

信頼性向上研究／重要部品の開発

衛星推進系バルブの信頼性向上研究 及び 20N 推薬弁／遮断弁の国産開発

Study for reliability improvement of spacecraft's RCS valve
/ Development of 20N Thruster valve and Latching valve

衛星推進技術グループ (Spacecraft Propulsion Engineering Group)
梶原堅一、櫛木賢一 Kenichi Kajiwara, Kenichi Kushiki

Abstract: Spacecraft's valves are important and key components for the mission success. But it is an undeniable fact that there are lots of failures in valves. So these valves are required to be reliable and robust at all times. This paper describes the outline of our study for reliability improvement of spacecraft's valves and the development status of 20N-class thruster valve and Latching valve.

1. はじめに

衛星推進系において不具合が頻発している昨今の現状を鑑み、確実な衛星推進系の実現、信頼性の向上が強く望まれている。特にその不具合要因の多くはバルブに起因するものであるが、バルブの設計、製造は依然として経験則に依存するところが多く、またその使用方法・限界、作動寿命等も従来実績に基づく評価が中心であり、製品の設計・製造良否、ミッション毎の使用計画の妥当性を、定量的に判断する指標となるべき基盤技術、基礎技術データが十分に整備されているとは現状言い難い。こうした衛星推進系が抱える問題点の改善に向けた、バルブ信頼性向上のための研究活動を展開している。

また、部品基盤技術強化の一環として、我が国の宇宙開発プログラムの「自立性」、「信頼性」確保の観点より、衛星推進系用 20N 級推薬弁の開発及び遮断弁逆圧リリーフ機能の付加改修の作業に着手している。

2. 研究の概要

信頼性向上のための研究は、平成 13 年から着手しており、以下の項目を実施してきた。

- ・過去の不具合、設計変更事例から、現状の問題点、バルブ機能を支配する要因抽出
- ・バルブ機能支配要因の基礎技術データ取得試験の実施、データベース化
- ・バルブ信頼性評価手法の検討／評価解析シミュレーションモデルの構築

Fig.2-1 に研究全体イメージを示す。

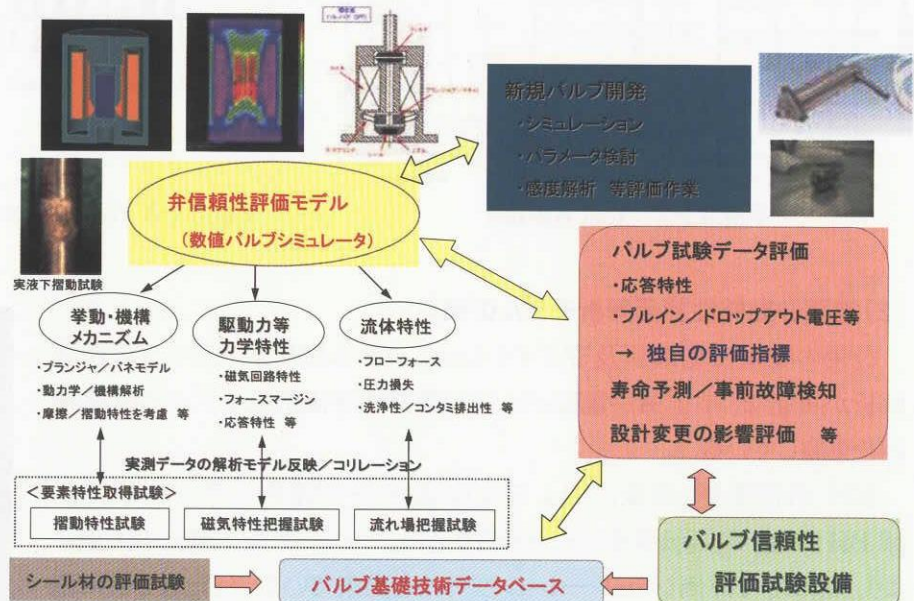


Fig.2-1 Overview image of our study

3. 成果の概要

3.1 バルブ信頼性向上のための研究

平成 15 年度は、推薬弁を対象として、一種ブラックボックスである輸入品バルブの健全性評価、故障検知を可能とする評価指標、解析ツールの検討を実施した。

(1) バルブ健全性評価手法の構築検討

推薬弁内部駆動体(プランジャ)の動作・挙動を取得可能な動特性把握試験装置(Fig.3.1-1)を用いて、駆動電流波形他との関係を取得した。

また異物噛み込み等によるスローク制限、バネ異材組込み等による外力異常、摺動部の摩擦力増大異常といった主要故障モードを意図的に内在させ、その検知可否、要因識別手法の検討を実施、健全性判定のクライテリアを得ている。(試験結果の一例を Fig.3.1-2 に示す)

