

A09 イプシロンロケット上段モータ注型後の超音波探傷検査の適用

○今井濟 (株式会社 IHI エアロスペース), 佐藤明良,
Wataru IMAI (IHI Aerospace Co., Ltd), Akiyoshi SATO
佐藤英一(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)
Eiichi SATO (Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science)

1. 緒言

固体ロケットモータとは固体推進薬を燃料としたロケットであり、日本では科学衛星打上げ用として全段固体ロケットである M-V ロケットや、観測ロケットである S-310 ロケットや S-520 ロケットなどがある。その中でも、イプシロンロケットは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が高性能と低コストの両立を目指し、研究・開発を進めている新型の全段固体燃料のロケットで、2013年9月に試験機, 2016年12月に2号機, 2018年1月に3号機の打ち上げに成功している。

図1にイプシロンロケットの構成を示す。1段目に H-IIA/ H-IIB ロケット用補助ブースター (SRB-A) を活用し、上段モータとして、2段目と3段目には M-V ロケットの上段モータをそれぞれ改良し使用している。

これらの固体ロケットモータは、打上げ前までに動作確認を実施することができないため、想定される故障要因に対して、次のような確認により、製品の健全性を保証している。

- (1) 原材料管理や製造工程管理および製品の一部から試験片を切り出して行う間接的な製品確認
- (2) 製造段階での耐圧検査、非破壊検査等の直接的な製品確認

固体ロケットモータの推進薬注型後の非破壊検査は、放射線透過検査による直接的な検査が一般的である。大型固体ロケットの放射線透過検査は、高エネルギーの加速器や放射線を遮蔽する建屋の初期投資、設備や放射線管理の維持にかかる費用が高額になる。著者らは、これまで、観測ロケット S-310/S-520 等の金属製モータに対して、超音波を用いた低コストな非破壊検査手法を開発してきた¹⁾。イプシロンロケットに対しても、より低コストな非破壊検査手法への移行を目指している。

以下に推進薬注型後の上段モータに対して適用した非破壊検査手法について報告する。

2. 上段モータの製品保証方法

固体ロケットモータは、圧力容器となるモータケース、燃焼ガスに対する断熱材となるゴム製のインシュレータ、燃料である推進薬から構成される。イプシロンロケット上段モータ (2段および3段モータ) の製品保証は、表1および図2に示す欠陥モードについて検査する。なお、はく離欠陥は、インシュレータ~モータケース間の検査をモータケース製造時に実施し、推進薬~インシュレータ間の検査は推進薬注型後に実施している。

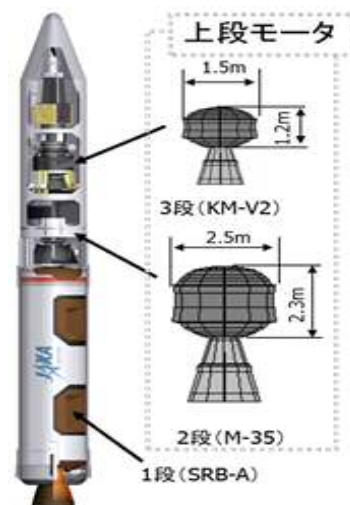


図1 Epsilon rocket

推進薬注型後の上段モータの製品保証を行うにあたり、地上燃焼試験モータおよび試験機を開発号機、ロケットモータ量産フェーズを運用号機と定義する。これまでの固体ロケットの製品保証は、開発号機で設定した保証方法を運用号機においても継続して実施してきたが、イプシロンロケットでは、運用号機で低コスト化をめざし、保証方法を以下のように設定した。

表1に示すように開発号機では、設計通りに製造されていることおよび想定外の事象が発生していないことを検証するために、すべての欠陥モードの検査を実施する。運用号機では、開発段階で確定した製造工程が維持されていることを検証するために、検査領域をはく離欠陥に限定し、検査を実施する。

