

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

---

## 固体推進薬スラリ流のX線可視化計測

嶋田 徹, 羽生 宏人, 清家誉志男  
大矢 清司, 宮地 英生, 石川 正明

2007 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency



# 固体推進薬スラリー流の X 線可視化計測

嶋田 徹<sup>\*1</sup> 羽生宏人<sup>\*1</sup> 清家誉志男<sup>\*2</sup>

大矢清司<sup>\*3</sup> 宮地英生<sup>\*4</sup> 石川正明<sup>\*5</sup>

## X-Ray Visualization Measurement of Slurry Flow in Solid Propellant Casting

By

Toru SHIMADA<sup>\*1</sup>, Hiroto HABU<sup>\*1</sup>, Yoshio SEIKE<sup>\*2</sup>,  
Seiji OOYA<sup>\*3</sup>, Hideo MIYACHI<sup>\*4</sup> and Masaaki ISHIKAWA<sup>\*5</sup>

**Abstract:** By employing X-ray photography and image analyses, internal three-dimensional flow field of a simulated solid propellant slurry containing lead sphere tracers is visualized in a double circular cylinder container. X-rays are projected on to the slurry flow from two directions perpendicular to each other and penetration images are recorded by a flat panel detector and an X-ray image intensifier. By suppressing the mutual interference of the X-rays, the two-directional X-ray photography has been successfully conducted. Using the time series data of the X-ray images from the two directions, the identification of each tracer particle in space and time has been done and their three-dimensional paths have been computed. From these procedures, the flow field or the velocity field inside the opaque slurry flow has been estimated.

**Keywords:** Process tomography; Solid propellant casting; Slurry flow; X-ray penetration photography; Particle tracking velocimetry

### 概 要

X 線撮影と画像解析を用いて、鉛玉トレーサを含む模擬固体推進薬スラリーの二重円筒内部三次元流れ場を可視化した。X 線を互いに直角な二方向から供試体に投影し、透過 X 線をフラットパネル検知器と X 線イメージインテンシファイアを用いてビデオに記録した。X 線の相互干渉を抑制することによって、二方向同時撮影が良好に行われた。二方向 X 線像の時系列画像データから各トレーサ粒子の空間及び時間的な識別を行い、更に校正用マーカー情報を用いた座標変換を行うことで、トレーサ粒子の刻々の三次元実座標を算出した。これらの手順によって、通常では見ることでできないスラリー流内部の流れ場を可視化し、さらに速度場の推算を行った。

---

\* 1 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

\* 2 日本油脂株式会社 研究開発部

\* 3 (株)日立エンジニアリング・アンド・サービス プラント本部

\* 4 株式会社ケイ・ジー・ティー ビジュアルゼーション事業部

\* 5 琉球大学 工学部



## 1. 緒 言

通常、固体ロケットモータ（SRM）の推力量制御は、燃焼状況に応じて行う適合制御ではなく、推進薬グレイン形状を事前に設計して行う計画的な制御である。この推力履歴は、推進薬の燃焼速度特性を把握し、初期グレイン形状を選定し、スロート直径のエロージョンによる変動を考慮したうえで、ノミナルな燃焼圧力履歴として計画される。燃焼圧力履歴はしばしば弾道性能（ballistic performance）或いは弾道特性（ballistic characteristics）と呼ばれる。新規開発のSRMの弾道性能が計画どおりであるかどうかは、実機サイズモータを地上燃焼試験に供することによって確認される。現状の技術レベルでは、これを数値解析や小型モータの燃焼試験に代替させることはできない。

