機の設計製造検証では、「宇宙機一般試験標準」に基づき宇宙機システム・サブシステム・コンポーネントが「組立後からミッション終了まで」の全運用環境において遭遇すると予測される最大予測環境を規定し、その最大予測環境に対して適切な耐性・設計余裕を有していることを環境試験等の検証手段によって実証する。一般的な宇宙機開発では地上輸送～ハンドリング～ロケット打上げ～軌道上環境が考慮され環境試験条件が規定されるが、これら以外の環境に遭遇し得るプロジェクトの場合そのような特殊環境（例えば、月面着陸ローバにおける月面環境等）での最大予測環境も考慮した上で耐性検証を行う必要がある。
- JAXAで現在開発中の「HTV搭載小型回収カプセル」もまた、一般的な宇宙機にはない「大気圏再突入環境」に遭遇する供試体である。このような特殊環境に遭遇する供試体について、HTV搭載小型回収カプセルにおける最大予測環境（環境試験条件）の規定例及び実際の試験結果等について報告する。

過去の類似プロジェクト等の実績データが活用できないような通常の宇宙機とは異なる運用環境に遭遇する供試体の環境耐性検証を行う場合、数値解析結果等を用いて如何に適切に最大予測環境を規定し試験条件を設定するかが重要となる。

一般的な宇宙機開発で考慮される運用環境

① 地上輸送環境（工場から射場への搬入等の環境）
② 地上ハンドリング環境（射場での取り回し等の環境）
③ ロケット打上げ環境（リフトオフからロケット分離までの環境）
④ 軌道上環境（往路）（ロケット分離後から宇宙空間において曝される環境）

回収カプセルで考慮すべき一般的な宇宙機開発とは異なる運用環境

⑤ ISS 内ハンドリング環境（ISS 内でのクルーによる取り回し等の環境）
⑥ 軌道上環境（復路）（ISS 離脱からHTV 分離、及び大気圏再突入までの環境）
⑦ 大気圏再突入環境（大気圏内に再突入し揚力誘導を行っている最中の環境）
⑧ 緩降下環境（パラシュート開傘から着水までの環境）
⑨ 着水環境（洋上着水から回収までの環境）
⑩ 回収環境（回収からユーザへのペイロード引き渡しまでの環境）

2. 熱真空環境耐性検証試験

2.1 再突入環境に係る回収カプセルの熱制御設計

- HTVからの分離直前に各電気機器の電源がONされ、そこから着水までの間は内部発熱及び外部熱入力の影響で温度が上昇していく。
- 大気圏再突入時の高温から内部を保護するために、カプセル表面にアブレータ(表面が気化することで熱を奪う断熱材)や可視断熱材等を装備。

回収カプセルは中心部にペイロード収納容器、最下部に電気機器を搭載しており、これらを再突入時の温度上昇から守ることが熱制御系の役割。

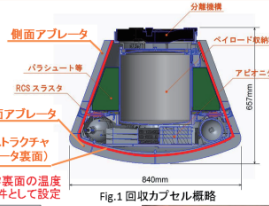

Fig.1 回収カプセル概略

2.2 試験条件設定

- 大気圏再突入時のカプセル外部の高温環境(最高2,000℃)をシステム熱真空試験で再現することは不可能。
- そこでシステム熱真空試験ではアブレータ材料のアーク風洞試験(Fig.2)の結果を解析し、アブレータ内壁の昇温プロファイル(Fig.3)を求めた。この昇温プロファイルを試験条件として用いた。
- また同じ試験コンフィギュレーションで再突入環境と軌道上環境を模擬することはできなかったため、別試験にて軌道上環境に対する耐性検証試験を実施している。

アブレータ内壁の温度を試験条件として設定することでシステム試験でも負荷可能な温度範囲を実現した。

Fig.2 アーク風洞試験
(JAXA航空技術部門にて実施)

