

衛星用1液スラスタの信頼性向上活動について (FY16)

Reliability Improvement of Catalytic Monopropellant Thrusters (FY16)

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)

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.

We conducted the FMEA in order to investigate the method of lengthen the lifetime of 1N thruster. Then we found out these weak points.

- 1) Strength of catalyst bed metal mesh
- 2) Lifetime of catalyst granules

We conducted the material analysis of catalyst bed mesh wire that is removed from a life-tested thruster and firing test with the thruster imitation equipment.

1. はじめに

推進剤としてヒドラジンをを用いる一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姿勢制御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。

過去に、衛星での使用を模擬した寿命確認試験の末期でスラスタ内部の触媒層が劣化し、システムからの要求は満足したものの、寿命マージンの確認噴射中にしばしば作動不良が生じていることから、衛星推進グループでは平成12～15年度まで、主に触媒層の寿命に的を絞り、信頼性および寿命の向上を目指してきた。

平成16年度では、1N スラスタを対象とした詳細故障モード影響解析(FMEA)を作成し、要改善点の洗い出しを行った。また、その結果を受け、触媒層金網強度と触媒層寿命の影響要因に関する研究を実施した。

ここではそれらの内容について簡単に報告する。

2. 研究の概要

1N スラスタを高信頼化・長寿命化するための要改善点をもれなく洗い出すため、詳細 FMEA を実施した。その結果、平成16年度は以下の2点に注目して研究を実施した。

1) 触媒層金網強度

現在、各衛星で使用されている1液式スラスタの設計と、過去に実施された触媒層金網強度に関する評価試験においては、触媒層金網の実使用環境下における金属材料の適合性および強度低下について考慮されていたが、長時間のスラスタ作動によって窒素およびアンモニア雰囲気中に金網が曝されることにより、窒化と脆化の現象については考慮されていなかったため、その評価が必要である。

2) 触媒層寿命

国産の 1N スラスタは寿命試験後に大きく触媒粒が減少していることが観測されている。触媒が減ることで触媒層全体のヒドラジン分解能力が低下し、推力の低下等の性能低下が生じるリスクが高

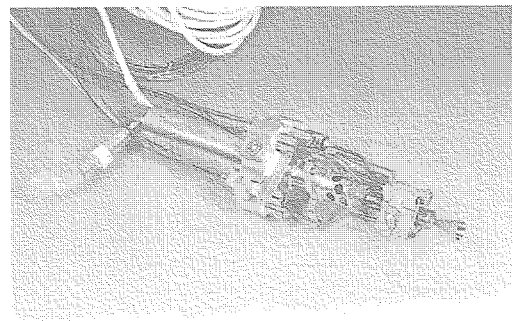


Fig.1 1N Thruster

まるため、触媒の減少速度を緩和することにより触媒層の寿命を延ばし、信頼性を向上に寄与することを見込んでいる。

そのためには、(1)長寿命の触媒を開発する、(2)触媒にかかる負荷を緩和する、の2つの方法がある。触媒の開発には長い時間と費用がかかる割に、確実に長寿命の触媒を完成できる見込みが小さいことから、触媒にかかる負荷を緩和するための研究とその結果を受けたスラストの改善を行うべきであると判断した。

FY16 ではこの結果を受けて、4N スラスト寿命試験後の触媒層金網の分析、1液スラスト触媒寿命要素確認試験の2件の研究を実施した。これらの成果を報告する。

3. 成果の概要

3-1. 4Nスラスト寿命試験後の触媒層金網の分析

2項において要改善点として挙げた触媒層金網の強度について、まず手始めに寿命試験後の供試体から取り出した金網についてどのような劣化を生じたのか調査を実施した。対象は 2003 年度寿命試験を実施した4式の 4N スラストのうちの2式である。

2式のスラストを分解し、取り出した金網を対象として以下の調査を行った。

- ①金網表面の SEM 像撮影
- ②金網断面の元素分析

①金網表面の SEM 像撮影

Fig.2 に 4N スラストの触媒層の模式図を示す。触媒層は2段に分かれ、合計3枚の金網によって触媒粒が流れ出ないように固定されている。なお、この3枚の金網は全て耐熱合金 L605 で製造されており、主な組成は、コバルト、クロム、タンゲステン、ニッケル等である。

Fig.3、が未使用の金網の素線、Fig.4 が燃焼試験後のスラストを分解して取り出した金網の素線である。Fig.4 を見ると、表面が脆化して割れていることが分かる。図には示していない部分にも、ワイヤーの表面の複数箇所に細かいクラックが入っていた。

