

## HTV 推進システム燃焼試験結果報告 The Results of Propulsion System Firing Test for HTV

総合技術研究本部 衛星推進技術グループ 長田泰一, 梶原堅一  
宇宙基幹システム本部 HTV プロジェクトチーム 今田高峰, 佐々木宏  
Institute of Space Technology and Aeronautics, Spacecraft Propulsion Engineering Group  
Taiichi NAGATA, Kenichi KAJIWARA  
Office of Space Flight and Operations, HTV Project Team  
Takane IMADA, Hiroshi SASAKI

### Abstract

The system firing test for HTV (H-II Transfer Vehicle) was performed on June thru August, 2004. The result shows that the system provides approximately 50% thrust during short impulse RCS firings using four forward thrusters with GHe saturated propellant.

### 1. はじめに

平成16年6月～8月に実施された、HTV(H-II Transfer Vehicle)の推進系システム燃焼試験(System Firing Test, 以下SFT)について報告する。本試験は、(株)三菱重工業および(株)IHIエアロスペースとの契約により(株)IHIエアロスペースがIHI相生ロケット試験センターにて実施したものである。

試験の結果、系全体の圧力損失などの性能要求への適合性が確認された。また技術課題として、ヘリウム溶解込み飽和推進剤使用時、姿勢制御エンジンのパルス燃焼において水撃による圧力変動との連成振動現象が発生し、燃焼圧低下に至る事象が確認された。

本報では、特に後者の連成振動による燃焼圧低下事象について述べる

### 2. 試験の概要

#### 2.1. HTV-SFTの目的および特徴

SFTは、HTVの推進系サブシステム開発において、

- ・圧力損失などの性能要求への適合性検証
- ・運用性要求への適合性検証

を目的としている。

HTVの推進系サブシステムは、図1に示すように、全2液式(MMH/MON-3)のシステムで、スラスタはメインスラスタ(ME)(500N)×4基+RCS(Reaction Control System 姿勢制御系)スラスタ(110N)×28基を搭載する。通常の衛星、例えば同じく全2液式のシステムであるETS-8(Engineering Test Satellite 8: 技術試験衛星VIII型)のメインスラスタ(500N)×1基+RCSスラスタ(22N)×12基のシステム構成と比較して、HTVは配管システムが複雑であるといえる。これらを、調圧/ブローダウンモードで運用するため、各運用状態においてバルブ等を含む配管系の流量および圧力の設定を適切に行う必要

がある。また、運用方法についても複雑で、様々なパルスモードでの運用（RCS および ME 共に）が要求されており、各パルスパターンを模擬した検証試験を実施する必要がある。

