

# 人工衛星用 20N 推薬弁の国産開発

## The Development of a Japanese 20N Thruster Valve for a Spacecraft Propulsion System

総合技術研究本部 衛星推進技術グループ

長田泰一, 櫛木賢一, 梶原堅一

Institute of Aerospace Technology, Spacecraft Propulsion Engineering Group

Taiichi NAGATA, Kenichi KUSHIKI, Kenichi KAJIWARA

### Abstract

The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is now developing a 20N-class thruster valve for spacecraft propulsion systems. We intend to develop this valve with the high reliability, and a robust and durable design. The suspended armature type was chosen for the base design of the new 20N valve based on the results of a trade-off study. Experiments and analysis were performed for the critical parts and manufacturing process. The results enabled us to manufacture a prototype model with single type 20N thruster valves. Good results were obtained in functional tests. We will now proceed to the next phase and complete the detailed design for series redundancy and prepare for the qualification test.

### 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、日本 MOOG (株) との契約のもとに 20N 級推薬弁を平成 15 年度より開発中である。

金属と金属が摺動する部分は不具合原因の一つとされている。本推薬弁は、摺動部を持たないサスペンディットアーマチャータイプを採用し、また数値解析手法を設計に取り入れることで、「高信頼性」および「ロバスト」な開発を目指している。

現在、試作モデルによって抽出された課題を、試験や解析により解決し、最終設計段階にある。本報では、開発の背景およびこれまでの開発結果について述べる。

### 2. 概要

衛星の姿勢制御および軌道変換は、スラスタによる燃焼ガスの噴出により行われる。図 1 に超高速インターネット衛星 (WINDS) の推進サブシステム系統図を示す。推進薬タンクに貯蔵されている推進薬をスラスタに供給するために、数種類のバルブと配管を複雑に組み合わせた構成となっている。推薬弁は、末端のスラスタモジュールに用いられている。

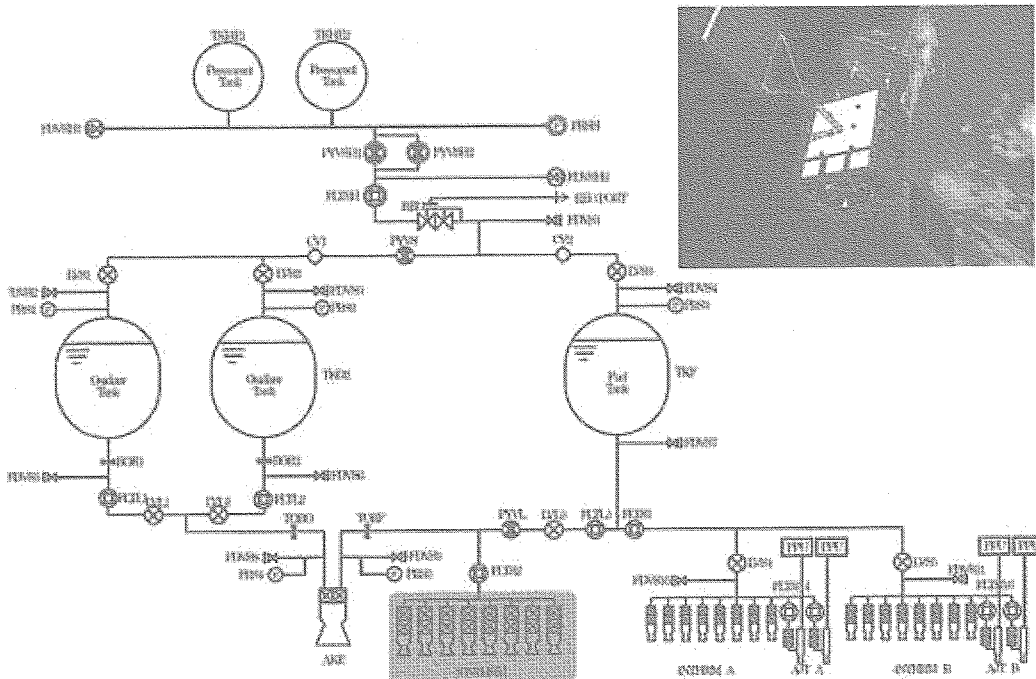


Figure1 Diagram of satellite propulsion system for WINDS (Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite). Red region is the 20N thrusters.

