

3 不具合原因の推定

(1) 打上げ点近傍で収集した破片の分析

打上げ翌日（2月11日）に、打上げ点近傍の図-21に示す範囲で、図-22に示すような、破片約70点を収集した。破片の分析結果は下記のとおりである。

- ① 外観は黒鉛に似た黒色で、表面に白色ないし灰色の付着物が付いているものもある。
- ② 寸法は5mm角程度から最大40mm×35mm×7mmである。
- ③ 黒色部研磨面の偏光顕微鏡観察の結果、材料の粒度、結晶化度、および気孔の状態はM-14のグラファイトとほぼ同等である。（図-23）
- ④ 比重は1.786で、M-14のグラファイトの比重1.781に極めて近い。
- ⑤ 付着物の電子顕微鏡観察の結果、付着物は不定形であり、黒色部表面に溶射されたように見える。また付着物の表面には直径10μm程度の球状の粒子が散見される。（図-24）
- ⑥ 付着物のX線マイクロアナライザによる元素分析の結果、アルミニウム元素が主である。（図-25）

よって、当該破片はグラファイト製ノズルスロートインサート材で、付着物はモータ燃焼ガス中に含まれるアルミナが溶着したものであると断定できる。

(2) 打上げ直後の破片の飛散状況

ロケットは射点から東に向かって飛行するが、グラファイトの破片は射点より西側に測った距離で約16mの範囲まで見ついている。破片が放出されたと推定される時間について、破片の重量とノズルから放出される速度と角度を考慮して推算した。結果を表-3に示す。これより、破片が

西側 16 m 付近に到達したのは、打上げ後 4 秒以前であったと推定される。

(3) 搭載カメラ映像の分析

搭載カメラの取付位置と固定観測視野を図-26に示す。

同カメラで撮影された第1段モータの各秒時の静止画像を図-27、図-28及び図-29に示す。

映像の詳細解析によれば、打上げ後 25.0 秒付近と 38.5 秒付近で噴煙中に多数の小異物が放射状に噴出するのが認められる。また、41.5 秒付近で、機体角度で約 247 度方向に大きな異物が排出され、直後に数箇の小片に分割して飛散している。

(4) モータ内圧と機軸方向加速度の分析

図-29に対応する時刻と同期して、図-30に示すように、打上げ後 41.5 秒付近でモータ内圧測定値が約 13% 急減し、その後回復することなく 49 秒付近の定常燃焼期間終了を経て、緩やかに減少を続け、75 秒の 1/2 段分離に至っている。同図中の機軸方向加速度計測データも 41.5 秒付近で急減、第1段モータの内圧および推力が連動して予測値より減少したことを示している。

打上げ後 41.5 秒における機軸加速度の落ち込みは約 6.0% と読みとれる。このような挙動は、初期内径 745 mm のノズルスロートが瞬間的に約 8.4% 拡大した、すなわち、スロートインサート（グラファイト製）が破損して、脱落したものと考えるのが妥当である。また、計測値の予測値からの逸脱は、打上げ後 25.1 秒付近から始まり、38.5 秒と 41.5 秒に 2 段階で拡大している。映像が、これらの時刻に異物の吐き出しを記録していることから、グラファイトの破損によるスロート径の拡大は、段階的に進行していったものと推定される。

先に述べたとおり、打上げ後 55 秒を経過した時点から 61 秒にかけて飛行姿勢が上下方向に大きく変動している。このことは、スロートインサートの脱落の起きた 41.5 秒以降、ノズル噴流に曝されていた背面の CFRP（炭素繊維強化プラスチック）断熱材が焼損もしくはそれらの接合

面に侵入した高温の燃焼ガスによって合金鋼製のノズル支持部が溶損し、5 1. 6 秒に高温ガスの外部漏洩が始まり、0 度方向にあるピッチ制御のための駆動装置が焼損したものと考えられる。

(5) 不具合発生経過の推定

2 章及び (1) ~ (4) の分析から、不具合の主な発生経過は、下記のように推定される。また、破損の時系列分析の詳細については別添 1 にまとめる。

- ① 打上げ後 4 秒以前にスロートインサート（グラファイト製）の破損が始まった。
- ② 打上げ後 4 1. 5 秒付近でスロートインサートが完全に脱落し、推力が低下した。
- ③ 打上げ後 5 1. 6 秒付近で高温ガスの外部漏洩が始まった。
- ④ 打上げ後 5 3. 7 秒付近にピッチ制御系が焼損した。
- ⑤ 打上げ後 5 5 秒付近から姿勢が大きく乱れた。
- ⑥ 打上げ後 7 5 秒付近で第 1 段と第 2 段が分離された後、軌道の修正操作が行われたが、速度が十分回復できず、周回軌道への投入に失敗した。