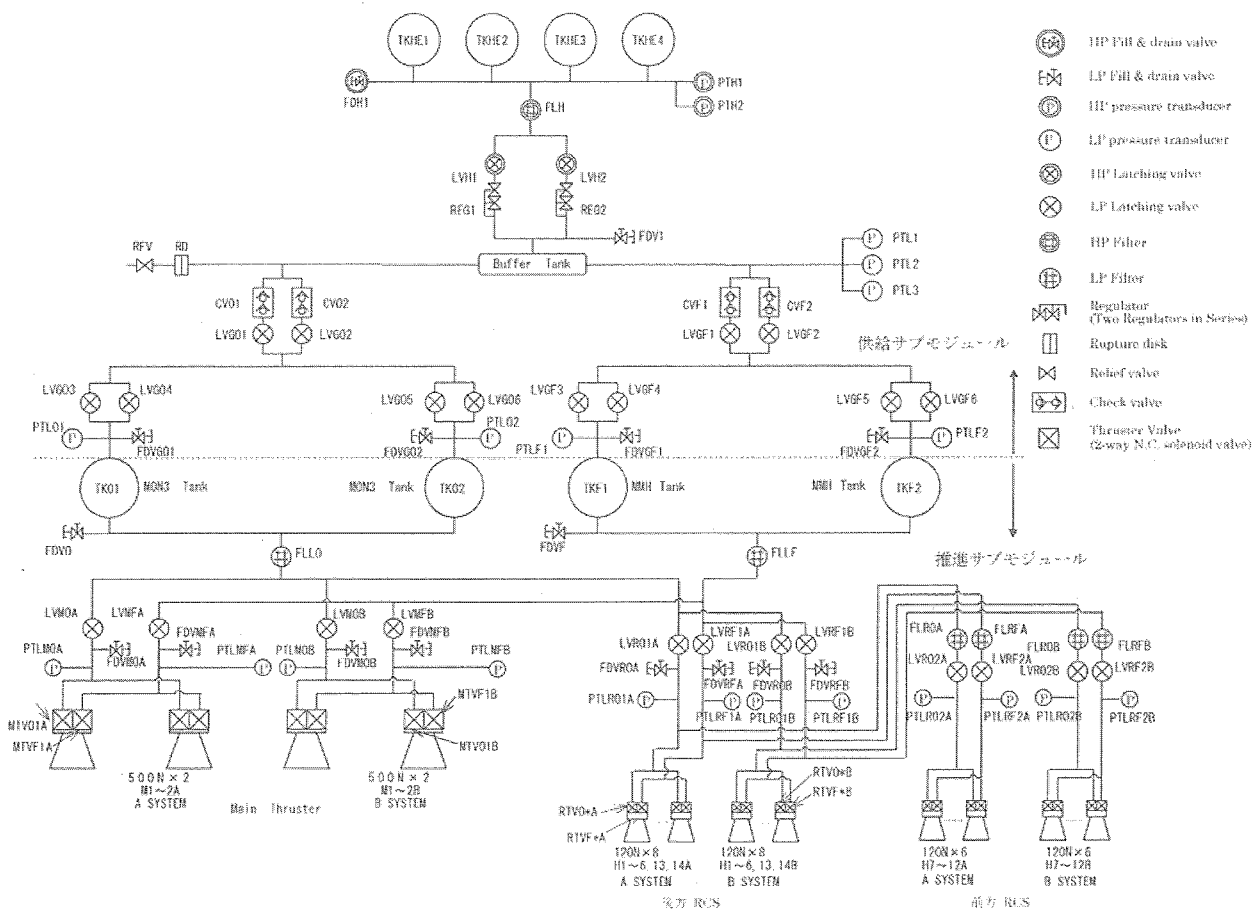


Figure 1 Schematics of propulsion system for HTV.

## 2.2. 試験内容

主な試験項目を表1に示す。8項目の試験から成り、試験順序はほぼ番号通り実施された。

この中で、5)スラスト動特性確認試験は、ヘリウムサチュレーションした推薬とそうでない推薬の両方で実施した。このようなヘリウムサチュレーションを考慮した SFT は、過去例がない。ヘリウムサチュレーションした推薬とは、強制的に推薬にヘリウムガスを溶け込ませた推薬のことである。ヘリウム溶け込みによって、推薬の音速や密度などの物性が変化するため、それらの影響を評価することが目的である。HTV ではパルス駆動時の水撃による圧力変動の影響を評価する必要があるため、このようなサチュレーションの影響を考慮する必要がある。

サチュレーションを考慮するにあたり、ヘリウム溶解度を簡易的に計測する必要がある。そこで、今回はサイトグラスによる飽和圧力計測を試行した。サイトグラスによる計測方法の精度検証を行うため、ガスクロマトグラフィーによる濃度計測の両方で確認した。計測の結果、MMH についてはよく一致したが、MON についてサイトグラス計測では溶解度が実際よりも低めに見積もられることが分かった。

Table 1 Test sequence of HTV-SFT

試験項目	内容
1	ノミナル作動点確認試験 ME及びRCSのノミナル作動点を確認する。
2	ブローダウン特性確認試験 ブローダウン状態にて各スラスタを作動させ、性能特性データを確認する。
3	オフノミナル作動確認試験 作動範囲内におけるオフノミナル点での性能特性データを確認する。
4	ME/RCS 同時作動確認試験 同時作動させた時の作動点変動量を確認する。(連続噴射)
5	スラスタ動特性確認試験 RCS及びMEのパルス作動時の動応答特性を取得する。
6	運用シーケンス確認試験 推進系 SOE(Sequence of Events)設定に関する基礎データを取得する。初期加圧、プライミング等。
7	MDC 試験 実フライトを模擬したシーケンスで作動させ、システム適合性および性能確認を実施する。
8	システム流し試験 FM(Flight Model)での健全性確認のための比較データを取得する。