衛星打上げ用ロケットに用いられるコンポジット推進薬の製造過程の概略はつぎのようである。推進薬の原料成分の9割弱は酸化剤粒子と金属燃料粒子からなる固体成分で、残りは燃料でバインダでもある液体（ポリマー）である。これらの原料をミキサーで混合してスラリー状にしたものを中子に入ったモータケースに充填する。モータケース内面には通常断熱材（インシュレーション）が施工されている。この際、ケース内を真空にし、全体を保温する。酸化剤には過塩素酸アンモニウム（AP）が、金属燃料にはアルミニウム（Al）がよく用いられる。またバインダには、末端水酸基ポリブタジエン（HTPB）が用いられる。モータケースに注型された推進薬スラリーは温度を維持したまま保持され、ポリブタジエンの架橋反応の進行によって硬化する。硬化後、中子を取り除かれ、その後機械加工を経てモータが完成する。モータはノズルと結合され、固体ロケットモータとして完成する。地上燃焼試験では、完成したモータを燃焼スタンドに設置し、推力、圧力、温度、振動、歪、音響、光学などの計測機器を接続し、点火モータを用いて燃焼させる。モータの弾道特性は、燃焼室圧力を時系列に測定することによって得られる。図1に固体ロケットモータ製造過程と弾道特性の関係について模式的に示す。

さて、現実にはモータの弾道特性が計画どおりにならないことがある。それらを弾道特性異常（Ballistic anomaly）と呼ぶことにする。弾道特性異常は様々な原因で起きる。主たる原因として、振動燃焼、浸食燃焼、推進薬中の酸化剤粒子の偏析や整列（アラインメント）、推進薬中の欠陥・気泡混入、インシュレーション／推進薬の接着剥離などがある。振動燃焼とは、固体推進薬の燃焼表面への熱フィードバックによる燃焼速度変動を加振源とし、ノズル入り口減衰、粒子-気体干渉による減衰、フローターニングと呼ばれる回転流効果による減衰などに支配される系がなす燃焼室内音響圧力振動である。浸食燃焼は燃焼面に沿う方向の流速（流量）増に伴う乱流拡散の増加によって、推進薬表面への熱フィードバックが高まり、燃焼速度を増加させる現象である。両者はモータ系として起きる弾道特性異常であって、直接的に推進薬に起因

