

# 触媒スラスタの信頼性向上

## Reliability Improvement of Catalytic Monopropellant Thrusters

衛星推進技術グループ

(Spacecraft Propulsion Engineering Group)

後藤大亮 香河英史 梶原堅一

(Daisuke Goto, Hideshi Kagawa, and Kenichi Kajiwara)

### Abstract

Catalytic monopropellant thrusters have been loaded in many satellites for reaction control system, because of the reliable simple structure and about 200 sec moderate specific impulse. Nowadays, satellites mass and lifetimes have been increasing, however, Japanese monopropellant thrusters designs were not improved basically. It is therefore thrusters lifetimes have little margin for satellite demand especially in the 1N thruster. During qualification firing test, some malfunctions (ex. misfiring) occurred.

We have been conducted activities for improving thruster reliability since FY12. The results of FY15 is presented here.

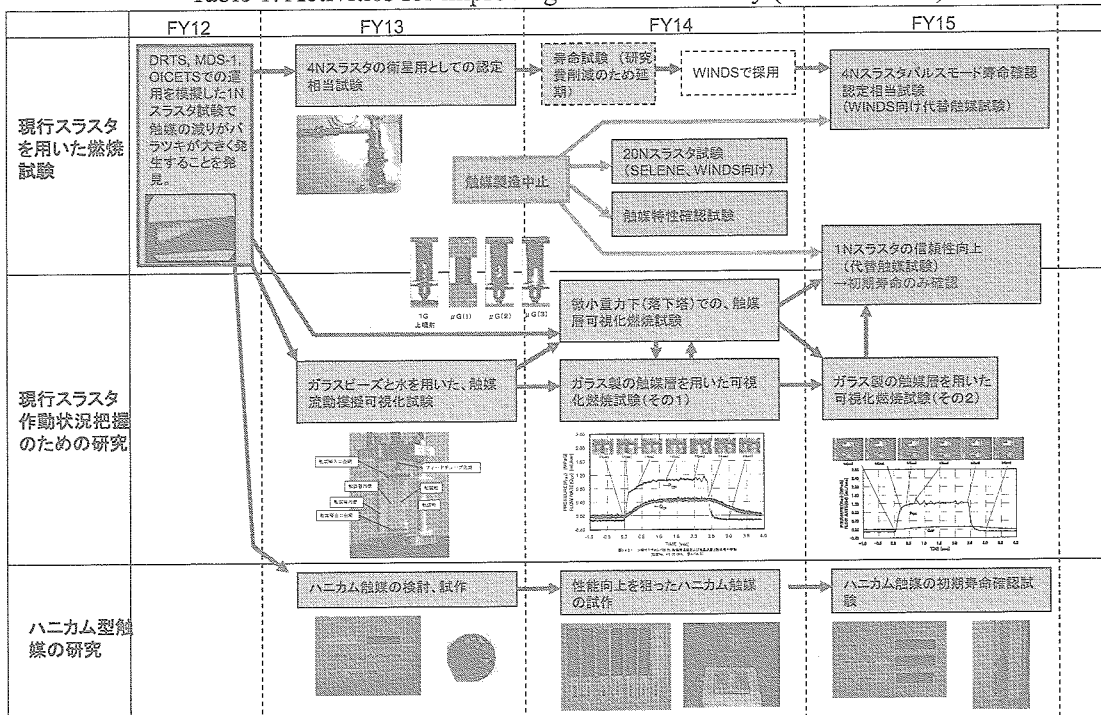
### 1. はじめに

推進剤としてヒドラジンをを用いる1液式触媒スラスタは、シンプルな構造で信頼性が高く、200秒程度の比推力が容易に得られることから人工衛星用の RCS スラスタとして長く使われてきた。しかし、衛星重量の増大、衛星の長寿命化にもかかわらず、基本設計をそのままにして使い続けられたため、特に 1N スラスタの寿命は衛星からの要求寿命に対してほとんどマージンが無い状態である。近年では、衛星での使用を模擬した寿命確認試験中にスラスタ内部の触媒層が劣化し、しばしば作動不良が生じており、触媒スラスタの信頼性および寿命の向上を早急に行う必要がある。衛星推進Gでは、平成12年度より触媒スラスタ信頼性向上を目的とした研究、試験を行っている。ここでは、平成15年度の成果について報告する。

### 2. 研究の概要

平成12～15年度にかけて行ってきた触媒スラスタの信頼性向上のための活動を Table.1 に示す。

Table 1. Activities for improving thruster reliability (FY12～FY15)