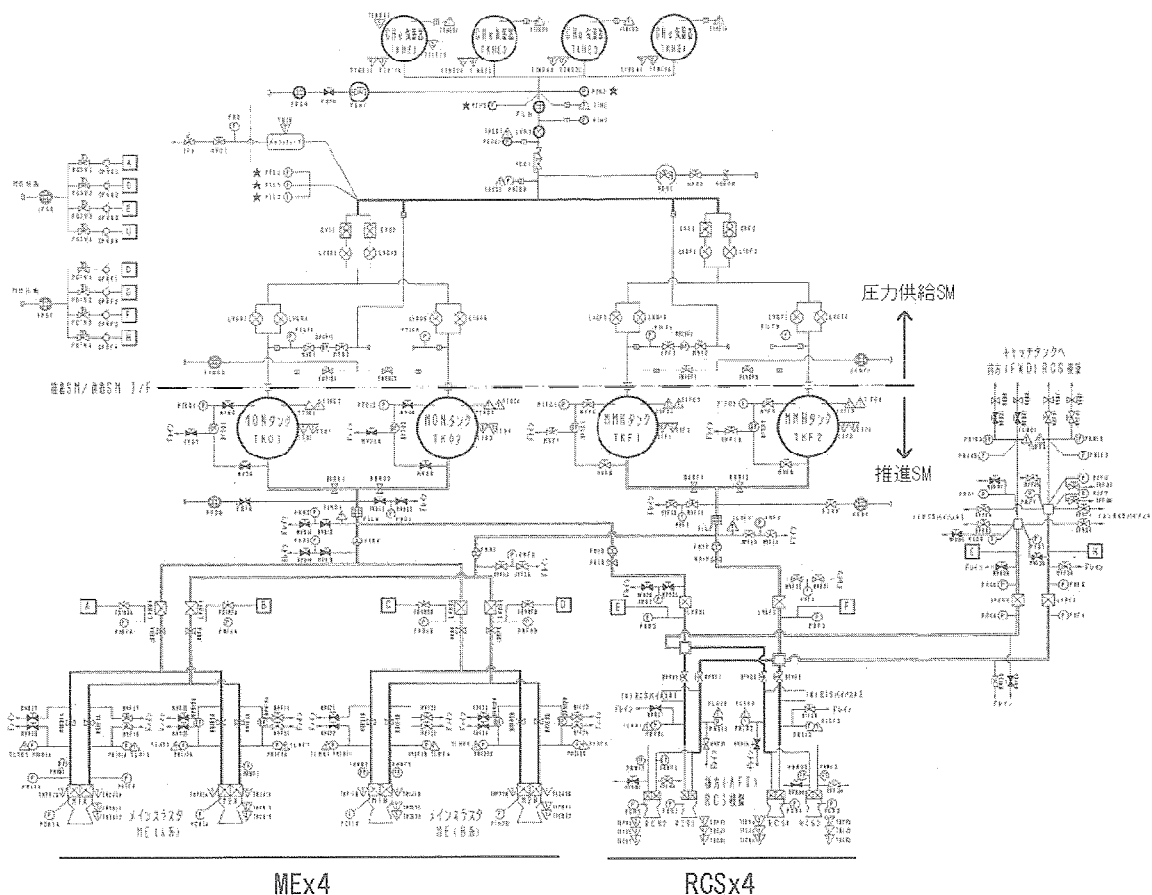


Figure 2. Schematics of propulsion system for SFT.