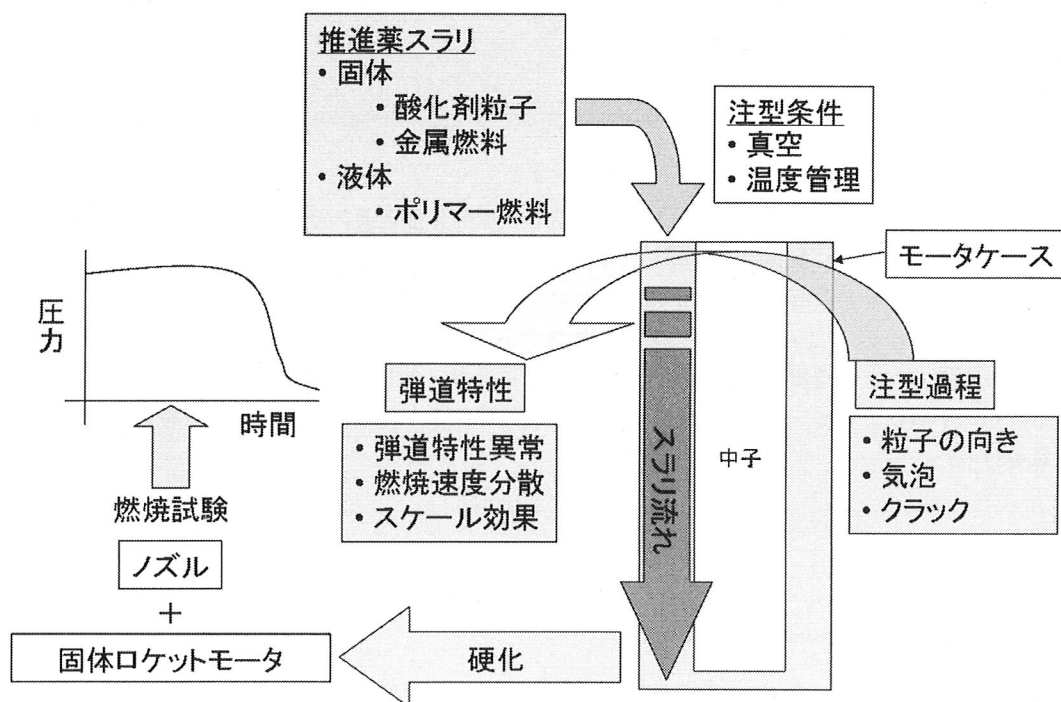


図1 固体ロケットモータ製造過程と弾道特性

するわけではない。一方、酸化剤の偏析・整列や、欠陥・気泡混入による弾道特性異常は、直接推進薬の出来具合に起因するものである。この種の弾道特性異常の例を図2に示す。この例でモータは丸孔内面と両端に燃焼面を有する。計画された圧力履歴（predicted）は比較的フラットな特性であるが、実際に燃焼させると、燃焼初期と末期には計画より低い圧力で、燃焼中期に計画に比べて顕著に高い値を示すのがこの異常の特徴である。推進薬ウェブの厚み中央付近で高い燃焼速度を示すことが直接の原因であるため、“Mid-Web Anomaly” 或いは“hump 効果”として知られている<sup>1)</sup>。この異常の主たる原因は、推進薬に含まれる酸化剤粒子が球体ではない場合にスラリ注型時の流れの速度分布によるせん断力によって、酸化剤粒子の向き（姿勢）が揃えられることが主たる原因であるとする説が有力である<sup>2)</sup>。燃焼面から熱が内部に伝わってくるとき、酸化剤の向きによって伝熱効果が異なり、局所的な燃焼速度が影響されると考えられており、実際の推進薬を切り出しての燃焼速度測定や、注型時スラリ流れの層流状態観察などが行われている<sup>4)</sup>。

また、相似形状で小型のロケットを製作し、実機サイズのモータの弾道特性予測を試みても、注型時のスラリ流れまでを相似に作成することは容易ではない。このためスケールが異なると弾道特性が変化することが知られており、“スケール・ファクター”と呼ばれている。

全く別の問題として大型固体ブースタの推力アンバランスの問題がある。大型固体ブースタの推進薬注型においては、ミキサー容量の制約のため、注型を複数回のバッチに分けて行う。バッチ毎のスラリ特性のバラツキや、バッチ間の界面に作用する物理過程のために、やはり燃焼速度の局所的な変動が起こる。特に大型固体ブースタを複数本装着するような巨大なロケットシステムの場合には、特に燃焼末期において、ブースタ間の大きな推力アンバランスを引き起こす可能性が懸念される。

以上のように、注型時のスラリ流れの特性は固体ロケットの弾道特性に影響を及ぼすので、弾道性能計画の精度を高め、SRM 性能と信頼性をさらに改善するために、固体推進薬注型時のスラリの流れ場を十分に把握することが重要である。

上述の現象を理解して問題を解決するために、諸外国では推進薬の注型シミュレーションによってスラリの流れ場と硬化後の形状を把握し、その結果を用いて推進薬グレインの局所燃焼速度分布を与え、燃焼による推進薬の表面形状変形シミュレーションとスロートのアブレーション履歴評価を行うことによって、燃焼圧力を正確に予測するための研究開発が進められている<sup>5)</sup>。その際に重要な技術要素となるのが、自由界面を正確に捕捉するための技術やCFD 技術である。これらの解析手法の実用によって、推進薬グレイン設計の精度と自由度が改善し、固体ロケットモータ設計の最適化が進展す