表1 Critical factor of solid rocket motor

| 欠陥モード | | 故障モード | 検査方法 | |
|-------|----------------|-----------------------|-------|-------|
| | | | 開発号機 | 運用号機 |
| 内部欠陥 | ボイド | 燃焼面積増加に伴う内圧上昇とモータの破壊 | 非破壊検査 | 工程保証 |
| | 異物 | | 目視検査 | 目視検査 |
| | クラック | | | |
| はく離欠陥 | 推進薬～インシュレータ | 燃焼ガス流出に伴うケース損傷とモータの破壊 | 非破壊検査 | 非破壊検査 |
| | インシュレータ～モータケース | | | |

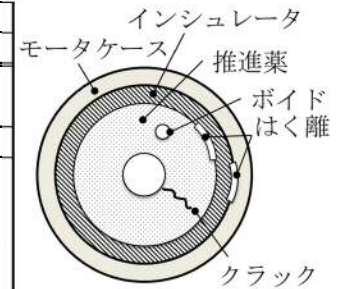


図2 Critical flaw

3. 推進薬注型後の上段モータの非破壊検査

初号機では、2段および3段モータを開発号機として放射線透過検査ですべての欠陥モードを保証した。より低コストな検査手法の開発という位置づけで超音波探傷試験を実施した。2号機以降は超音波探傷検査で製品保証を実施する計画であったが、打ち上げ能力向上のために2段モータを大型化する設計変更があり、以下のように計画を変更した。

2段モータは、その大型化に伴い、モータケース外表面にロケット飛行時の耐熱対策として、熱防御材であるコルクを施工する仕様となった。そのため、開発号機という位置づけで初号機および地上燃焼試験機に対し、放射線透過検査で全領域を保証した。また、運用号機でも超音波探傷検査の適用に制約があることから、放射線透過検査（γ線）で、はく離欠陥を中心とし、製品を保証する。

3段モータは、初号機から変更がないため、当初の計画通り、超音波探傷検査ではく離欠陥を中心として検査を実施する。

推進薬注型後の上段モータの開発号機から運用号機までに適用する非破壊検査手法を表2に示す。

表2 NDI methods of upper stage motor

| | | 区分 | 非破壊検査手法 |
|-----------|-------------------|----|----------------------|
| 初号機 | 2段モータ | 開発 | 放射線透過検査（X線） |
| | 3段モータ | | |
| 2号機 | 強化型 2段モータ | 開発 | 放射線透過検査 （X線およびγ線） |
| | 地上燃焼試験機 強化型初号機 | | |
| | 3段モータ | 運用 | 超音波探傷検査 |
| 3号機 以降 | 2段モータ（強化型） | 運用 | 放射線透過検査（γ線） |
| | 3段モータ | 運用 | 超音波探傷検査 |

3. 1 超音波探傷検査

超音波探傷検査は、送信探触子をロケットモータ内孔に配置し、ロケットモータを透過した超音波を外表面で受信する透過法を適用した。

推進薬は、酸化剤の微粒子がポリママトリックス中に分散されており、超音波の透過波は著しく減衰する。固体ロケットモータに超音波探傷検査を適用する場合、図3に示すような推進薬の減衰特性から、上段モータの透過距離を考慮し、送信探触子の中心周波数を0.1MHz以下とした²⁾。受信探触子は、図4の民生品などに使われる中心周波数0.04MHzの防滴型空中伝播超音波センサおよびMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) シリコンマイクを選定した。なお、インライン検査への適用を目指すため、広い領域を同時に探傷できる多チャンネル接触式（以下「広域アレイプローブ」という）と狭い空間に配置できる非接触式（以下「狭空間アレイプローブ」という）の受信探触子を開発した。