触媒スラスタの信頼性向上活動は、大きく3つの項目に分けて進めている。

### 1) 現行スラスタを用いた燃焼試験

現設計のスラスタを用いて燃焼試験を行う。現在の設計の実力値を確かめる試験 (FY12、FY13) と、米国製触媒 Shell405 の製造中止に伴う試験 (FY14、FY15) を行った。

### 2) 現行スラスタについての基礎データを集めるための試験

現設計のスラスタを部分的に模擬し、触媒層への推薬の拡散の可視化 (FY13)、空隙のある触媒層での燃焼の可視化 (FY14、15) などを行った。

### 3) ハニカム型触媒の試作試験

現行の粒状触媒よりも飛躍的に長い寿命を達成できると期待できるハニカム型触媒について、基礎検討、試作 (FY13、14、15) などを行った。

FY15には、4Nスラスタ燃焼試験、1Nスラスタ信頼性向上試験、ガラス製触媒層を用いた可視化燃焼試験、ハニカム型触媒の初期寿命確認試験の4件を実施した。これらの成果を報告する。

## 3. 成果の概要

### 3-1. 4Nスラスタパルスモード寿命確認認定相当試験 (代替触媒信頼性評価試験)

WINDS (超高速インターネット衛星) において初めて4Nスラスタが衛星用パルスモードで使用されることを受け、寿命確認のための認定相当試験を行った。また、この試験は米国製 Shell405 触媒が製造中止されたことに伴い、欧州製 KC12GA 触媒を用いることで触媒の信頼性評価も併せて実施した。

Fig.1 に4Nスラスタを示す。この試験では、KC12GA を充填したスラスタ2機の他に、旧触媒 Shell405 を充填した2機のスラスタも対照実験用として供試され合計4機で行われた。

Table.2 に試験目標を示す。試験中に発生させる力積 (Total Impulse) とパルス数、および噴射モードは、WINDS のシステム要求とマージンに加え、将来的にも衛星用パルスモードの要求に合致するように決定した。

試験の結果を Fig.2 に示す。KC12GA を充填した2機のスラスタは、推力、比推力等に大きな変化を生じることなく、予定の噴射を達成した。Shell405 を充填したスラスタのうち1機は燃焼試験の途中で推力が低下し、触媒層をX線撮影すると、内部に空洞が生じ、触媒が大きく減っていることが確認された。(Fig.3) その結果、Table.2 に示すように Shell405 のうち1機は目標力積を達成することが出来なかった。他の3つのスラスタのうち Shell405 については試験後半に触媒層空洞が観測されたが、KC12GA については2機とも試験の最後まで空洞はほとんど認められなかった。

この理由としては、

- 1) KC12GA と Shell405 の特性の違い
- 2) Shell405 触媒スラスタが平成13年度に製作され、噴射が行われていたことから、触媒が傷んでいた可能性