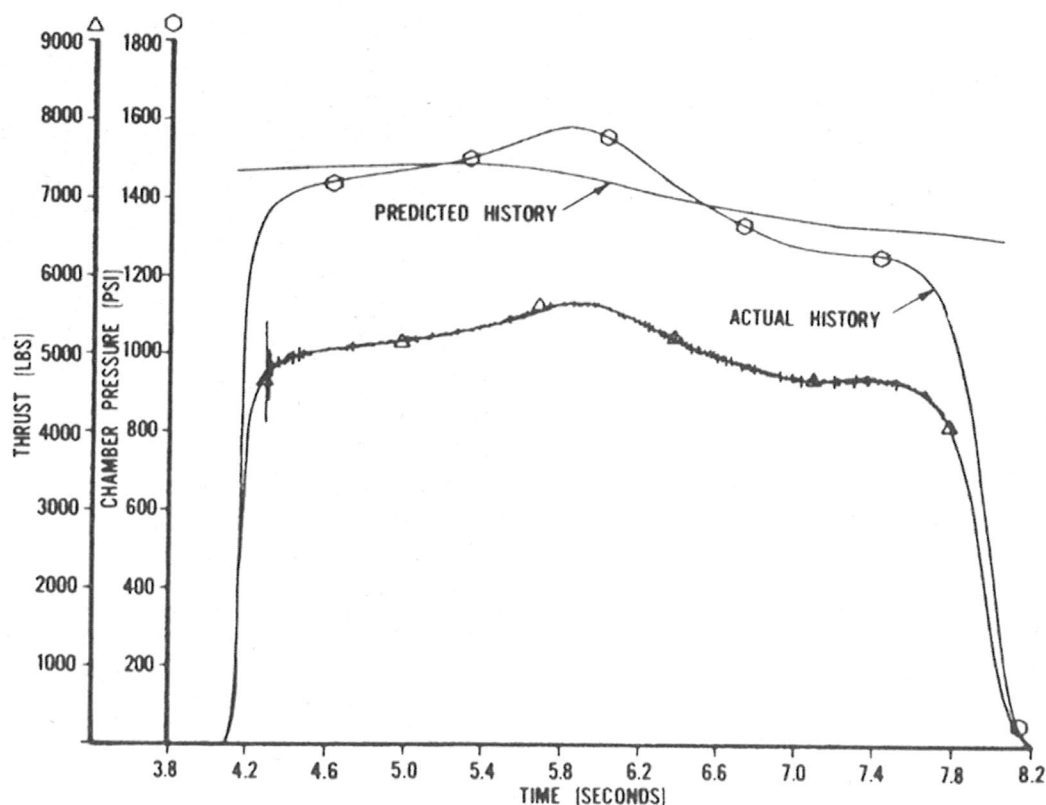


図2 Mid-web anomaly の例（出典：Beckman C. W. and Geisler, R.L., 1982, 文献<sup>1)</sup>）

ると考えられ、また間接的ではあるが、開発コスト削減にも寄与するものと期待される。

これらの数値シミュレーションの妥当性を検証するためには、推進薬注型におけるスラリ流の実験計測が不可欠である。しかし注型におけるスラリ流の内部の速度場を計測することは非常に困難といわざるをえない。それは推進薬スラリが通常不透明であることだけでなく、多量の粒子からなる混合物であることや、その流動が自由界面を伴う非定常な現象であることに拠る。著者らの知る限りにおいては、固体推進薬の注型時のスラリの流れ場に関して確立したデータベースは存在しない。

以上の背景の下、我々は概略以下のようにして模擬推進薬スラリを用いた注型実験を行い、内部の流れの可視化と可視化情報に基づく速度計測を試みた。まずスラリ内部を可視化するために、互いに直交する2方向からX線を投影し、スラリに含まれる鉛製のトレーサのビデオ画像を取得する。得られた2方向投射画像情報を合成し、キャリブレーション処理を経て、実座標での3次元データを復元する。さらに複数トレーサの軌跡データから内部の速度場を推定する。本報告ではこれらの内容を記述し、提案する可視化手法とデータ処理方法の有効性について述べる。

## 2. スラリ注型可視化実験

### 2.1. 実験装置

#### 2.1.1. 注型装置

実験に使用する推進薬にはトレーサとして金属球を練り込む必要があるため、安全性に配慮した模擬推進薬を使用する。酸化剤の代わりには、実物と同じ粒径、粒度配合で、ガラスビーズと塩化ビニル粉を使用する。過塩素酸アンモニウム（AP: Ammonium perchlorate）および物性改良剤以外の原材料は全て実推進薬と同じものを使用し、密度、粘度および粘度増加特性が実推進薬と同等となるようにバインダ量を調整する。