さらに基準正常電流波形からのばらつきを定量的(マハラノビス距離)に評価することによる、推薬弁の状態(健全性)評価を試行した。(評価結果を Fig.3.1-3 に示す)基準正常波形の定義/取得、判断クライテリアの詳細設定等になお検討課題を残すものの、ブラックボックスとしての推薬弁に対しても、本手法による1次健全性評価、また電流波形処理値の詳細検討による異常モード特定の実現可能性が確認できた。輸入バルブ等の独自指標による評価、健全性等の詳細トレンド評価、不具合発生時の原因推定に大きく貢献出来るものと期待している。

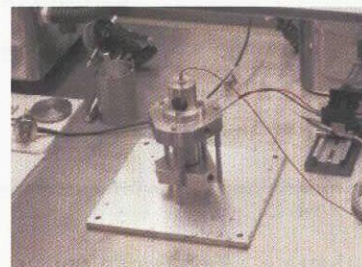


Fig.3.1-1 Valve test unit

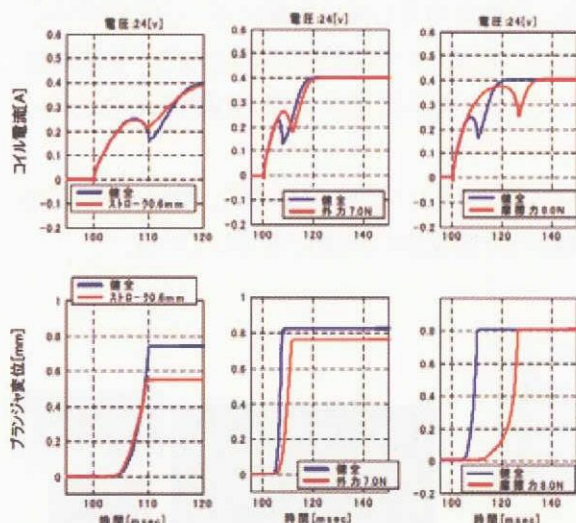


Fig.3.1-2 Test results

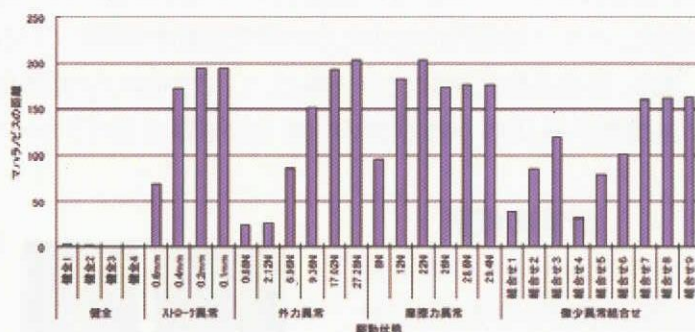


Fig.3.1-3 Evaluation of Mahalanobis distance

(2) 推薬弁動特性評価解析モデルの検討

汎用の動電磁場解析及びダイナミクスシステム解析ソフトウェアの連成解析が可能な、宇宙機用電磁バルブの動特性評価解析モデルの構築検討を実施している。

20N 級推薬弁を対象に、14 年度作成のベース解析モデルに対し、詳細 BH 特性、電気伝導率データの取り込み、かつモデル詳細化の実施により、高精度な評価シミュレーションツールと出来ている。(Fig.3.1-4 に磁場解析結果の例) 弁閉時のプランジャ衝突挙動他に、なお改善の余地を残すが、弁特性把握の上では充分な評価ツールと出来た。