また、モータケース外表面に高い減衰特性を持つコルクが施工されると、さらに超音波が減衰し、透過しないことが考えられる。

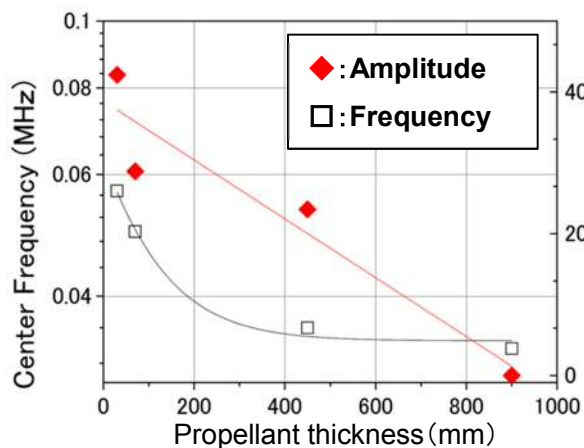


図3 Received intensity and center frequency

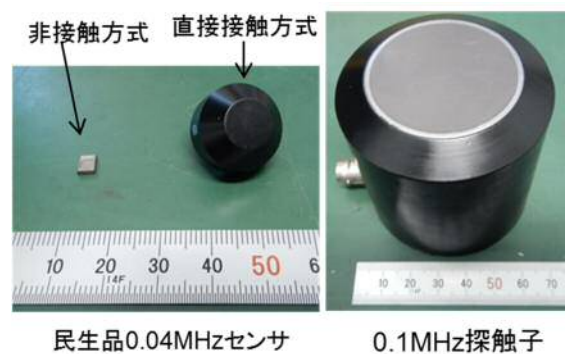


図4 low-frequency transducer

4. 実機適用結果

4. 1 3段モータの超音波探傷検査

運用号機では、透過法を用いて推進薬～インシュレータ間の界面はく離を中心に検査を実施した。受信側探触子は、図5に示すとおり、検査部位に応じて広域アレイプローブおよび狭空間アレイプローブを使用した。推進薬内部での超音波の広がりを利用して、送信探触子1ポイントにつき外表面300mmの広範囲検査を実施した。代表波形を図6に示す。判定は、健全部位の超音波透過強度の6dBドロップを判定基準として検査を実施した。

実機モータに対し、超音波探傷検査を適用することによって同一欠陥を対象とした放射線透過検査と比べ検査時間が2/3に低減され、低コスト化が図られた。

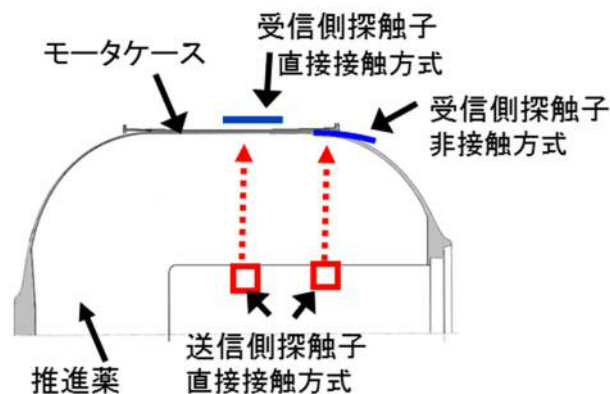


図5 Inspection section

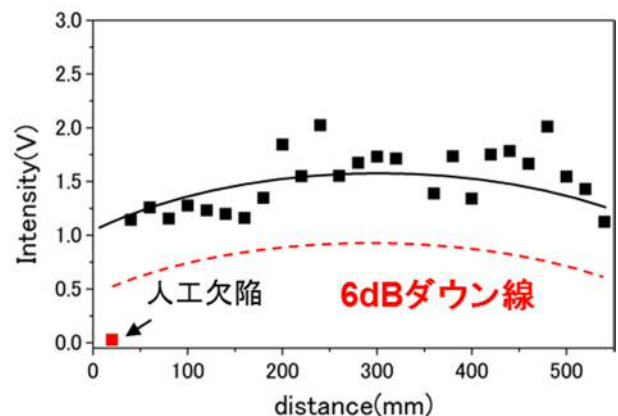


図6 Transmission intensity

4. 2 2段モータの超音波探傷試験

実機運用中のトラブル等でロケットモータの健全性を確認する必要がある場合、整備作業を実施する場所でも検査可能な非破壊検査として、超音波探傷検査の適用を検討している。2段モータには、高減衰材であるコルクが施工されているため、従来の透過法ではこれまで検査ができなかった。そこで、従来の送信する超音波探触子の中心周波数を下げるとともに、適切な信号処理によって透過強度を確保する検討を実施した。