図2にスラスタモジュールの例を示す。ここに示したスラスタは、ヒドラジン ( $N_2H_4$ ) を燃料とする1液式のスラスタである。燃料を触媒で分解することによりガス化させ、ノズルから放出することによって推力を発生する。推薬弁は燃焼室（触媒層）の直上流に設置され、スラスタへの推薬供給を制御する重要な役割を担っている。

推薬弁は人工衛星の推進サブシステムの中で不具合の多い部品の一つであり、また、不具合を起こした場合には人工衛星にとって致命傷になる可能性が高い。

これまでは20N級スラスタ用の国産推薬弁はなく、海外製が使われてきた。しかし、不具合の多発、技術情報の開示制限および価格の高騰など、海外製バルブが衛星の開発を阻害する要因となっている。そこで、衛星開発における自在性確保の観点から、国産開発が求められている。

1-4 N級の推薬弁はすでに国産化されており、多くの実績を有している。20N級のスラスタが国産化できれば、すべての衛星用小型スラスタを日本国内で生産できる体制が整う。

以上の背景から、JAXAでは2003年度から、日本MOOG(株)により20N級推薬弁を開発している。これまでに初期設計を確定<sup>[1]</sup>。試作モデル

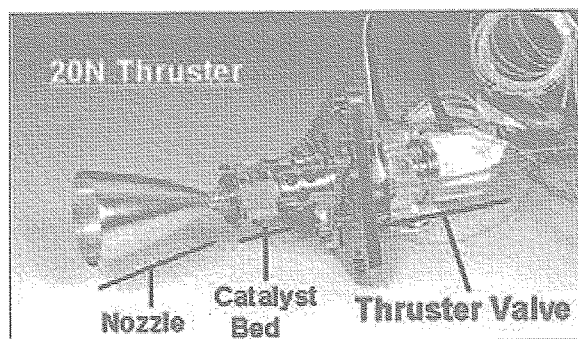


Figure 2 Mono-propellant 20N thruster Module (IHI AEROSPACE CO., LTD.)

を制作し、設計評価試験および要素試験を実施した。現在は設計の改良および再評価、認定モデルの制作準備を始めており、最終設計段階にある。

### 3. 主な仕様

開発のターゲットとしているのは、以下のような推薬弁である。

- ・ソレノイドコイルによる駆動。
- ・通常はバネによる閉状態で、ソレノイドコイルに通電している間だけ開状態となる。
- ・シール材には推進薬耐性のあるエラストマーを使用。
- ・直列に2段つなげて、閉にならない故障に対して冗長とする。(シリーズリタナダント)

さらに、衛星システム及び推進サブシステムメーカーからの聞き取り調査を実施した結果、次のような要求が整理された。ロバスト&高信頼性、長寿命化、ユーザーインターフェースを踏襲及び情報開示、技術情報をできるだけ開示することである。

以上を考慮し、表 1 に示すような基本仕様とした。(これらの仕様は、今後の最終設計の進捗により変更する可能性がある。)

また、上記要求を満たすために、バルブ構造についてトレードオフを実施した。図 3 に 2 つの典型的な推薬弁タイプである、スライディングフィットタイプとサスペンディットアーマチャータイプを示す。スライディングフィットタイプは構造が簡単であるが、金属と金属の摺動面を持つ。この摺動面は設計が難しく、コンタミ生成や摺動抵抗の増大によりバルブが動かなくなる不具合を起こす可能性がある。

