

# 再突入カプセルにおける RCS ジェット干渉場の 3次元統合計測への試み

高間良樹、中北和之、藤井啓介 (JAXA) 中川宗敬 (JAST)

Hypersonic RCS tests of HTV-R reentry vehicle

Yoshiki Takama, Kazuyuki Nakakita, Keisuke Fujii (JAXA)  
and Muneyoshi Nakagawa (JAST)

## 概要

現在運用されている HTV に回収機能を持たせる HTV-R が JAXA 内部で検討されているが、揚力飛行を行うためロール制御のための Reaction control system が欠かせない。そこで予測される RCS 干渉を予測するためのツールとして、極超風試条件における感圧塗料(PSP)による圧力場計測の適用、シュリーレン画像の CT 処理による空間場の把握、IR カメラによる表面加熱率分布の取得を組み合わせることで干渉場の 3 次元統合計測技術を開発することを試みた。ここではそれぞれの計測に関して報告する。

### 1. はじめに

将来の有人宇宙活動のための技術獲得及び国際宇宙ステーション ISS からの物資回収を目標とした回収機能付加型 HTV(HTV-R)開発<sup>1)</sup>では、突入時加速度制限、落下地点分散、室内環境確保などに関する制限のためこれまで日本において経験のない重心オフセットによる揚力再突入を行う計画となっている。その揚力飛行による突入時加速度低減を実現するため、重心オフセットによるいわば出来高の姿勢角を取ることになる。誘導では、揚力方向をロール制御により制御することとなるが、その際に使用される RCS ジェットはその反力のみならず、ジェットが周囲の流れ場を変えることによる寄与 (RCS ジェット干渉) が生じ、極超音速領域において空力特性や空力加熱分布へ影響することが知られている。定まった形状・飛行環境における、干渉力計測、局所加熱率の計測は既存技術で可能であり、実際これまでの機体開発におい

て活用されている。しかしこの干渉現象は 3 次元性が強く、また形状・環境への依存性が強いいため、設計において妥協点を見つけるための情報を効率的に取得する手法が求められる。そこで HTV-R 再突入カプセル(HRV)模型を用いて、RCS ジェット干渉場を統合的に把握する試験技術を獲得することを目的に、感圧塗料法の極超音速領域への適用による表面圧力分布計測技術、シュリーレン画像 CT 処理のジェット干渉への適用による定性的密度場計測技術及び赤外線カメラによる詳細加熱率分布計測技術を開発することとした。

JAXA1.27m/0.5m 極超音速風洞<sup>2)</sup>においては赤外線カメラを用いた加熱率分布計測はほぼ確立された計測技術となっている一方で、表面圧力場を計測する感圧塗料法は温度の影響を受けることが知られており、極超音速風洞試験環境での適用に関してその適用限界を確認する必要がある。また、近年整備を始めたシュリーレン画像へ CT 処理

を適用することで密度勾配の空間場を可視化する技術に関しては、RCS ジェット干渉など局所に限定されかつ密度勾配の弱い流れ場の可視化において十分な S/N の確保が課題であり、その限界を確認する必要がある。

## 2. 風洞試験

### 2.1 感圧塗料による表面圧力場計測

試験は JAXA 1.27m 極超音速風洞にて  $M=9.6$ ,  $p_0=1\text{MPa}\sim 6\text{MPa}$  の気流条件、迎角  $20\text{deg}$ 、RCS ガスを空気として、4.76%HRV RCS 模型 ( $D=\phi 200\text{mm}$ ) を用いた。RCS ノズルはスロート径  $1.6\text{mm}$ 、出口参照面直径  $4.88\text{mm}$ 、開角  $24\text{deg}$  のものを用いており、HTV-R 再突入軌道で予測されるジェットガス・主流との圧力比、質量流量比、運動量比と、今回の極超音速風洞条件との比較は図 1. に示される通りオーバーラップする。ここでは感圧塗料による表面圧力場、赤外線カメラによる空力加熱分布、シュリーレンによる可視化のいずれの試験においても、空気力同時計測は実施しなかった。感圧塗料法を極超風試に適用する場合、数百 Pa 程度というきわめて低い圧力変化を、温度分布の中で計測するというところに技術的課題がある。RCS ジェット干渉場計測では、背面側の計測であるため、温度分布の影響より圧力感度のハードルが高いと認識し、塗料としては JAXA 標準で使用する高圧力感度のものを使用し、温度分布低減のため模型を高熱伝導性のある銅により製作した。本来左右非対称の現象計測であるため、PSP 温度分布を

