

# DRTS-1N スラスタ軌道上推力低下事象の原因究明作業

## Investigation of DRTS-1N thrust degradation phenomena on the orbit

衛星推進技術グループ (Spacecraft Propulsion Engineering Group)

後藤大亮 香河英史 増田井出夫 梶原堅一 (Daisuke Goto, Hideshi Kagawa, Ideo Masuda and Kenichi Kajiwara)

宇宙利用推進本部 (Office of Space Applications)

金森康郎 (Yasuro Kanamori)

### Abstract

KODAMA (DRTS) was launched in 2002, and have been operated successfully on the Geostationary Orbit. Since 2004, one of the 1N thrusters that is used for East-West station keeping and momentum wheel unloading, had indicated lower thrust than that of the others. The thrust degradation is larger than the nominal pace, therefore, we started investigating the cause of the thrust degradation with FTA.

We concluded that it is most probable that the thruster nozzle throat is blocked with a catalyst granule, and small catalyst particles which are produced in the catalyst bed are gathered on it, and they narrow the throat and make the thrust small.

We conducted the experimental investigation of catalyst granule blockage and particle gathering with a simulated nozzle throat gas flow. We confirmed that the phenomena can occur on the orbit.

### 1. はじめに

「こだま」(以降 DRTS と記す) に搭載されている 1N スラスタのうちの 1 台(6A スラスタ)について推力が低下傾向に有るのではないかと指摘が衛星運用部門よりあった。この推力低下は他のスラスタの低下傾向よりも有意に大きく、何らかの異常が発生していると考え、劣化原因についていくつかのメカニズムを検討した。結果、この推力低下は、当該スラスタのノズルスロートに引っ掛かった触媒粒を起点として微粉が堆積し、有効断面積が減少した可能性が高いと判断した。

また、本事象の確認試験を実施し、データを取得し、軌道上で起こり得ることを確認した。

### 2. 研究の概要

DRTS はヒドラジンと四酸化窒素(MON-3)を用いた統合型二液推進系を採用している。アポジ燃焼フェーズでは二液エンジンが使用されるが、静止軌道投入後は酸化剤ラインが遮断され、ヒドラジン一液スラスタのみで運用される。

静止軌道上でスラスタ噴射が必要な以下の運用

- 南北位置制御
- 東西位置制御
- ホイールアンローディング

のうち、a) は DC アークジェットスラスタが主に用いられ、b) c) で推力 1N 級の一液スラスタ(1N スラスタ)が用いられる。

1N スラスタはバルブとジェットモータからなっており、DRTS では 90 度キャントノズルタイプのジェットモータが使われている。(Fig.2)

液体のヒドラジンは図中右下の矢印の方向からバルブ内に流入し、バルブで ON/OFF 制御を受けた上で触媒層に供給される。触媒層中でヒドラジンは蒸発・分解し、その際に発生する熱によって 1000°C 程度の高温ガスとなり、ノズルから噴出されることにより推力を発生する。