一方、サスペンディットアーマチャータイプは摺動面がない。アーマチャーと呼ばれる弁体を板ばねの一種である“S-Spring”で中心に保持する構造である。S-Spring は軸方向には変形するが、半径方向には変形し

Table 1 Typical requirements of a 20N thruster valve (series-redundant)

Property	Target value
Compatible fluid	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , MMH, GHe, GN <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, IPA, (NTO/MON-3)
Pressure	
operation	0 to 2.8MPa
proof	6.9MPa
Flow rate	12.7g/s at N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Pressure drop	0.172 MPa
Internal leakage	< 1x10 <sup>-5</sup> cm <sup>3</sup> /s
Operating voltage	24 to 32 VDC
Power consumption	35 W @32VDC
Response time	Open: <15 ms Close: <10 ms
Temperature	5 to 149 degree C
Cycle life	Wet: 1,000,000 cycle Dry: 50,000 cycle
Weight	< 300g
Delivery date	6 month

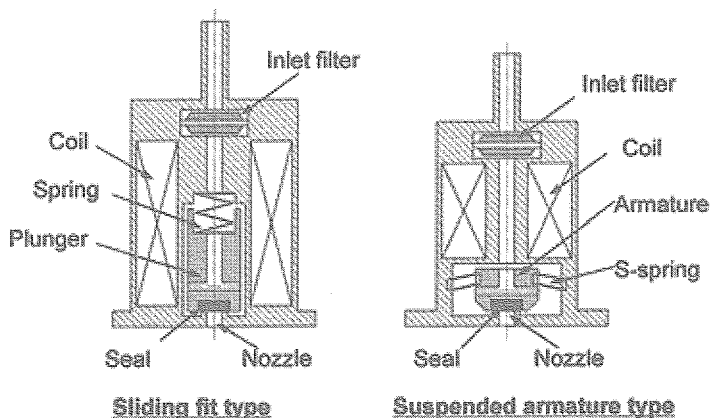


Figure 3 Comparison of typical valve structure types, sliding fit type (left) and suspended armature type (right). Suspended armature type has no friction surface.

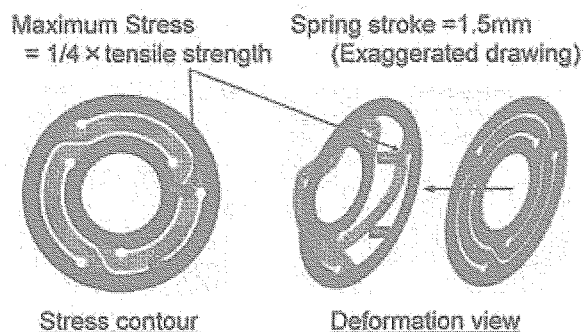


Figure 4 Stress analysis of the S-spring

ないような板ばねである。

本国产推薬弁では、サスペンディットアーマチャータイプを採用することにより、長寿命(作動回数の増加)、摺動故障の低減、およびコンタミの発生低減を期待している。

また、高信頼性化を目標として、トヨタ自動車の品質管理手法であるGD<sup>3</sup>を実施した<sup>[2]</sup>。これは、Good Design, Good Discussion, Good Design Reviewを目指すものである。具体的には、FMEA (Failure Mode Effect Analysis, 故障モード影響解析) シートをもとに、予想される

不具合原因を明確にし、設計の段階で対策をとることにより、不具合を未然に防ぐことを目的としている。

#### 4. 設計および評価の概要

図3の右側に示したような、サスペンディットアーマチャータイプの推薬弁を設計した。ここでは、板バネの一種である S-Spring とそれを組み立てたアーマチャー部品の結果について述べる。

##### 4.1. アーマチャー部品 & 板バネ (S-Spring)

S-Spring はこの推薬弁にとって重要なパーツの1つと考えている。解析により応力分布が最適になるように設計されている (図4)。

図5にアーマチャー組立の振動解析結果の一部を示す。1次モードの固有振動時の応力解析結果である。固有振動数は181Hzであった。また、シール材は推薬であるヒドラジンに耐性を持つ材料としてこれまでに実績のある、エチレンプロピレンゴム (AF-E-411) を採用した。