またバッチ間の界面状況を観察するため、1容器で2バッチのスラリを注型することとし、1層目と2層目のスラリは着色剤の有無により目視で区別できるようにする。

つぎに注型実験装置の概要を図3に示す。また実際の状況を図4に示す。

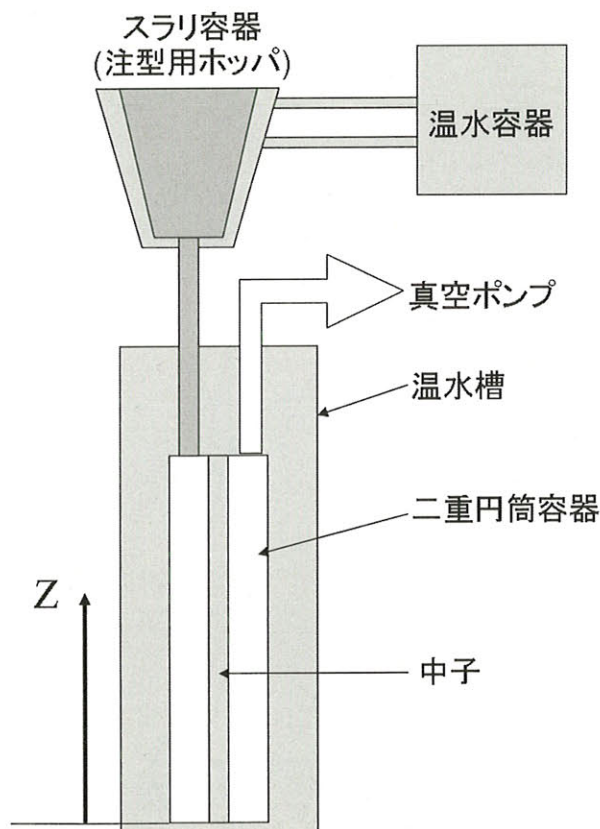


図3 注型実験装置概要

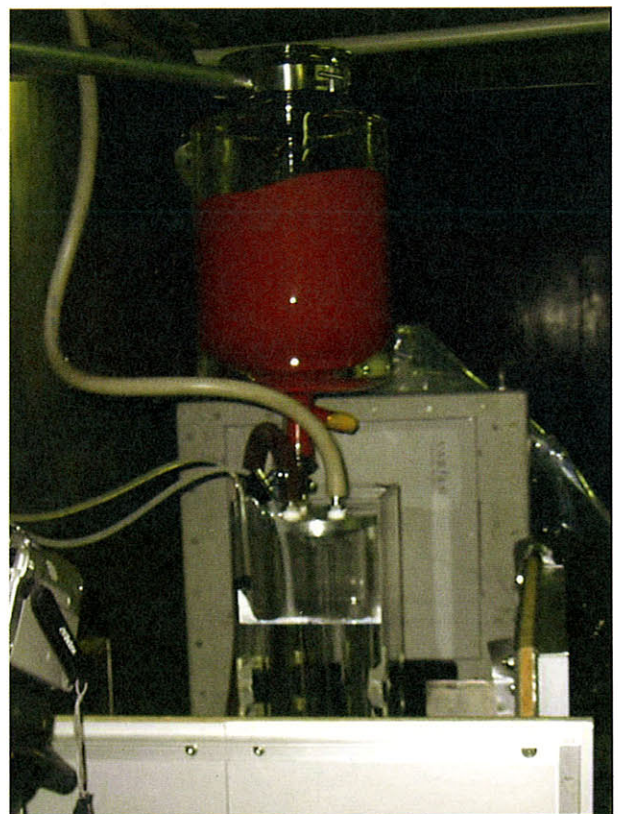


図4 注型実験装置

注型実験装置は実用ロケットの注型形態とできるだけ合わせるために、以下の仕様とする。

- 1) 容器内径と中子の外径の比を実用ロケットに合わせ、かつX線撮像に適当なサイズ(約1/25)とする。
- 2) 可視カメラにて確認ができるよう各容器を透明アクリル製とし、真空注型に耐えるよう、容器管厚を選定する。
- 3) ホッパは温水循環により保温できる形態とする。注型容器についても周囲を湯浴とし、浮き上がり防止のおもりを装着する。この湯浴はX線撮像に影響しない大きさとし、湯温は実用ロケットで一般的な60℃とする。