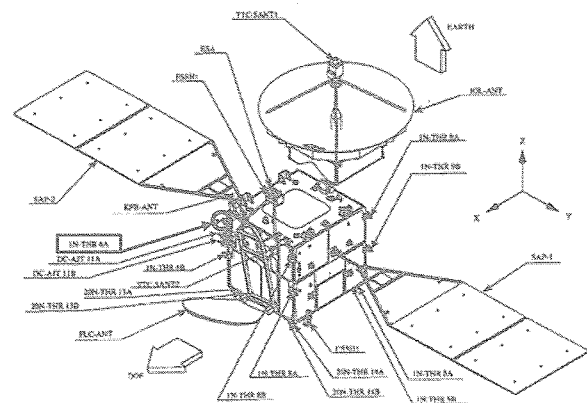


Fig.1 DRTS and 6A Thruster

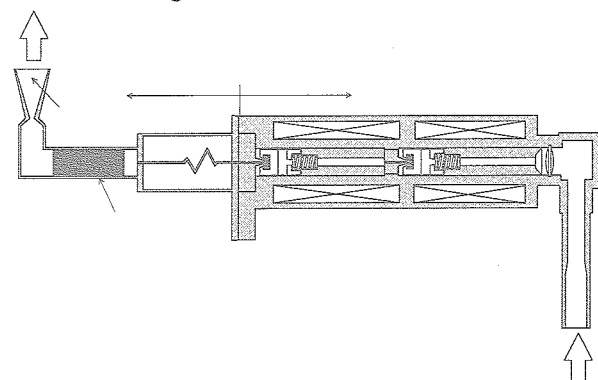


Fig.2 Schematics of 1N class monopropellant thruster

ヒドラジン分解用触媒には、米国製 Shell405 を用いている (Fig.3)。直径約 0.7mm 程度の粒状触媒で、アルミナセラミックスに触媒成分の金属イリジウムが含浸してある。

DRTS には、この 1N スラスタが片系あたり 8 式、合計 16 式搭載されており、2A~9A、2B~9B のナンバーが割り当てられている。東方向制御 (+X 方向制御) 時は 7A と 9A スラスタが、西方向制御 (-X 方向制御) 時は 6A と 8A スラスタがペア噴射される。

DRTS の 6A スラスタの推力低下は、西方向制御時の 8A/6A スラスタの噴射時間の差が少しずつ広がることから疑われた。Fig.4 に東西方向制御時のペアスラスタの噴射時間比率を示す。

2003 年 6 月頃までは 8A/6A 噴射時間比率が 95%程度であったのが、2003 年 10 月頃から有意に下がりはじめ、2005 年の 2 月には 75~80%程度まで下がっている。6A スラスタが連続噴射しているのに対して、8A スラスタのオフパルス時間が時間の経過とともに増えていることを示している。

それに対して、9A/7A スラスタ噴射時間比率では 95~105%程度でばらついており、上昇や減少等の明確なトレンドは観察されない。この結果からは、6A スラスタの推力が 7A、8A、9A スラスタの推力と比較して大きく低下しつつあると見ることができる。