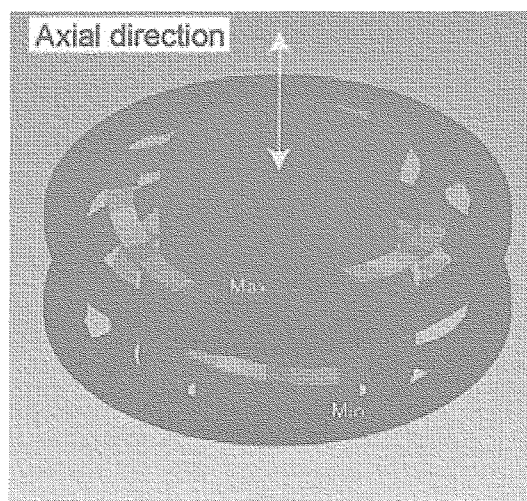


Figure 5 Natural mode of vibration analysis ( the basic mode 181Hz)

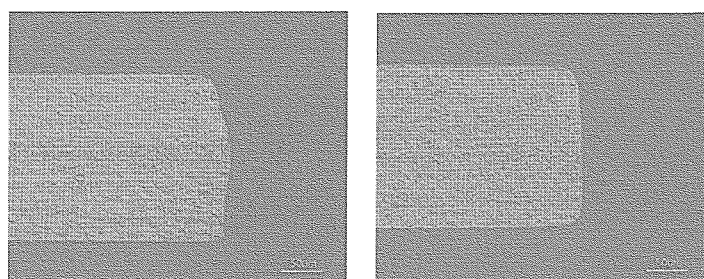


Figure 6 The cross section of the S-spring after an electrolytic polishing process, chemical etching (left) and machining (right).

S-Spring はこの推薬弁の基本性能を決定する重要な部品であることから、十分な加工精度が要求される。また、エッジ部からコンタミが発生しないような表面仕上げが必要である。加工方法として、ケミカルエッチングと機械加工を比較した。図 6 に各加工後に電解研磨を実施後の S-Spring の断面写真を示す。両方とも、電解研磨に

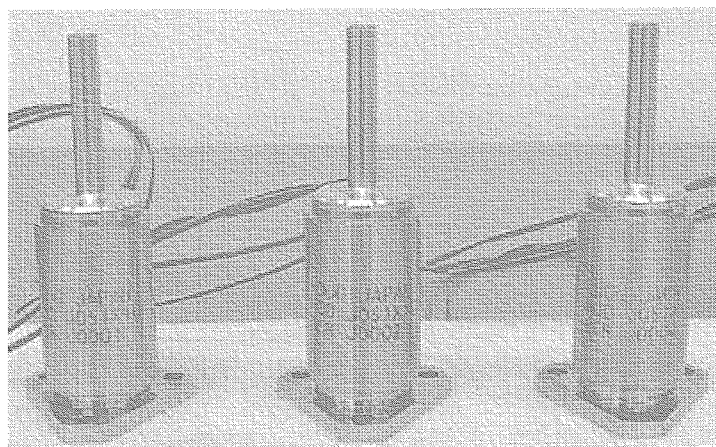


Figure 7 Bread Board Model of 20N-class thruster valve

よりエッジ部が滑らかになっており、コンタミ発生の原因となるシャープエッジ部がないことが分かる。観察の結果、加工方法による大きな違いはみられず、また加工精度も十分であった。比較的 low コストであることを理由に、ケミカルエッチングを採用した。

#### 4.2. 試作推薬弁 (BBM: Bread Board Model) の製作および機能試験結果

初期設計に基づき、試作推薬弁 BBM を製作した (図 7)。これらを用いて、設計検証を目的として、機能試験および 1,000,000 回作動寿命試験を実施した。試験の結果、流量特性以外の基本性能は設計仕様を満足した<sup>[3]</sup>。調査の結果、流量特性の見積もり方法が間違っていたことが分かっており、最終設計には反映される。