透過法の適用結果を図7に示す。従来の探傷条件である、送信周波数0.1MHzでは透過波を受信できなかったが、適切な信号処理を行い送信周波数0.04MHzで探傷した結果、透過波を受信でき、超音波探傷検査が可能なSN比を確保できた。コルク貼付後のインシュレータ～推進薬界面の欠陥識別性について図8に示す。3段モータと同様に健全部の透過強度に対して6dB以上低下した人工欠陥を識別可能とすると、Φ37mmが識別可能であることがわかった。本検討により2段モータについても、検査部位が限定されるが、検査可能であると考えられる。

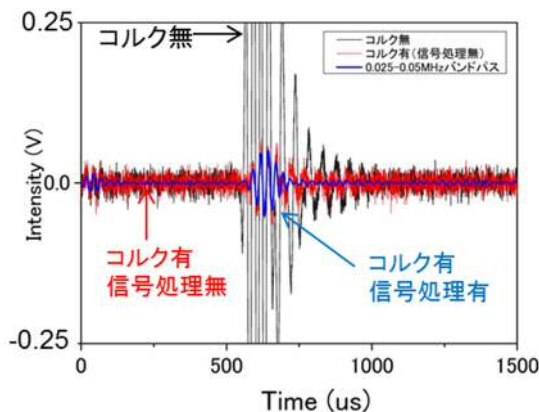


図7 Influence of ultrasonic Intensity by cork

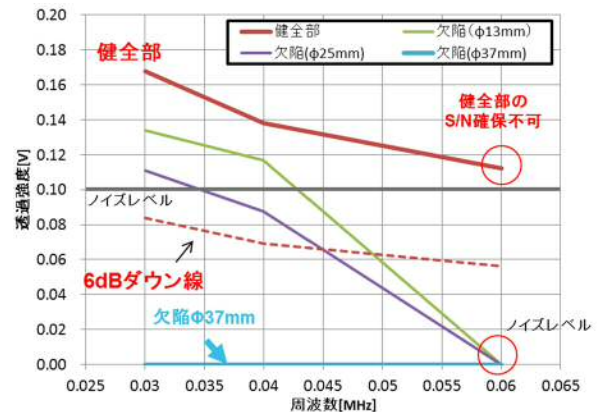


図8 defect identity

5. まとめと今後の展望

- ① イプシロンロケット上段モータに対し、開発号機と運用号機で異なる非破壊検査を適用し、運用号機において、2段モータはγ線透過検査、3段モータは超音波探傷検査で製品保証する手法を確立した。
- ② 2段モータは、モータトラブル時にモータ組立室等で適用できる超音波探傷試験として、検査技術を開発し、コルクを張り付けた状態でΦ37mmの欠陥識別性があることが確認された。
- ③ H-3ロケット開発に伴う、1段モータのSRB-3転用時に1段モータへ適用範囲の拡大を検討する。

(1) 湊将志, 山下清貴, 塩野秀幸, 佐藤明良, 佐藤英一: 固体ロケットモータの空気超音波による非破壊検査, 非破壊検査, (2010/3)

(2) 塩野秀幸, 山下清貴, 湊将志, 佐藤明良, 佐藤英一: 安全・安心な社会を築く先進非破壊計測技術シンポジウム, (2007/2)

(3) 湊将志, 山下清貴, 塩野秀幸, 佐藤明良, 佐藤英一: 観測ロケットモータ推進薬の非接触超音波による非破壊検査(2010/3)

(4) 今井済, 佐藤明良, 湊将志, 山添智, 赤松正孝, 佐藤英一: 推進薬注型後のイプシロンロケット上段モータの非破壊検査手法の開発, 安心・安全な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム (2016/3)