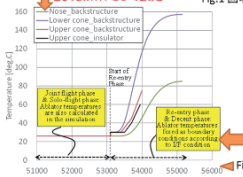

Fig.3 アブレータ裏面の昇温プロファイル

2.3 試験の実施

- 本試験では大気圏再突入時の熱環境を模擬するため以下のような工夫を行った。

コンフィギュレーション	アブレータ内壁の温度を試験条件として設定したため、回収カプセルからはアブレータを取り外して、その代わりとしてヒーターパネルをアブレータ内壁が取り付くはずの位置に設置しアブレータからの輻射を模擬した。それ以外にも、アブレータ取り付け位置への伝導模擬のヒーターブロック設置、スキンヒーター法の併用、機器発熱模擬用のヒーターの設置等、複数方法を組み合わせることで再突入時の複雑な熱入力を模擬した。
シーケンス	実フライトのシーケンスに極力合わせた過渡的な試験を実施した。具体的には電気機器の発熱を模擬するヒーターの電源を入れるタイミングを起点とし、ヒーターパネルの電源を大気圏再突入が始まるタイミングでON、パラシュート開傘のタイミングでOFFする等の操作を実施した。ヒーターパネルの昇温速度は解析結果に合わせて温調制御した。
設備運転	大気圏再突入時には高度低下に伴い回収カプセル内部の圧力が上昇する。しかし、それに合わせてスペースチャンバ内の圧力を時系列で変化させるのは困難であるため、チャンバ内圧力を高真空から大気圧まで複数のパターンで試験をすることで、周囲圧力が温度上昇に与える影響を確認した。

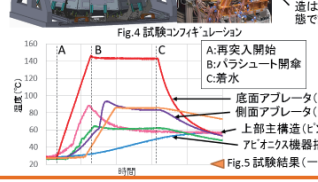

Fig.4 試験コンフィギュレーション

2.4 試験結果

- 実フライトを極力模擬した温度条件・時間で試験を行った結果、再突入～緩降下フェーズにおいて、各部の温度を要求範囲内に収められることが分かった。

Fig.5 試験結果（一部抜粋）

[Reference] [1] R.Hatakenaka et al., "Thermal Design of HTV Small Re-entry Capsule", 47th International Conference on Environmental Systems, 2017

3. ランダム振動環境耐性検証試験

3.1 試験条件設定

- 20-2000 Hzの周波数帯を評定とするランダム振動環境は③ロケット打上げ時と⑦大気圏再突入時にカプセルに印加されるため、地上試験において打上げ環境と大気圏再突入環境の双方について回収カプセルがランダム振動環境耐性を有していることを検証しなければならない。
- 大気圏再突入時に遭遇し得る環境に関しては[カプセル表面に生じる高速非定常流体の圧力変動]に起因するランダム振動が発生することが予測されたため、CFD解析を行い※その結果を用いて再突入時の圧力変動環境を模擬した音響環境条件を最大予測環境として規定し、音響試験を実施することによって同環境の耐性検証とすることとした（Fig.6）。

※CFD解析はJAXA研究開発部門第三研究ユニットにより実施しており、JAXA航空技術部門により実施した風洞試験結果との比較によりその妥当性を確認している。

CFD解析結果を基に「安全側」(フライト環境に対して地上試験が負荷不足とならない側)となる音響試験条件を規定。

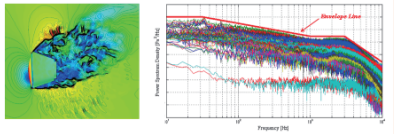

Fig.6 CFD 解析の概念図（左）再突入時の代表Mach 数における
カプセル表面圧力変動PSDとその包絡線（右）

3.2 試験前確認

- CFD解析結果から音響試験条件を規定した結果、筑波宇宙センター音響試験設備の制御範囲を逸脱する周波数帯が存在することが判明した（Fig.7）。そこで、試験前に空加音を実施しどこまで最大予測環境に近い環境を再現できるか設備実力値の検証を行った。
- 検証結果を基に公差範囲の見直し等を実施したが、設備仕様上どうしても最大予測環境が印加できない周波数帯が存在することが明らかとなったため、当該帯域については別途技術評価を行うこととした。