### 2.1.2. X線装置

X線撮像のために、X線発生装置を2台(非破壊検査用)と、フラットパネル検知器(FPD, バリアン PaxScan2520)とX線イメージインテンシファイア(XII, 東芝製9インチE5764 HV-P1K)の2種類のX線検知器を使用する。図5に示すように2組の発生器と検知器の対を相互に直角な方向に配置し、それぞれ同時にビデオ画像を取得する。X線のチューブ電圧は160 kV から170 kV とした。また、X線源からサンプルへの距離は1000 から1200 mm であり、サンプルから検知器までは300 mm とした。

### 2.2. 画像解析

画像解析の細部については参考文献[3]で議論されているので、ここでは概略を述べる。画像解析の概略の流れを図6に示す。

画像解析の手順は、以下のとおりである。

- 1) FPD と XII のそれぞれの検出器で出力された動画像を時系列の静止画像(ビットマップ)として得る。
- 2) 時系列の静止画像(ビットマップ)を用いて、目視によりトレーサ粒子の位置座標(ピクセル)を検出し、時間方向の粒子の同定を行う。(粒子位置検出と粒子追跡は目視で行った。)
- 3) 時系列でのトレーサ粒子の位置座標(ピクセル)は、各画像8点の較正用マーカーにより、X線が平行に照射されていると仮定し、縦横比(mm/pixel)により投影断面方向の実座標(mm)に変換した。以下に、各画像の中心座標、縦横比、および実座標の算出方法を示す。

各画像の8点の較正用マーカーによる中心座標は、以下のように、それぞれ $(x_{FP0}, y_{FP0})$ ,  $(x_{II0}, y_{II0})$ (単位:ピクセル)で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_{FP0} \\ y_{FP0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{FP1} + x_{FP2} + x_{FP3} + x_{FP4} + x_{FP5} + x_{FP6} + x_{FP7} + x_{FP8}}{8} \\ \frac{y_{FP1} + y_{FP2} + y_{FP3} + y_{FP4} + y_{FP5} + y_{FP6} + y_{FP7} + y_{FP8}}{8} \end{pmatrix} \quad (1)$$