の2つが考えられるが、明確な原因については不明である。

試験の結果、KC12GA を充填した4Nスラスタは

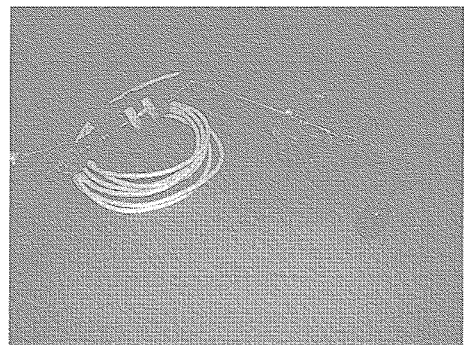


Fig.1 4N class Thruster

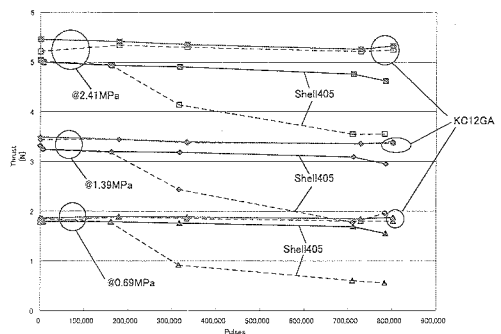


Fig.2 Thrust trend of 4N thrusters

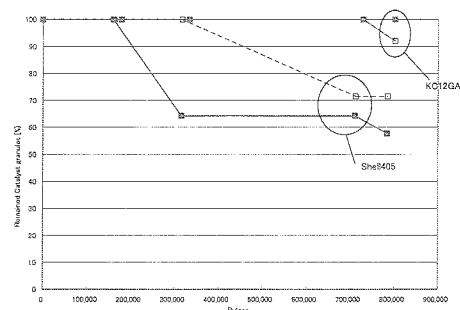


Fig.3 Remaining catalyst granules of 4N thrusters

WINDS 軌道上噴射を模擬した燃焼試験をクリアし、問題なく使えることが確認された。

Table.2 Targets and Results of 4N thruster firing tests

		Targets	Results
Thrust (Beginning of Life)		5.7~4.32N @2.41MPa	Demonstrated
Isp (Beginning of Life)		> 214 @2.41MPa	Demonstrated
Total Impulse [Ns]		> 300,000	282,884 Shell-1 346,674 Shell-2 369,689 KC12GA-1 368,786 KC12GA-2
Total number of pulses		> 600,000	783,435 Shell-1 785,382 Shell-2 802,224 KC12GA-1 802,224 KC12GA-2
Firing mode	On time	0.015 ~ 3600 sec	Demonstrated
	Pulse width	0.1 ~ 3600 sec	Demonstrated

### 3-2. 1Nスラストの可視化燃焼試験

FY14に石英ガラス製の触媒層を用いて触媒層内部のヒドラジンの燃焼を可視化し内部の状態を調べたが、横向きに噴射する試験条件は行わなかった。地上でスラストの燃焼試験(QT, AT)を行う際横向きで噴射していることから、触媒層に空隙の有る状態で地上噴射試験を行ったときの燃焼を可視化することを目的として、この研究を行った。

Fig.4 が試験に用いた可視化触媒層である。触媒層の形状は現行の 1N スラストと同じにした。Fig.5 が噴射中の様子である。触媒粒の動きをよく見るために強い光を当てており、推薬の分解反応で高温赤熱している状態は見えない

Fig.6 に噴射時の触媒粒の動きを示す。当初、触媒粒は比較的水平に分布しているが、ヒドラジンが噴射されると、その液体ジェットの流れにより下流側に押しつけられ、傾いた分布となる。

本実験では 50%まで触媒充填量を減らして噴射を行ったが、触媒層内での明らかな推薬の凍結現象は生じなかった。ただし Fig.6 を見てもわかるように出口側金網に近いところで触媒の対流が生じており、推薬が下流側に抜けると凍結などの不具合事象を生じる可能性があることが確認された。また、燃焼中の圧力の計測結果からは触媒残量 70%以下の場合に圧力パターンの乱れが激しくなった。また、別途行った燃焼中の触媒層内温度分布測定の結果からも、触媒残量 70%以下の場合に、温度上昇パターンの乱れが大きくなることが確認された。

これらの結果から、地上試験(横向き噴射)において触媒層充填率 50%程度ぐらいまでなら推薬を分解することは出来るが、スラストとしての信頼性マージンを考えると最低でも 70%以上を確保すべきだと考えられる。

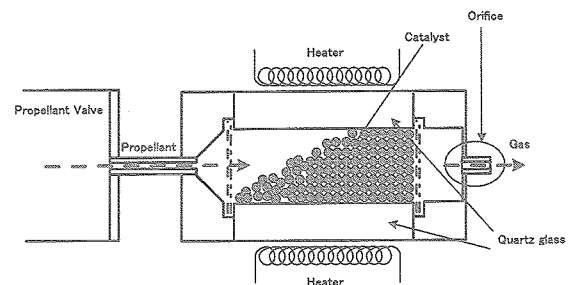


Fig.4 Schematic of visualization catalyst bed

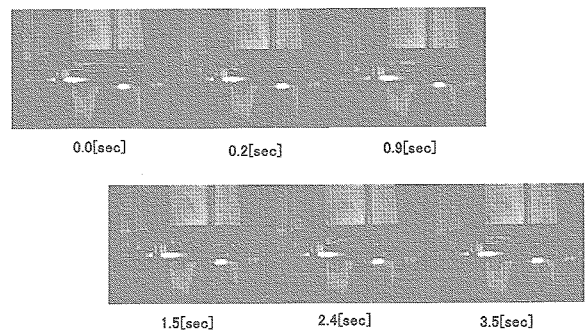


Fig.5 CCD images of the catalyst bed in a horizontal firing.

[ 2.4sec on, 7.6sec off cycle ]

No preheating, 60% (volume) catalysts are loaded  
Inlet pressure is 2.4MPa.