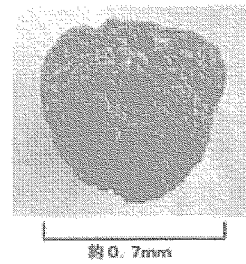


Fig.3 Shell405 Catalyst

DRTS 西方制御(6A+8A使用)、東方制御(7A+9A使用)の噴射時間比率

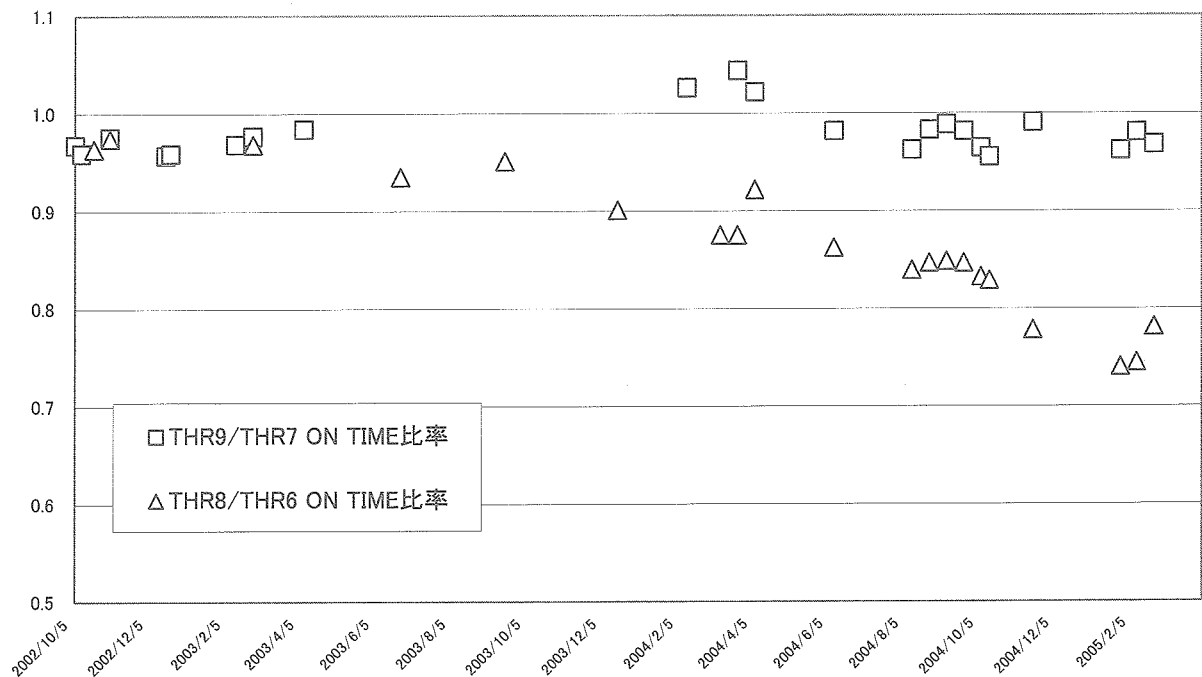


Fig.4 1N Thruster thrust degradation

2005 年 2 月時点での 6A スラスタの累積作動量は約 95,000 パルス/約 16,000 秒で、DRTS の MDC(寿命)要求(540,000 パルス/90,000 秒)に対しかなり小さいため何らかの異常が生じていると考え、軌道上データの解析・過去の噴射試験データ見直しを行い FTA を実施した結果、Fig.5 に示すプロセスによって推力が低下した可能性が高いと推定した。

この推定原因が軌道上で起こり得るかどうかが確認し、起きる確率がどの程度かをおおまかに見積もることを目的として、1N スラスタ推力低下事象原因確認試験を実施した。

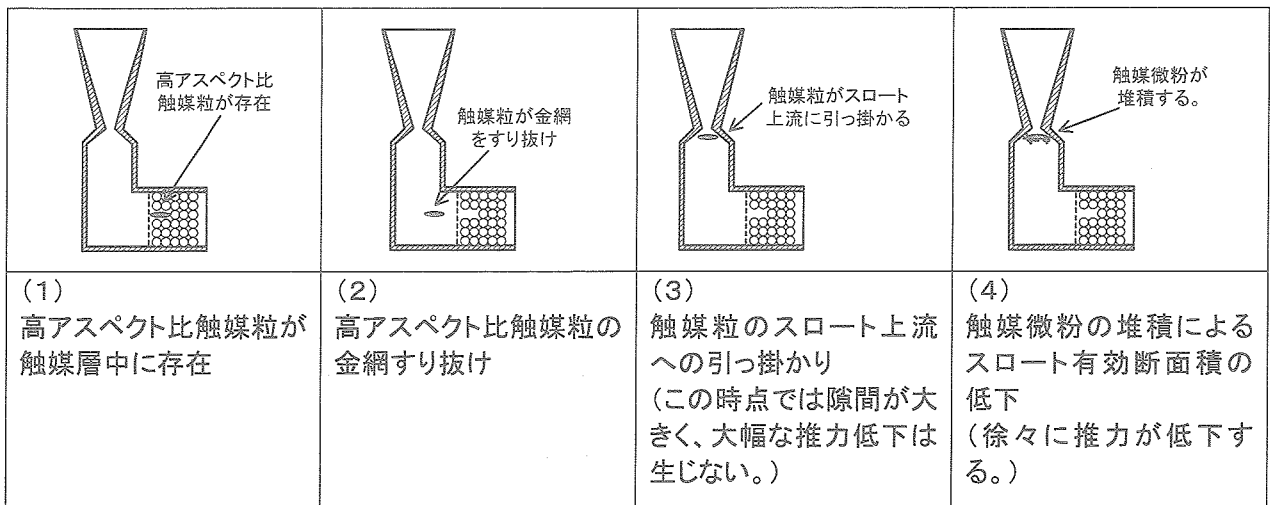


Fig.5 DRTS 1N thruster thrust degradation process (A assumption from the orbit data)