IR カメラにより測定し、処理するプログラムを作成した。結果の一例を図 2. に示す。干渉による衝撃波のため局所的な温度分布が生じており、PSP の消光は温度上昇/圧力上昇両方によるものであるが、IR カメラによる温度補正によって両者を分離、干渉による衝撃波を捉えられた。

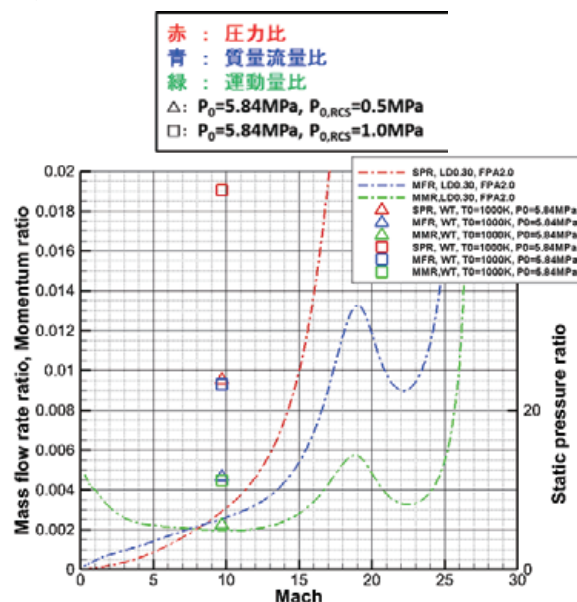


図 1. HTV-R 軌道におけるジェット干渉パラメータ及び風試条件

### 2.2 シュリーレン画像 CT 処理空間場計測

ジェット干渉の領域を捉えるため、気流軸周りに  $180$  度回転させて取得した一連のシュリーレン可視化画像に CT 処理を実施した (図 3.)。ここでジェット干渉領域がある限られた回転角範囲以外で模型の陰に入ってしまうこと、測定部以外の大気の揺らぎによるノイズ成分の影響により、どの

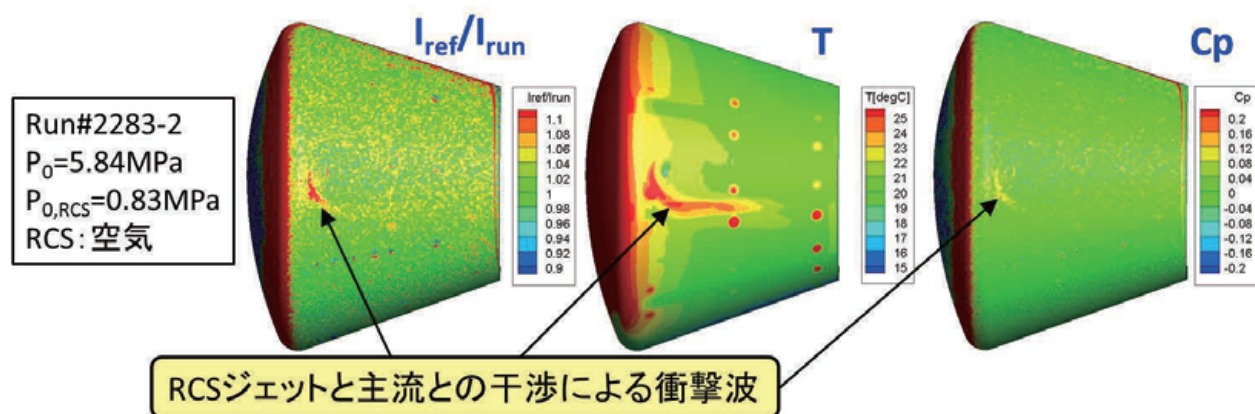


図 2. PSP による圧力場計測および温度補正のため取得した表面温度分布 (IR カメラによる)