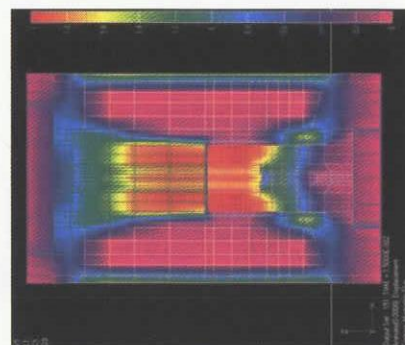


Fig.3.1-4 Electromagnetic field analysis of 20N valve

3.2 20N 級推薬弁の国産開発

平成15年度より、重要部品として20N級推薬弁の国産開発に着手している。当該バルブは、周回、静止衛星を問わず一定の需要が見込めるものであるが、世界的に見ても1米国業者の寡占市場であり、不測事態での不十分な対応、技術情報の開示制限等、国内衛星開発における自立性を脅かすキーコンポーネントのひとつである。またJAXAのバルブ信頼性向上研究を通じて、その評価手法・技術データ取得試験を行ってきており、開発に移行するに十分な素地が出来ていることから選定したものである。

平成15年度作業として、実際のユーザとなる衛星システムメーカ2社、推進系サブシステムメーカ2社及びバルブ製造メーカ2社に対して、仕様に対する要望、開発時に問題となる課題、他のコメント聞き取り調査を実施した上で、作動・寿命特性の向上、耐機械・熱環境特性の向上等を重点検討開発仕様として設定し、より扱いやすく、高信頼性でロバストなバルブとすることを目指している。

また、目標仕様を実現するための推薬弁構造様式の概念検討を実施し、設計的に難しい摺動部がなく、作動寿命の飛躍的向上が見込める、内部コンタミ発生の可能性がない、弁駆動体を軽く設計できることから耐機械環境特性の向上が望める及び駆動力を小さく出来るため製品トータルの小型／軽量化が望めるサスペンディッド・アーマチャ型推薬弁を開発のベースとして採用することとした。

スプリング・アーマチャ部が本構造様式におけるクリティカル要素と識別できることから、基本スプリング形状の要素試作をフォトエッチ／ケミカルミリング、レーザーカット等の各種加工技術で試行するとともに、機械環境の耐性向上を目指した高剛性型アーマチャ部の試作・評価試験を実施することで、内在する開発課題、リスクの早期洗い出しを実施した。

本推薬弁の設計・開発にあたっては、設計・製造の厳しい想定範囲をわずかに逸脱しただけで、即座に製品が著しい性能低下を起こす(トラブルを引き起こす)従来の手法を見直すこと、すなわち品質工学的手法、最適化設計及びCAE／コンピュータシミュレーション技法等の連動を十分に考慮した、源流段階での品質作り込みに留意を払っている。さらに複数個の供試体による開発／認定試験及び限界性把握試験の計画により、製品バラツキの把握をも念頭においた開発計画としている。

次年度においては、推薬弁設計の確定、開発試験供試体の製作及び基礎特性取得試験まで実施することで、平成18年度中の開発完了を目指している。

昨今の推薬弁リコール問題の余韻もあり、世界的にセカンドソースとしての潜在需要が見込める、要望が高まっていることから、海外スラスタとの各種インタフェースを開発時から考慮することで、本推薬弁が十分な受け皿となりうるものと期待できる。

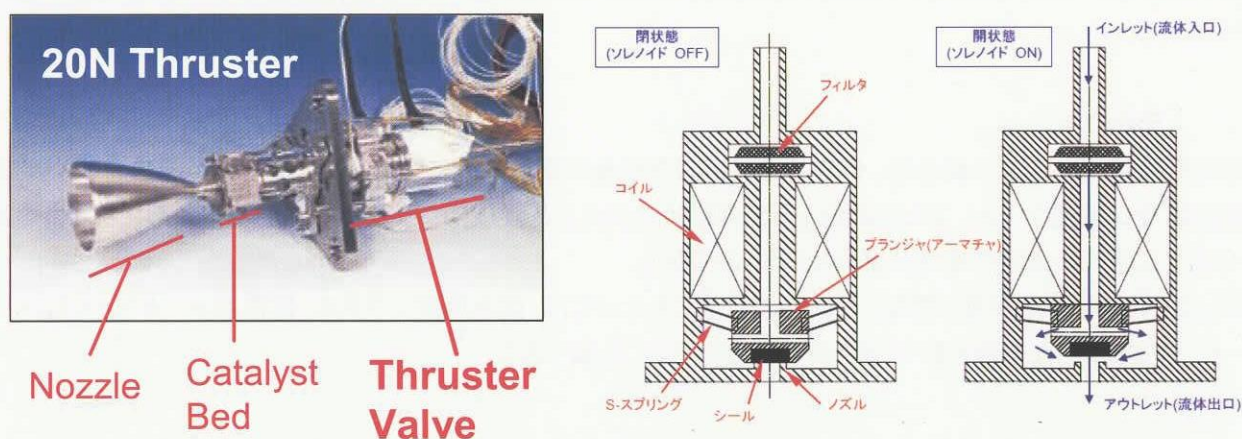


Fig.3.2-1 Outline view of 20N thruster and cross-section diagram of suspended armature valve