### 3. 成果の概要

以下に示す3つの調査、試験を通じて、推力低下プロセス(Fig.5)を検証した。

#### 3-1. 触媒粒度分布

Fig.5(1)、(2)に示している「高アスペクト比触媒粒」とは、下記の条件を満たすような形状である。

- 触媒層の金網の目をすり抜ける程度の「細さ」
- ノズルスロートに引っかかることができる程度の「長手方向サイズ」

1N スラスタ触媒層に触媒を充填する際には、あまりにも極端な形状の触媒粒を取り除くことで有る程度揃った形状にしている。しかし、選別後の触媒粒の中に、a),b)の双方の条件を満たすような触媒粒がどの程度含まれるかについて定量的な評価はなされていなかった。

通常のスラスタ製造過程で行われるのと同じ選別作業を行ったあとの触媒粒を、粒度分析計測機を用いて全ての粒形状データを取得し、統計処理した結果、1スラスタあたり約10粒程度が含まれることがわかった。

#### 3-2. 流出触媒粒のスロート上流引っ掛かり事象

Fig.5 の(3)について、ヒドラジン触媒粒がどのように金網をすり抜け、ノズルスロート上流に引っ掛かるかを実験もしくは解析で検証するのは非常に難しい。その理由としては以下が挙げられる。

- 噴射中は高温、高圧のガス流に曝されること。
- 噴射後は流れのない無重量環境下であること。
- すり抜け、その後壁に衝突しながらノズルスロートに近づく触媒粒の動きは非常に複雑なこと。
- 噴射中、噴射後のどちらの条件で粒がすり抜けたのか判らないこと。

軌道上での厳密な引っ掛かりのプロセスを明らかにする必要はないと考え、重力下、ガス流れなしの環境下で、スラスタノズルスロート形状を模擬した試験治具(Fig.6)を用い、金網をすり抜けた触媒粒がノズルに引っ掛かる割合を求めた。

投下角度と投下場所をパラメータに数百回にわたり試験を繰り返した結果、57%程度の確率でノズルスロートに引っ掛かった。上に述べたようにこの試験は軌道上での状態に近いとはいえないが、ノズルスロートと触媒粒の幾何学的な形状、触媒粒-ノズル内壁間での摩擦係数については有る程度模擬できていると考えており、引っ掛かりが生じる

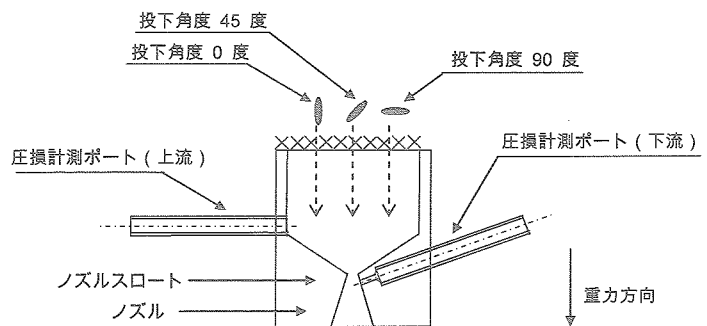


Fig.6 Schematics of the nozzle throat catalyst blockage test

確率をオーダーレベルで評価できたと考える。

触媒粒が引っ掛かった状態でノズルスロットに窒素ガスを流し、ノズルスロット上下に配置した圧力ポートから圧損を計測した。その結果、高アスペクト比触媒粒が引っ掛かることによる極端な圧損の上昇が生じないことを確認できた。これにより、6A スラスタに急激な推力の低下が生じず、緩やかな推力の減少傾向を示したこと(Fig.4)を矛盾無く説明できることがわかった。