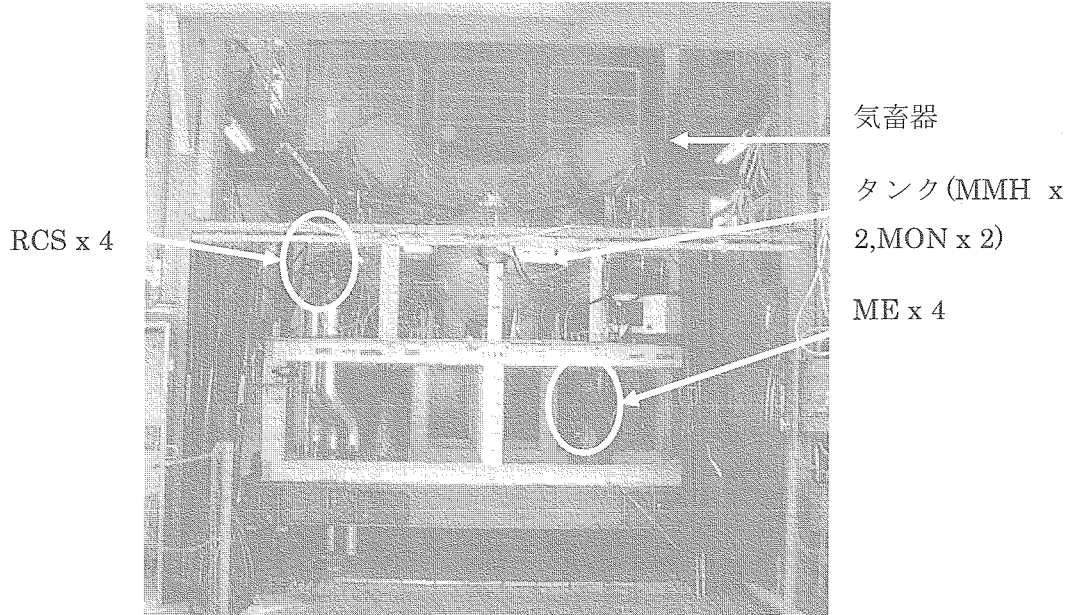


Figure 3. Final setup of SFT

図2にSFTでの系統概略図を示す。フライトモデルと同様に圧力供給サブモジュールおよび推進サブモジュールから構成されている。またVDE (thruster valve drive electronics : スラスタバルブ駆動回路) はフライトモデル相当が使われている。また、スラスタ構成はME×4基+RCS×4基となっており、前方RCSおよび後方RCSの切り替えは配管系統を切り替えることにより、それぞれ試験に応じて切り替えられる。図1に示した実機の系統との違いは、RCSスラスタ数である。ただし、SFTの結果を用いて、少なくとも実機での解析立証ができるような構成となっている。

図3に供試体セットアップを示す。IHI ロケット試験センター (兵庫県相生市) に設置され、噴射試験は大気環境下で実施された。

### 3. 成果の概要

試験はすべて実施され、当初の目的を達成した。系全体の圧力損失などの性能要求への適合性が確認された。

ここでは、サチュレーション推進使用時のRCSパルス燃焼において発生した、水撃による圧力変動との連成振動現象について述べる。

この現象は、表1の5)スラスタ動特性確認試験において確認された。図4はRCSスラスタの同時パルス噴射時の燃焼圧(Pc)波形である。(a)左が0.36秒周期, 0.12秒ON, (b)右が0.12秒周期, 0.06秒ONの場合を示している。いずれもGHeサチュレーション推進の場合を示している。燃焼圧の波形を見ると、(a)の場合は、ノミナルの燃焼圧が出ており波形の乱れも少ない。それに対して(b)の場合は、おおよそ半分の燃焼圧しか立ち上がっておらず、波形も一度圧力が立った後、圧が低下し、さらに後半で再度圧力が上昇するといった、乱れた波形となっている。燃焼圧が推力と対応していると仮定すれば、(b)の場合には推力が半分程度に落ち込むことを示唆しており、運用上考慮する必要がある。このような噴射状態を、共振モードと呼ぶことにする。

様々なパルスパターンで試験を行った結果、燃焼圧低下を伴う共振モードは次の条件で発生することが分かった。

- ・前方 RCS 4 基同時噴射
- ・0.12 秒周期, 0.06 秒 ON(デューティー50%)
- ・GHe サチュレーション推薬：飽和圧力 MON 1.8MPa(gauge), MMH 1.75 MPa(gauge).