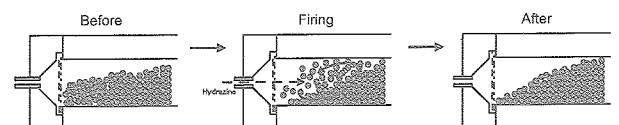


Fig.6 Schematics of catalyst granules stirring in voided catalyst bed

3—3. 1Nスラスタの信頼性向上試験（代替触媒試験）

1N スラスタを対象として、Shell405 触媒の製造中止に伴う代替触媒試験を実施した。当初、1N スラスタを製造し代替触媒を充填して燃焼試験を行う予定であったが、以下の理由により計画を変更した。

- 1) 欧州触媒 KC12GA を製造している Solvay 社が製造中止することを決定し、Heraeus 社に移管されることとなったため、試験対象の触媒を絞りこむのが難しくなった。
- 2) 現行の 1N スラスタはすでに衛星からの要求寿命に答えるのが厳しいため、代替触媒を用いて認定しても将来の衛星への適用は難しい。

このような事情により、代替触媒については欧州製 KC12GA、米国製 S405 の両方に対して 1N スラスタの形状を模擬した金属製触媒層による燃焼試験を行い触媒の寿命を評価した。また、併行して現 1N スラスタの設計を小改修することで触媒にかかる負荷を減らし、スラスタ寿命を伸ばし、信頼性を向上させるための研究を行った。

代替触媒試験結果

Fig.7 に試験に供した 1N スラスタ金属触媒層を示す。形状は3—2項に示した可視化触媒層に似ているが、触媒層壁が石英ガラスではなく Inconel で作られている。

試験フローは以下の通り。

1. 充填する触媒の質量と体積を計測
2. 30 秒間連続噴射
3. 10000 パルス噴射
4. 30 秒間連続噴射
5. 分解し、触媒の質量と体積を計測

Table.3 の結果を見ると、S405 が最も減りが少ない触媒であると言えるが、3—1項で述べた KC12GA と Shell405 の差異が見えないことから、これだけで触媒の優劣を決めることは難しいと考える。

しかし、代替触媒 KC12GA、S405 が旧触媒 Shell405 と比較して寿命特性が劣っているというデータは見あたらなかった。今後、さらに詳細にデータを取得して、代替触媒を使用した 1N スラスタの信頼性を確認する予定である。

信頼性向上試験結果

これまでに行ってきた様々な触媒スラスタの研究結果から、現 1N スラスタは寿命よりむしろ、立ち上がりの早さや比推力の高さに的を絞った設計がなされていると考えられる。具体的には触媒層に推薬を供給するインジェクタ周りが、粗い金網を通り抜けて勢いよく触媒粒にぶつけるように設計されている。これに対し、比較的細かい金網で推薬の流れを分散し、緩やかに触媒層に推薬を供給する設計で触媒層の長寿命化が計れると期待できることから、インジェクタ周りの設計を変えた触媒層を用いて燃焼試験を行った。まず、石英製触媒層壁を用いて内部の反応を可視化し設計変更の効果を確かめた。その後 Inconel 製触媒壁を用い、代替触媒試験と同じ試験フローで 10000 パルスの燃焼試験を行い、触媒残量を計測した。

可視化の結果、現設計では推薬は金網を勢いよく突き抜けて触媒層の中心部分に達し、そこで主に分

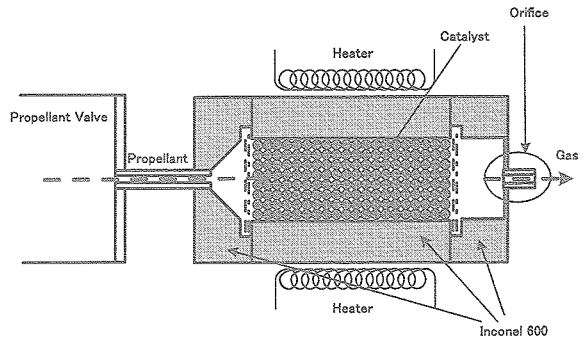


Fig.7 Schematic of 1N class catalyst bed

Table.3 Results of 1N class catalyst bed firing

Catalyst	Catalyst Reduction	
Shell405	Mass -5.7%	Volume <-1%
KC12GA	Mass -5.61%	Volume <-1%
S405	Mass -2.0%	Volume <-1%

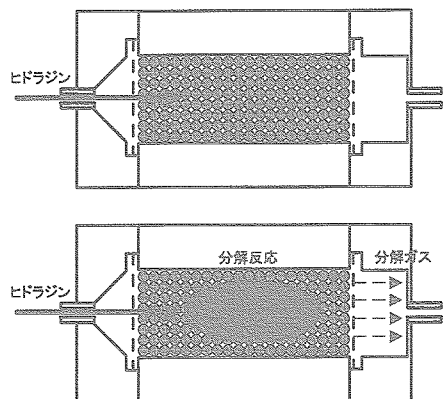


Fig.8 Schematic of hydrazine decomposition model of Japanese design 1N thruster.