程度確認することができるかを確認することが第一段階の目標としていたが、図3.に示されるようにノズル近傍においてもその構造を確認することができた。ただし様流におけるノイズの影響が大きく、ジェット干渉の詳細構造把握はまだ困難であることが分かった。今後、相互相関による外乱低減を実施する予定である。

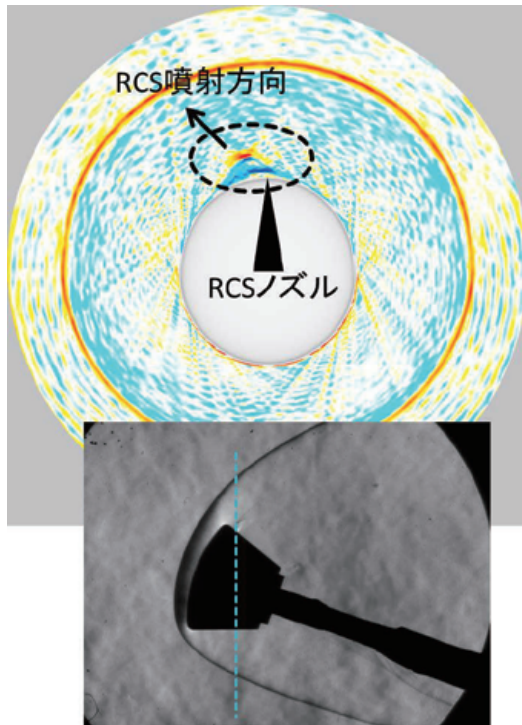


図3. シュリーレン画像のCT処理により得られた断層図（下図点線で示される平面上）

### 2.3 IRカメラによる局所加熱率分布計測

赤外線カメラによる空力加熱率計測では、模型交換パネルを銅製のものからベスペル樹脂製のものに変更し、干渉により局所加熱率が上昇する領域、上昇量を定量的に把握した（図4.）。しかしながら RCS ジェット噴射によりノズル周辺部の冷却が起これ、IR カメラ画像データからの空力加熱導出処理において仮定される一次元熱伝導の初期温度を正しく得ることができないという課題に直面した。初期温度の影響度の評価を行う必要性を確認した。

### 3. まとめ

JAXA 風洞Cで実施している HTV-R 回収機の極超音速 RCS 試験について紹介した。

RCS ジェット干渉場へ PSP, シュリーレン CT 処理, IR カメラによる加熱率計測法を適用し、計測の見通しを得るとともに、課題や問題点を抽出している。

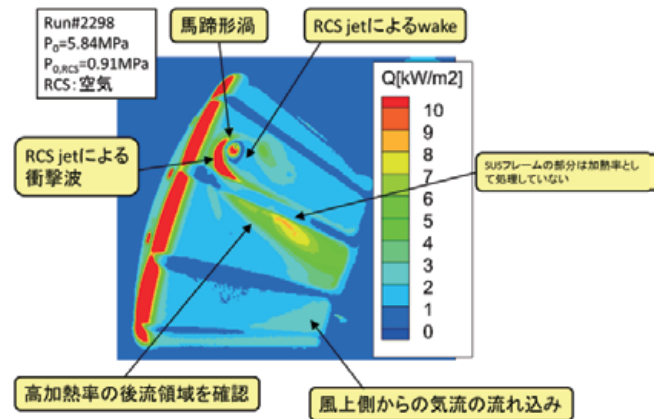


図4. IR 画像法により得られたノズル回り空力加熱率分布

課題として下記のものが挙げられる：

- PSP: 圧力の効果と温度の効果の分離
- シュリーレン CT 処理: ノイズの低減
- 加熱率: ノズル近傍では加熱率計測
- 6 分力の同時計測

### 参考文献

- 1) T.Imada et al, 28<sup>th</sup> ISTS,ISTS-2011-g-10(2011)
- 2) 空気力学部,航技研, NAL-TR-1261, (1995)