このような共振モードが発生する原因は、RCS スラスタのカットオフ時の水撃による圧力振動周期と燃焼周期が共振するためと考えられる。非サチュレーション推薬の場合も、このような水撃による圧力脈動周期とパルス噴射周期のカップリングは見られたが、比較的圧力変動の振幅が小さかったため燃焼圧の低下には至らなかった。

サチュレーション推薬と非サチュレーション推薬でこのような違いが出た原因について検討する。一般に、水撃の脈動周期は、配管長と作動流体の音速に依存する。推薬弁が急閉することにより水撃圧が発生し、管路を上流方向に音速で伝搬する。圧力波は、端部（別の推薬弁や遮断弁など）で反射し、またもと来た方向へ伝搬を続ける。これが繰り返されることにより、管路内に圧力の振動が起こる。実際の SFT 配管では、さまざまな反射波が発生するため、圧力波はそれらの合成波となる。

圧力の伝搬速度  $a$  は、管路内の作動流体の音速で表され、

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Es} \right)}} \quad (1)$$

となる<sup>1</sup>。ここで、 $\rho$  は作動流体の密度、 $K$  は作動流体の体積弾性係数、 $D$  は管の直径、 $E$  は管材料の弾性係数、 $s$  は管の厚さである。式(1)から、作動流体の密度および体積弾性係数が変化することにより、圧力波の伝搬速度が変化することが分かる。GHe サチュレーション推薬の物性は分かっていないため、伝搬速度そのものは不明である。GHe 溶け込みにより、密度は小さくなると思われるので、サチュレーション推薬の方が伝搬速度は大きくなると推測される。

また、作動流体が気液二層流の場合には、ボイド率の分布にもよるが、一般に水撃による圧力波の伝搬速度はボイド率の増加に従って減少する傾向があることが知られている<sup>2</sup>。

従って、実際の伝搬速度がサチュレーションによってどのように変化するかを予測することは難しいと言える。

RCS 1 基の燃焼試験において、パルス周期を変化させ推薬弁入口圧を測定したところ、非サチュレーション推薬の場合は、0.16 秒周期で共振がみられたのに対して、サチュレーション推薬では 0.12 秒周期で共振が見られた。このことから、サチュレーション推薬の方が 1.3 倍の伝搬速度であると考えられる。ただし、実験での振動周期は、実際には配管形状などの影響を受けると考えられ、これを確認するには今後さらなる検討が必要である。

#### 4. まとめ

今回の SFT によって、共振モードによって燃焼圧が低下するという課題が認識された。この結果を用いて配管内流動解析モデルの精度向上を図り、実際のフライトモデル配管系での共振モードを予測することが可能となる。今後の課題の対策としては、運用上の制約としてシステム側で対処する予定である。

#### 参考文献

1. 妹尾泰利, 内部流れの力学-II, 養賢堂発行, 1994, p167.
2. 藤井照重ら, 気液二相流の動的配管計画, 日刊工業新聞社, 1999, pp159-160.