3.3 遮断弁の逆圧リリーフ機能付加

既存国産認定部品である#4遮断弁に対して、運用性、利便性向上を目的とした逆圧リリーフ機能付加のための設計改修に着手している。(Fig.3.3-1 に対象となる遮断弁を示す)

現状の設計においても、弁下流から逆圧が負荷されれば自然とリリーフされる構造ではあるものの、そのクラッキング圧力範囲が仕様として規定されていず、弁の使用範囲に制限を受けるものとなっていた。

平成 15 年度においては、まず、逆圧リリーフ機能を付加するための方策トレードオフ検討を実施し、ノズル流路面積の変更により、逆圧受圧面積を大きくとり、シートを逆流方向へ押す力を増加させる対処案が、既存インタフェース(取付寸法、サイズ等)の変更が無い、既存の生産手順/試験方法がそのまま使用可能、再認定試験が不要(部分 QT のみで対応可能)であることから、限られた期間/開発コストの中で取りうる最善の方策と判断し、検討のベースラインとして設定した。

また、逆圧クラッキング圧力のバラツキ低減を目標とした、過去の製造・加工データの再整理による実力値把握、逆圧値に及ぼすパラメータ影響評価を実施するとともに、最新・最適加工技術/検査技術の適用可否検討を併せて実施するとともに、ノズル部の要素試作を通じて潜在する技術課題の識別に努めた。

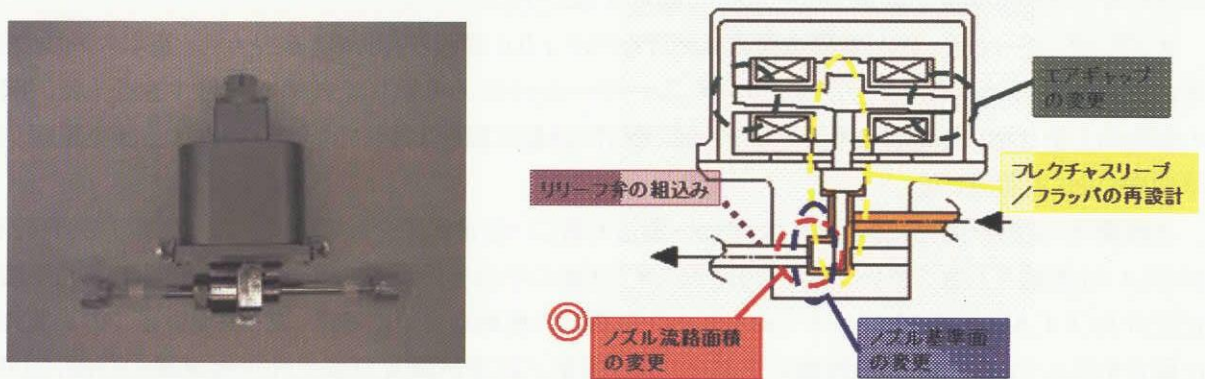


Fig.3.3-1 Outline view of Latching valve and trade-off study for back-pressure relief

逆圧リリーフ時の物理事象(微視的なシール/ノズル部接触状態の変化)の把握が複雑で、この挙動がバルブシステムとしての逆圧値評価を難しく、かつ性能のばらつきを大きく支配していることが確認できている。本件はバルブの静特性を左右する基盤技術として信頼性向上研究の中に取り組んでいく考えである。

次年度においては、改修設計の確定、追加認定試験用供試体の製作及び基礎特性取得試験を実施する計画としている。

4. まとめ

衛星推進系用バルブの健全性、内在する異常の兆候検知を定量的に評価可能とする我が国独自のバルブ評価指標及び関連ツール、また信頼性向上を側面から支える基盤技術データベースが着実に形になりつつあり、今後も本研究の確実な推進が求められるものである。

また、20N 級推進弁の国産開発、遮断弁の改修のあたっては、国内衛星システム、推進系メーカといったユーザーと、適宜、緊密な連絡を取りながら開発推進していく計画である。