解反応を起こす (Fig.8) のに対し、比較的細かい金網を用いた場合は推薬が入り口付近で拡散されて分解反応を起こす (Fig.9) ことが確認された。この結果、インジェクタ直後の触媒粒に対する熱的負荷が減り、Inconel 製触媒層を用いた 10000 パルスの燃焼試験では 1%以下の減少率となった。Table.4 に結果を示す。

ただし、この結果はただ1回の試験データより得られており、この結果だけで設計改良がうまく行ったと言うには早計である。

そもそも、10000パルスの噴射を現行1Nスラストで行うと、噴射モードにもよるが 5%近くのポイドが出るはずであり、今回の試験で触媒に与えられた負荷が適切であったかどうかも含め慎重に検討する必要がある。

本試験により次の成果が得られた。

1. 旧触媒 Shell405 および代替触媒 KC12GA, S405 の3つの触媒について 1N スラストを模擬した触媒層で 10000 パルスまでの寿命確認試験を行い、代替触媒が旧触媒と比較して寿命面で大きな差が無いことを確かめた。
2. 現行 1N スラストの設計を変更することで触媒層に対する負荷を減らし、長寿命化できる可能性があることを示した。

3—4. ハニカム型触媒の初期寿命確認試験

FY13~14 にかけてハニカム型触媒をスラスト用に使用するための検討と、ハニカム型触媒の試作を行った。これは粒状触媒で問題となる粒同士の衝突・摩耗現象を避けることで、触媒の寿命を飛躍的に長くすることを目標としている。

FY14 の結果で、現行触媒並みのヒドラジン分解性能を持つ触媒が達成できたことから、FY15 においては、初期の寿命特性を計測するために小型カラムを用いた燃焼試験を実施した。Fig.10 に小型カラム、Fig.11 に試作触媒を示す。(現状ではハニカム型に整形していないため、板状触媒。)

試験の結果、初期寿命については特に大きな性能の劣化はないことが確かめられた。ただし、本実験の燃焼反応は圧力・温度等のパラメータが実際のスラストから大きく外れているため、Fig.12に示すような試験スラストを用いて実機に近い条件で寿命確認を行う必要がある。

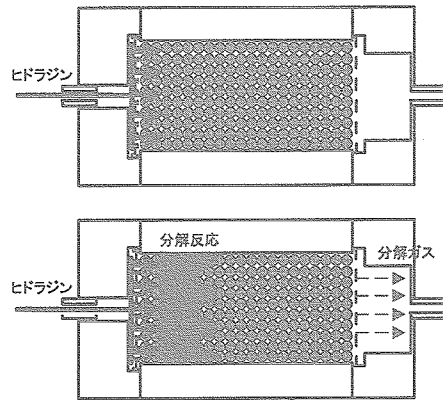


Fig.9 Schematic of hydrazine decomposition model of improved design 1N thruster.

Table.4 Results of 1N class catalyst bed firing using S405 catalyst

Design	Catalyst Reduction	
Ordinary	Mass -2.0%	Volume <-1%
Improved (Type-IIa)	Mass -1.10%	Volume <-1%
Improved (Type-IIc)	Mass -0.88%	Volume <-1%

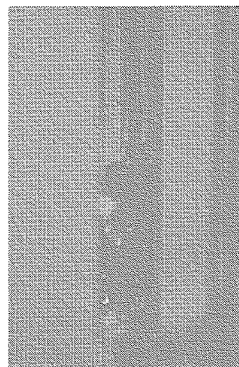


Fig.10 Catalyst reaction column

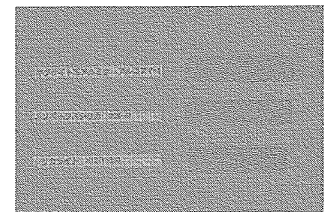


Fig.11 Honeycomb type catalyst

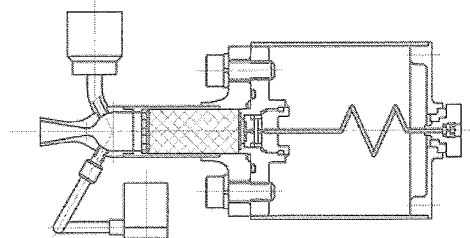


Fig.12 Schematic of an experimental thruster for honeycomb type catalyst

4. まとめ

平成15年度では、触媒スラスタの信頼性向上として4件の研究を行い、それぞれ所定の成果を取めた。今後、触媒スラスタの信頼性をさらに高めるための活動を継続して行っていく。  
平成16年7月現在での今後の作業予定フローを Table.5 に示す。

Table 5. Activities for improving thruster reliability (FY15~)