### 3-3. 触媒微粉の堆積によるスロット有効断面積の低下

1液スラスタの触媒層では、噴射中に触媒粒が破碎し少しずつ減っていくと一般に言われている。減少した触媒は、細かい微粉となってノズルを抜け排出される。よって、流入した触媒微粉がノズルスロットに引っ掛かった触媒粒を起点として堆積し、ノズルスロットの圧損を徐々に増大させていくことを確認すれば、Fig.5(4)のプロセスを確認できたことになる。

高アスペクト比触媒粒をノズルスロット部に恣意的に引っ掛け、触媒微粉混じりのガスを流入させ、触媒微粉の堆積状況を調べる試験を実施した。(Fig.7)

軌道上での実際のスラスタ作動を模擬して、連続、パルスでのガス流入を繰り返した結果、増減を繰り返しながら全体として少しずつ堆積量が増加する傾向を示した。Fig.8 に引っ掛かった触媒粒とその周辺に堆積した触媒微粉を示す。

堆積量の増加に応じて、ガス流入時の圧損も増大する傾向が見られた。

なお、触媒粒を引っかけない状態で触媒微粉混じりのガスを流入させる試験も実施したが、微粉の堆積は起きなかった。

以上の3つの試験により、Fig.5 の想定プロセスが現象として生じ得ることを確認することができた。なお、それぞれの発生確率の積から1式のスラスタで本事象が発生する確率を簡単に求めた結果、0.029%と十分に小さい数字が見積もられた。この数字は、過去の 1N スラスタに同様の軌道上不具合事象が認められないことを説明できる。

## 4. まとめ

DRTS の 1N スラスタに生じた推力低下現象について、FTA を用いて原因の推定を行い、また実験を通じて現象として生じ得ることを確認した。なお、2006 年 10 月現在、DRTS は B 系 1N スラスタを使用して順調に運用を継続している。また、同型のスラスタを使用している SELENE、GOSAT については、製造工程記録の評価、品質管理の改善などを通じて、同様の推力低下事象が発生するリスクが十分に小さいと判断している。

## 謝辞

DRTS の推力低下現象の原因推定については、JAXA 宇宙利用推進本部、追跡 NW 技術部、三菱電機株式会社、株式会社 IHI エアロスペースの、1N スラスタ推力低下事象原因確認試験については株式会社 IHI エアロスペース、株式会社 AES の草間氏の協力の下で実施いたしました。心より御礼申し上げます。

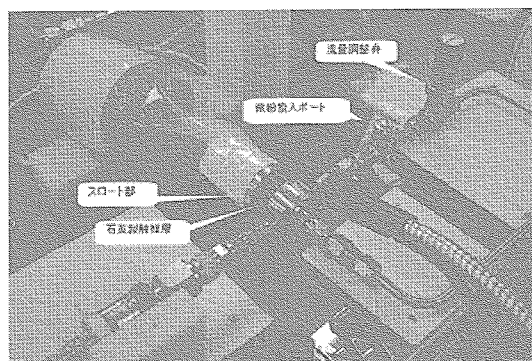


Fig.7 Test setup of the catalyst particle gathering

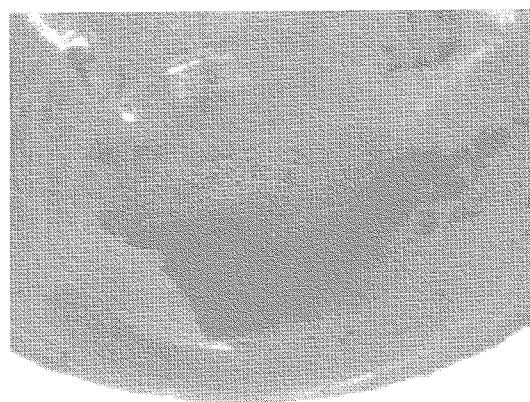


Fig.8 Catalyst granules and particles