得られた試験条件が実現可能かを検証するための設備の事前確認を実施した。一部最大予測環境を印加できない周波数帯が存在することが判明し、当該帯域については別途技術評価を行うこととした。

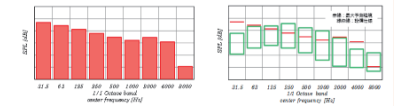

Fig.7 CFD 解析結果から得られた音響試験条件（左）と設備仕様との比較（右）

3.3 試験結果

- 得られた試験条件で実際に試験を行った結果、負荷レベル・負荷時間ともに公差範囲内で音圧が制御され、規定の音響環境が適切に負荷されたことが確認された（Fig.8）。
- 加音後の外観点検において異常が認められなかったことから、再突入時ランダム振動環境に対する構造上の耐性設計について問題ないことが確認された。
- 最大予測環境が印加されていない低周波数帯域については、各機器で当該帯域に有意な共振点が存在しないことを確認した上で音響起因のランダム振動環境ではなく静加速度環境を評定として耐性評価を行うこととした。
- 本試験における供試体はSTM（一部、熱防護材等がPFM）であり、試験前後での電気系コンポの機能性能確認等は未実施である。今後フライト品のPFT試験を再度実施予定であり、その試験後の機能性能確認において異常が認められないことを確認した後、システム全体としての再突入時ランダム振動環境に対する耐性認定とする予定である。

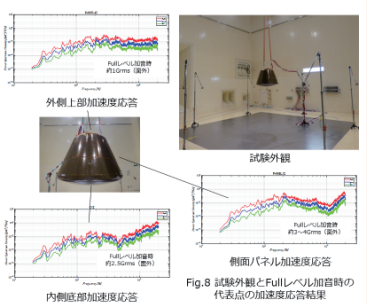

Fig.8 試験外観とFullレベル加音時の
代表点の加速度応答結果

規定した試験条件で試験を実施した結果、加音後の外観確認等において異常は認められず、本供試体は当該環境に対する構造上の耐性設計について問題ないことが確認された。

[Reference] [2] Keiichiro Fujimoto, Taisuke Nambu, Hideyo Negishi, and Yasuhide Watanabe. "Validation of LS-FLOW for Reentry Capsule Unsteady Aerodynamic Analysis", AIAA Paper 2017-1411, 55th AIAA , 2017
[3] Ryan Sorensen, Armen Derkevorkian, Ali Kolaini, "Turbulent Boundary Layer Environment Derivation", SCLV Workshop, June 22, 2016

4. まとめ

HTV搭載小型回収カプセルの熱真空環境及びランダム振動環境耐性検証について、大気圏再突入環境も考慮した最大予測環境の規定と条件設定を行い試験を実施し、耐環境性設計について問題ないことが確認された。このように遭遇する環境が特殊であっても宇宙機一般試験標準に基づく試験検証の考え方（最大予測環境規定→試験条件設定→試験実施・評価）を適用することにより、適切な品質保証が可能であると考えられる。また、当プロジェクトはその新規性に加えてスケジュール、コスト面での制約も大きいという側面を有しており、限られたリソースの中で如何に効率的に品質保証を積み重ねていくかという点において本発表で述べた以外に複数の創意工夫が検証計画に盛り込まれている。当プロジェクトの試験を通して得られた知見は今後の再突入機開発に留まらず、他の宇宙機の検証計画の効率化にも寄与すると考えている。

[謝辞]本試験実施にあたり多大なるご協力をいただいた研究開発部門 第2研究ユニット/第3研究ユニット、航空技術部門、（株）エー・イー・エス、（有）オービタルエンジニアリングの皆様に深く感謝いたします。

This document is provided by JAXA.