4 スロートインサートの強度解析

スロートインサートの破損の原因を推定するために、強度解析を行った。スロートインサートへの熱入力の評価方法及び強度解析方法の詳細については別添2にまとめる。

(1) 有害な欠陥が存在しない場合の破壊確率の検討

設計余裕の検証を行うために、強度解析によって、有害な欠陥が存在しない場合の破壊確率の推定を行った。3章で述べたとおり、スロートインサートの破壊は打上げ後4秒以前に始まったことが判明しているため、打上げ後1秒と4秒の強度解析を行った。

解析結果を表-4に示す。この結果から、有害な欠陥が存在しない場合に打上げ後4秒以前に破壊する確率は0.3%以下であり、スロートインサートが設計余裕不足で打上げ直後に破壊した可能性は非常に小さいことが判った。

(2) 内部欠陥による破壊の検討

内部欠陥(注1)があったと仮定した場合に、燃焼中に確実に破壊に至ることのない最大の欠陥寸法(許容内部欠陥寸法)を評価した。M-14モータの燃焼初期から燃焼末期までの代表的な時刻(打上げ後1秒、4秒、10秒、20秒、30秒、40秒、47秒)について、スロートインサートの強度解析を行って応力を計算した。

計算結果を表-5に示す。許容内部欠陥寸法は打上げ後20秒付近まで減少し、その後ほぼ一定となった。スロートインサートが打上げ後4秒までに内部欠陥から破壊したと仮定すると直径4mm以上の欠陥が素材中に存在したこととなる。一方、スロートインサートが全燃焼時間において内部欠陥から破壊しないことを保証するためには、直径3mm以上の内部欠陥が素材中に存在しないことを確認する必要がある。

全燃焼時間における許容内部欠陥寸法の分布を図-31に示す。応力の厳しい領域はスロートインサートの上流外側から下流内側への対角線に沿

って広がっている。よって、直径3mm以上の内部欠陥の非破壊検査を行わなければならない領域は素材の中央付近まで広がっている。

(注1) 素材内部におけるき裂、空泡及び異物等の欠陥

(3) 表面き裂による破壊の検討

(2)と同様にして、表面き裂があったと仮定した場合の許容表面き裂深さを評価した。

計算結果を表-6に示す。打上げ後の秒時の進行とともに、圧縮応力の領域が広がるため、許容表面き裂深さは増加している。打上げ後4秒が最も許容き裂深さが小さく、3.0mm~4.6mmと計算された。すなわち、スロートインサートが燃焼中に表面き裂から破壊したと仮定すると深さ3mm以上の表面き裂が存在したはずである。

5 グラファイトの品質管理と非破壊検査能力

4章の強度解析において、スロートインサートが破損するためには、直径3mm以上の内部欠陥か深さ3mm以上の表面き裂がある必要があることが推定された。そこで、グラファイトの品質管理と非破壊検査能力について調査検討を行った。

(1) グラファイトの品質管理

これまでのグラファイトの品質管理と使用実績について、別添3にまとめる。製造過程におけるき裂等の有無の判断は、打音検査及び外観検査により行われていたが、3mm程度のき裂等を発見できるような非破壊検査は行われていなかった。

次に、4章の強度解析で用いた物性値の妥当性を検証するために、4号機のグラファイト残材及びM-14ノズルのスロートインサートについて、分解検査により物性値の取得を行った（詳細は別添4参照）。

結果として、物性値は設計時における想定より安全側の値であり、問題はなかった。

(2) 内部欠陥の非破壊検査能力

非破壊検査方式の詳細な検討結果を別添5に示す。

M-14のスロートインサートを検査することを想定すると、反射法においては厚さ400mm、透過法においては厚さ800mmに対して内部欠陥の検出限界が直径3mm以下である必要がある。

内部欠陥の検出能力が最も高い、収束探触子を用いた水浸反射法の超音波探傷検査を適用した場合、厚さ400mmに対する検出限界は直径3mmであった。しかし、全方向の割れを検出するためには超音波の入射方向に対して傾斜した欠陥を検出する必要があるが、この場合は検出能力がさらに低下する。

透過法であるX線探傷検査を使用した場合、グラファイトの透過厚さの2%程度が検出限界となるため、グラファイト素材では深さ800mmに

対して検出限界は直径16mm程度となる。

従って、検出能力の高い超音波探傷検査を用いても内部欠陥の検出能力は十分でないことから、M-14モータのグラファイト製スロートインサートにおいて直径3mmの内部欠陥を非破壊検査で検出することは現時点では困難と考えられる。

(3) 表面き裂の非破壊検査能力

別添5から、表面き裂に対して最も検出能力が高い非破壊検査方法は渦流探傷検査である。図-32に渦流探傷検査の概要を示す。

渦流探傷検査においては深さ0.2mm程度の表面き裂を検出できることから、M-14モータのグラファイト製スロートインサートにおいて深さ3mmの表面き裂を非破壊検査で検出することは可能である。