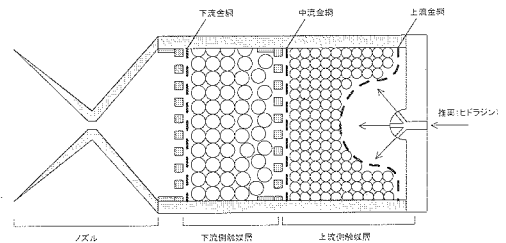


Fig.2 Schematics of 4N Thruster

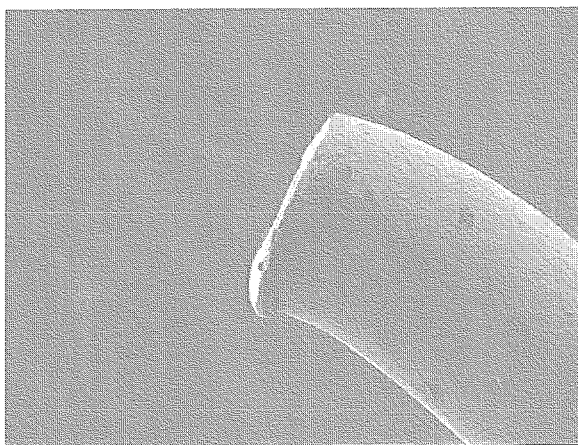


Fig.3 A new mesh wire

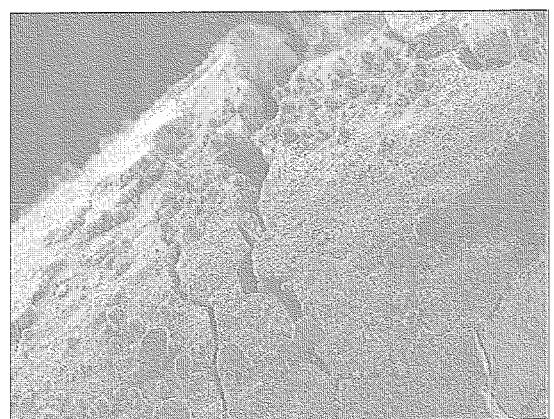


Fig.4 The mesh wire of the tested thruster

②金網断面の元素分析

金網の断面写真を Fig.5～Fig.7 に示す。濃淡は含まれている元素の分布をおおまかに示している。Fig.5 の未使用金網は全体がほぼ一樣なのに対して、Fig.6 の燃焼試験後の金網は外側と内側とで明らかな組織構造の違いが見て取れる。Fig.7 に拡大写真を示すが、色の濃い部分が薄い部分の中にひび割れ上に分布

し、Fig.5 の未使用金網と比較して組成が変化していることがわかる。色の濃い部分について元素分析を実施した結果、基材であるコバルトが減少しクロムが増えていることが判明した。このクロム成分はその大部分が窒素と結びついた窒化クロムとなっていると考えられる。窒化クロムは非常に硬く脆いため、Fig.6 のような2重の組織構造では金網全体としての強度が大幅に落ちると予想される。

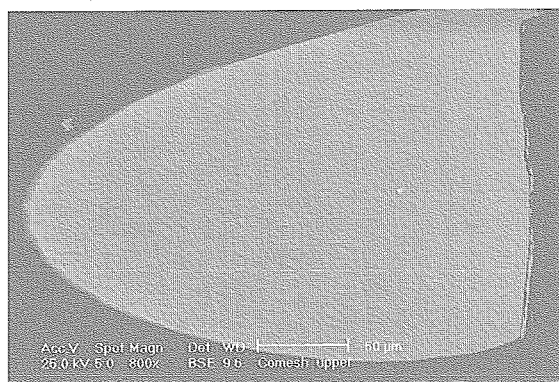


Fig.5 A cross section image of a new mesh wire

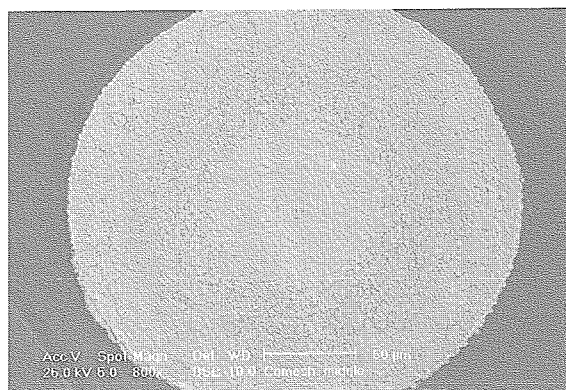


Fig.6 A cross section image of the mesh wire of the tested thruster

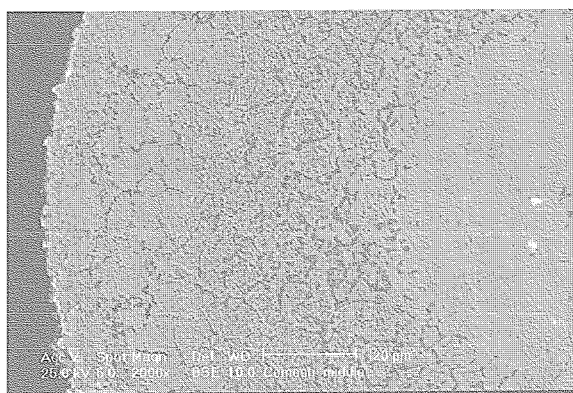


Fig.7 A enlarged cross section image of the mesh wire of the tested thruster

これらの結果から、寿命試験後のスラスタ触媒層金網は脆化が進んでいることが明らかとなった。その原因は、高温(800℃~1000℃)、高圧(約 1MPa)、熱サイクル、窒素、水素、アンモニア雰囲気という非常に厳しい環境の複合要因によるものと推定される。