### 5. 開発スケジュール

開発の全体スケジュールを図 8 に示す。現在は最終設計段階である。平成 18 年度にバルブ単体として認定試験の実施を予定しており、バルブ単体としては開発を完了する。

また、実際に衛星に搭載するためには、スラスタモジュールとしての確認試験が必要である。そのため、平成 19 年度にはスラスタとの組み合わせ噴射試験を実施する予定である。

### 6. まとめ

JAXA では、これまで国産化されていなかった、20N 級推薬弁を開発している。さまざまなユーザーからの要求を仕様に反映するとともに、「高信頼性」および「ロバスト」なバルブを目指している。

初期設計に基づき、試作モデルを完成させ、設計評価のための解析・要素試験を実施した。抽出された課題を、試験や解析により解決し、最終設計段階にある。

参考文献

- [1]Kushiki, K., et al.,“Development of a 20N thruster valve for a spacecraft propulsion system”, *On-Board Energetic Equipment*, AAAF,[CD-ROM], Avignon, France, 2004.
- [2]Yoshimura, T.,“*Proactive method of TOYOTA GD3*”, JUSE Press Ltd., ISBN4-8171-3045-8, 2002, Chaps. 4-7.
- [3]Nagata, T., et al., “The Development of a Japanese 20N Thruster Valve for a Spacecraft Propulsion System”, *42nd Joint Propulsion Conference*, AIAA 2006-4876-142, Sacramento, U.S.A, 2006

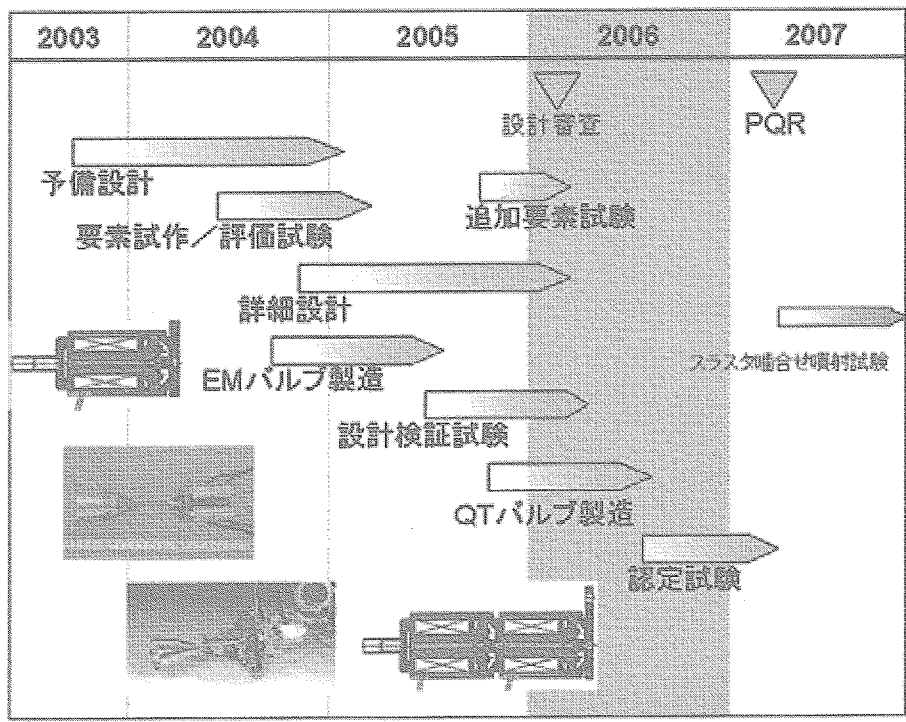


Figure 8 Development schedule of the 20N-class thruster valve