6 スロートインサート破損原因のF T A（故障の木解析）

以上の検討結果を踏まえたスロートインサート破損原因のF T Aを図－33に示す。

同図中の「過大負荷」における「推進薬異常」及び「異物衝突」における「推進薬」の可能性については、別添6に調査結果の概要をまとめる。

また、M－Vロケット4号機については、悪天候及び追跡地上系の不具合により、当初計画から2日遅れて打上げられたが、別添7に示すとおり、射場への輸送、射場での作業等において問題のないことを確認している。

内部欠陥の有無は打音検査で、表面き裂の有無は外観検査で確認されていたが、十分な検出能力が保証できないことから、今回のスロートインサート破損原因としては、次の2つの可能性について、最後まで否定することができない。

- ① 素材製造時から直径4 mm以上の内部欠陥があった可能性があり、これが原因でスロートインサートが破損した。
- ② 加工・組立時に深さ3 mm以上の表面き裂があった可能性があり、これが原因でスロートインサートが破損した。

Ⅲ 今後の対策等

1 M-Vロケットに対する対策を考える上での前提条件

検討の結果、今回の打上げ失敗は、打上げ後4秒までに第1段ロケットのスロートインサートの破壊が開始したことが契機となって発生したことが明らかとなった。また、スロートインサートの破壊は、耐熱性断熱材として用いられているグラファイトの内部欠陥又は表面き裂があったことが原因であったものと考えられる。欠陥の大きさについては、内部欠陥の場合は直径4mm以上、表面き裂の場合は深さ3mm以上であったものと推定される。

一方、全燃焼時間において破壊しないことを保証するためには、内部欠陥の場合は直径3mm以上、表面き裂の場合には深さ3mm以上の欠陥が存在しないことを確認する必要がある。

これに対し、先に述べたとおり、第1段ロケットに採用されているスロートインサートに対する非破壊検査能力は、表面き裂については渦流探傷検査により深さ0.2mm、内部欠陥については超音波探傷検査により探傷方向に垂直な欠陥の場合は直径3mmが検出限界であり、欠陥が探傷方向と角度を持つ場合は検出がさらに困難となることが判明している。従って、現在利用可能な非破壊検査技術を前提とすれば、M-Vロケットの第1段モータのスロートインサートに用いられているグラファイトにおいて、深さ3mmの表面き裂を検出することは可能であるが、直径3mmの内部欠陥を完全に検出することはできない。

2 M-Vロケットに対する今後の対策

このため、M-Vロケットに対してとるべき対策としては、次の3つが考えられ、この中から、宇宙科学研究所において、それらの対策が実現可能な時期や克服すべき課題などを総合的に鑑みて、最適な方法がとられることが必要である。

(1) 非破壊検査の能力の向上

この方法は、アレイ型の電子走査式超音波探傷システムの開発などにより、現状の非破壊検査の能力を向上させるものである。アレイ型の電子走査式超音波探傷システムについては、グラファイトにおいては、未だ開発途上であるが、金属材料においては開発が行われ、その有効性が確認されている。

これまで用いてきたスロートインサートの材質や設計をほとんど変更することなく利用できるというメリットがあるものの、非破壊検査技術の検出能力を所定のレベルまで実現できる時期に関する見通しが不透明である。

(2) 分割型のスロートインサートの採用

この方法は、グラファイトを分割することにより、燃焼ガスからの熱負荷によって生じる熱応力や歪みを緩和し、許容内部欠陥寸法を増大させるとともに、非破壊検査による内部欠陥の検出を容易とする。

米国においては、1960年代後半から研究が行われ、実際のロケットモータに採用された事例がある。この方法は、我が国でこれまで蓄積されたグラファイトに関する技術の多くを利用することが可能となる利点がある。しかし、グラファイトの間の継ぎ目部への燃焼ガスの浸透や浸食、グラファイトのブロック間の相互干渉などにより発生する応力や歪みなどについての詳細な解析が必要となる。

(3) 三次元カーボン・カーボン複合材製のスロートインサートの採用

この方法は、グラファイトを、強度が強くグラファイトに比べて遥かに大きな欠陥を許容できる材料である三次元カーボン・カーボン複合材料に置き換えるものである。

三次元カーボン・カーボン複合材は、アリアン5のサブブースタで実績があるとともに、我が国においても、宇宙開発事業団の開発しているSRB-A、宇宙科学研究所の開発しているM-Vロケットの5号機以降の第2段ロケットにおいて、採用が予定されている。しかし、カーボン・カーボン複合材は、繊維の配置される方向による異方性が大きい材料である。このため、設計にあたっては、異方性材料として応力解析を行った上で、