この金網は、4N スラスタだけではなく、1N スラスタを含めた全ての国産スラスタで触媒粒を固定するために使用されている。どのスラスタにおいても曝される環境は同程度に厳しいため、この脆化現象はこれまでに燃焼試験および打ち上げに供された全てのスラスタで生じていると考えられる。

今後、材料単体の評価試験を実施し、脆化による金網の強度低下がスラスタとしての信頼性に影響を及ぼすレベルかどうか確認する予定である。

3—2. 1液スラスタ触媒寿命要素確認試験

2項において要改善点として挙げた触媒層寿命について、触媒の破碎およびそれにとりまなう触媒層からの減少を引き起こす主な原因は以下の3項目である。

①温度変化

予熱時は 200℃程度だが、噴射時は瞬時に 800℃近くまで加熱される。この温度サイクルにより触媒が破碎される。

②粒同士の衝突、磨耗

触媒粒の量が減ってくると、粒同士が触媒層内で衝突、磨耗し、破碎が進む。

③液状推進剤の浸透による破砕

触媒表面に無数に存在するマクロポア(微細孔)内に液状推進剤が浸透し、反応・気化することによって触媒表面が破砕される。

このうちのどのメカニズムが最も大きな影響を与えているのかを確かめ、その減少を緩和するようにスラスタの設計を改善することで、触媒層の長寿命化を図ることが出来る。

FY16 ではこのうち②に主眼を置き、Fig.8 に示すスラスタ模擬燃焼試験装置を製作し、燃焼試験等を実施した。

模擬燃焼装置は2種類用意した。1式は通常触媒層を持っており、もう1式は触媒の減少に合わせてスペーサーを挿入して、空隙を小さく抑えることで噴射中の触媒粒の流動を抑制できるように設計されている。噴射モードは30000秒の連続燃焼のみとし、5000秒、10000秒、20000秒の時点で噴射を中断し、触媒の減少重量を計測した。また、1式については減少量に合わせたサイズのスペーサーを挿入した。また、試験毎の結果のばらつきを評価するため、同条件で3回の試験をそれぞれ実施した。

Fig.9 に試験結果を示す。縦軸は燃焼試験前後の触媒の量(g)を示している。スペーサーを用いない「無調整型」と比較して、「調整型」の方がより触媒の減少が激しい。また、調整型・無調整型の双方とも3回目の試験結果が記載されていないのは、触媒を固定する金網が劣化・損傷したためであり、2項で述べた触媒層金網強度の要改善点を図らずも実証する結果となった。今後、この金網の劣化についての詳しい情報を収集し、スラスタの信頼性向上につなげる予定である。

この燃焼試験の主目的であった触媒流の流動抑制の効果については、無調整型がより減少量が小さい結果となった。その理由については、触媒粒同士の衝突、摩耗が触媒減少に与える影響が小さいためだと考えられる。

しかし、スペーサー挿入量を触媒の重量変化から決定した際、触媒の密度変化を考慮に入れなかったことで触媒に過重をかけて破砕が進んだ可能性があることから、結果については慎重に判断する必要がある。

4. まとめ

平成16年度は、触媒スラスタの信頼性向上活動として、FMEA 分析および2件の研究を実施した。今後、触媒スラスタの信頼性をさらに高めるために、FMEA の結果に沿った研究活動を継続して行っていく。

謝辞

本研究の「金網表面の SEM 像撮影」については、総合技術研究本部マテリアル・機構技術グループの、「金網断面の元素分析」については、独立行政法人 物質材料研究機構のご協力の下で実施いたしました。心より御礼申し上げます。

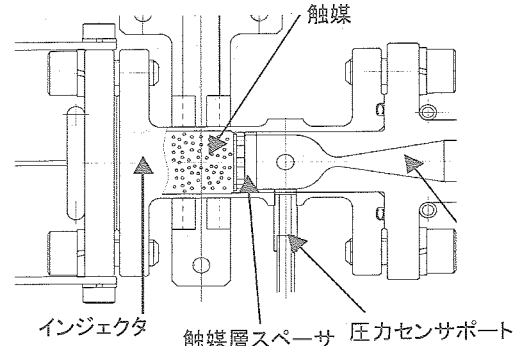


Fig.8 Firing Equipment (Thruster Imitation)

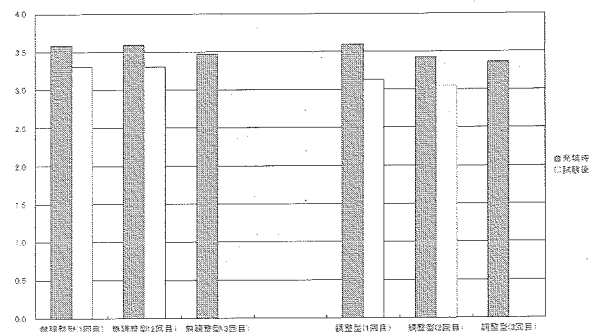


Fig.9 Firing Test Results