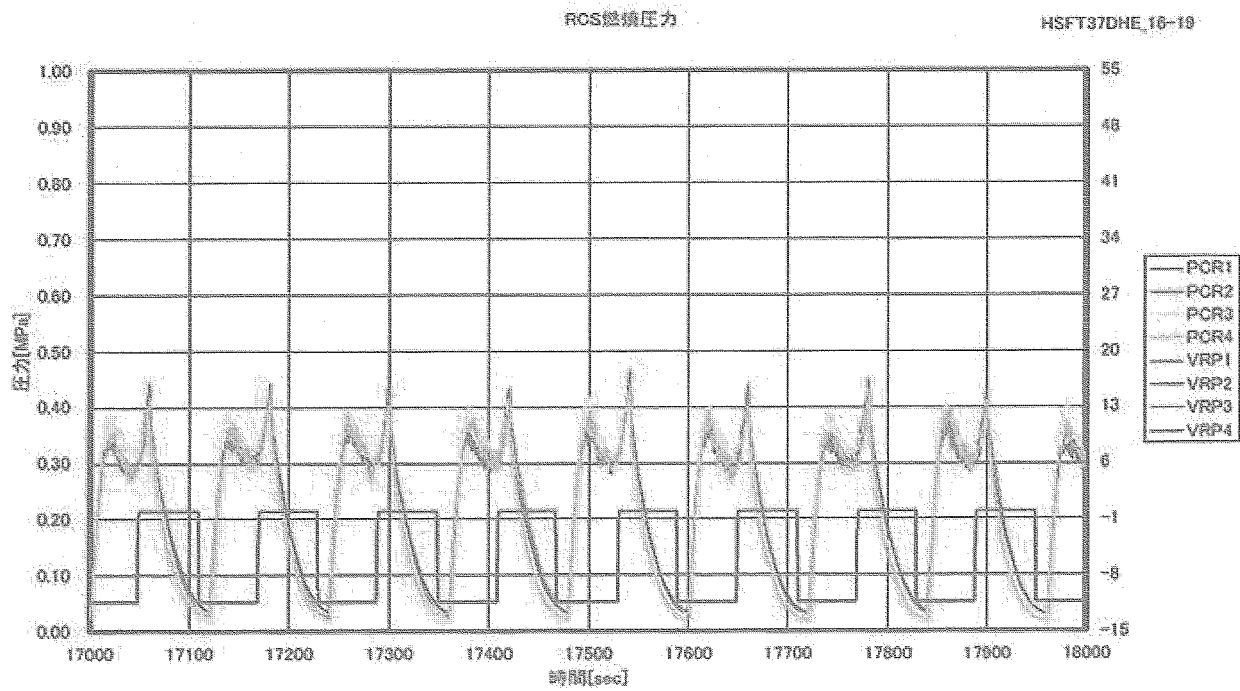
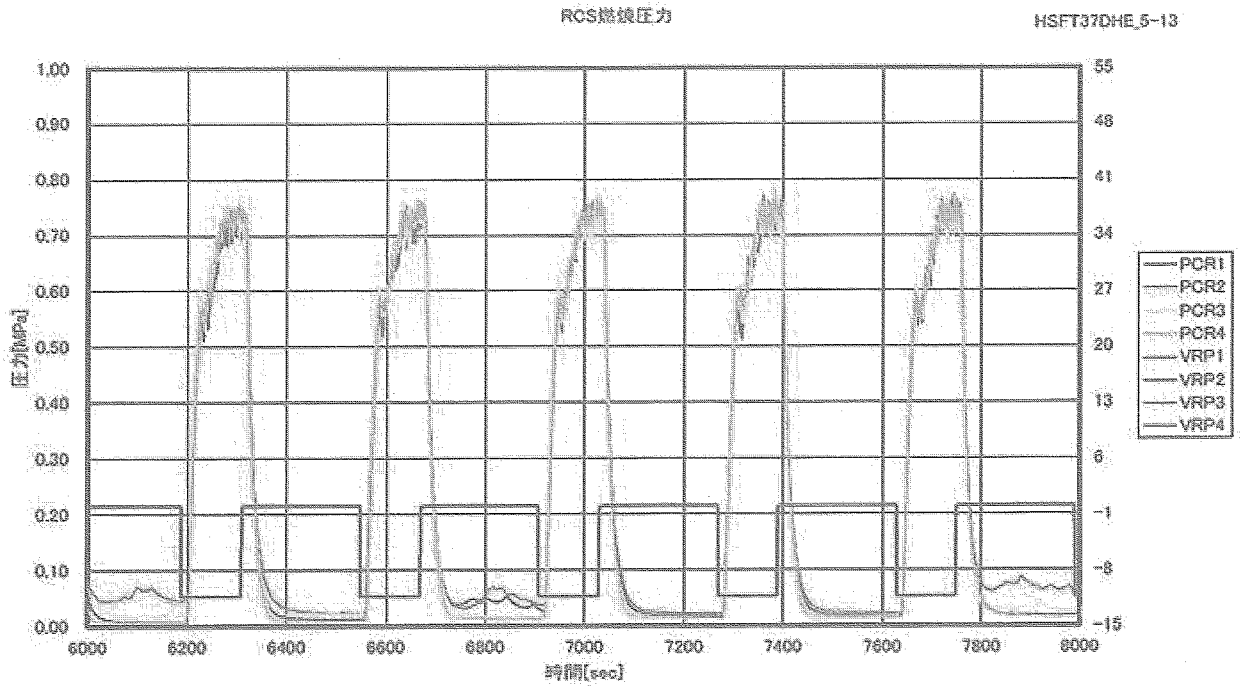


Figure 4 Chamber pressure profiles at RCS pulse firing (HSFT-37, RCS Simultaneous Pulse Fwd-RCS x 4). GHe saturated propellant.