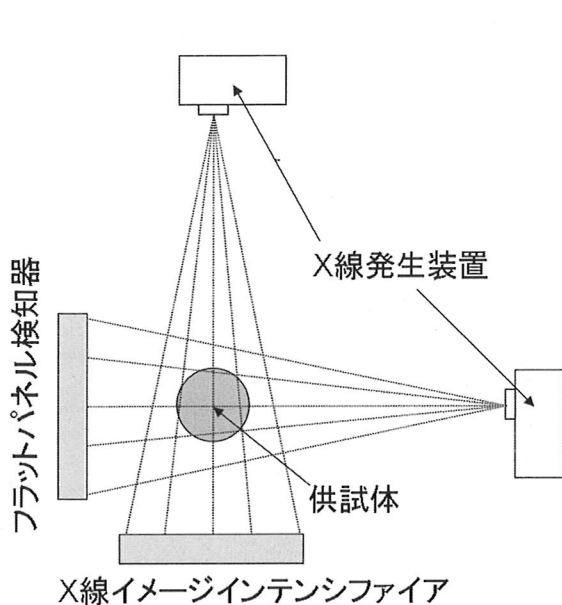


図5 X線撮像の概略

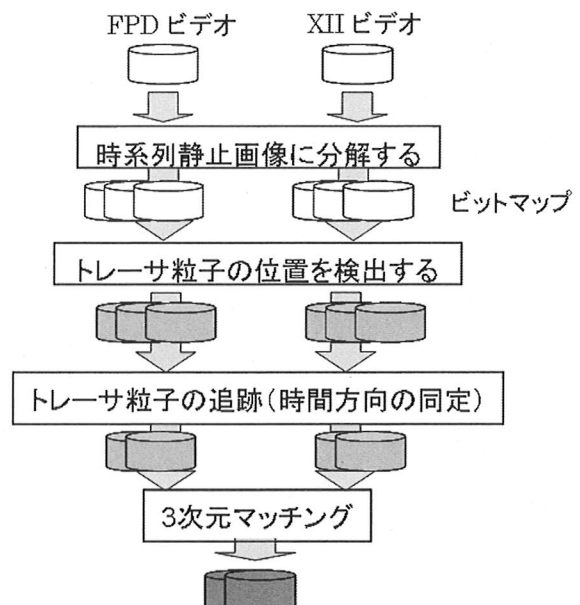


図6 画像解析の概略

$$\begin{pmatrix} x_{H0} \\ y_{H0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{H1} + x_{H2} + x_{H3} + x_{H4} + x_{H5} + x_{H6} + x_{H7} + x_{H8}}{8} \\ \frac{y_{H1} + y_{H2} + y_{H3} + y_{H4} + y_{H5} + y_{H6} + y_{H7} + y_{H8}}{8} \end{pmatrix} \quad (2)$$

また、それぞれの画像の縦横比（単位：mm/ピクセル）は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} k_{Hx} \\ k_{Hy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{130}{50} \left( \frac{x_{H2} + x_{H3} + x_{H6} + x_{H7}}{4} - \frac{x_{H1} + x_{H4} + x_{H5} + x_{H8}}{4} \right) \\ \left( \frac{y_{H3} + y_{H4} + y_{H7} + y_{H8}}{4} - \frac{y_{H1} + y_{H2} + y_{H5} + y_{H6}}{4} \right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} k_{FPx} \\ k_{FPy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{130}{50} \left( \frac{x_{FP2} + x_{FP3} + x_{FP6} + x_{FP7}}{4} - \frac{x_{FP1} + x_{FP4} + x_{FP5} + x_{FP8}}{4} \right) \\ \left( \frac{y_{FP3} + y_{FP4} + y_{FP7} + y_{FP8}}{4} - \frac{y_{FP1} + y_{FP2} + y_{FP5} + y_{FP6}}{4} \right) \end{pmatrix} \quad (4)$$

2 バッチ目の画像の中心の実際の位置座標  $(X_{Po}, Y_{Po}, Z_{Po}) = (0, 0, 1250)$  (mm) より、それぞれの位置座標は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} X_{FP} \\ Y_{FP} \\ Z_{FP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{FPx} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_{FPy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{FP} - x_{FP0} \\ y_{FP} - y_{FP0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{Po} \\ Y_{Po} \\ Z_{Po} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k_{Hx} & 0 \\ 0 & k_{Hy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_H - x_{H0} \\ y_H - y_{H0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{Po} \\ Y_{Po} \\ Z_{Po} \end{pmatrix} \quad (6)$$

FPD と XII の二画像間の粒子の同定は、注入時刻が同時刻のものでペアマッチングを行うが、複数個のトレーサ粒子が同時に注入された場合、時系列情報を利用し、次の手順の3次元位置座標で求めたZ方向の高さの誤差が最小となるもので同定を行った。

ペアマッチングによって同定されたトレーサ粒子のFPD側の位置座標（式（5））とXII側の位置座標（式（6））を用いて、トレーサ粒子の3次元位置座標（mm）を求める。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{FP} \\ Y_H \\ (Z_{FP} + Z_H)/2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 模擬推進薬の注型

##### 3.1.1. 模擬推進薬の注型状況

1 容器の注型はスラリ2バッチの流し込みで1回とし、計2回を計画したが、1回目は注型ホoppaから注型容器までの流路およびバルブでスラリが冷えてしまい流し込むことができなかったため、放冷を抑えるためにバルブを取り外し、流路外部に保温材を巻き付けることで流し込みを完了することができた。

流し込み直後のスラリの状況を図7に示す。

容器に入ったスラリは“蟻局（とぐろ）”を巻くように積み重なっていった。注型時に巻き込んだ気泡は真空下の容器内で膨張し、水が沸騰するように脱泡されていた。これは実用ロケットの注型時と同様の現象であるが、トレーサ粒子が不自然な動きをする原因ともなり、スラリ挙動の追跡の障害ともなっている。積み重なったスラリは脱泡されながら中子を挟んで左右に広がり、一体化する様子が観察された。2層目のスラリも同様に積み重なっていったが、1層目のスラリを下



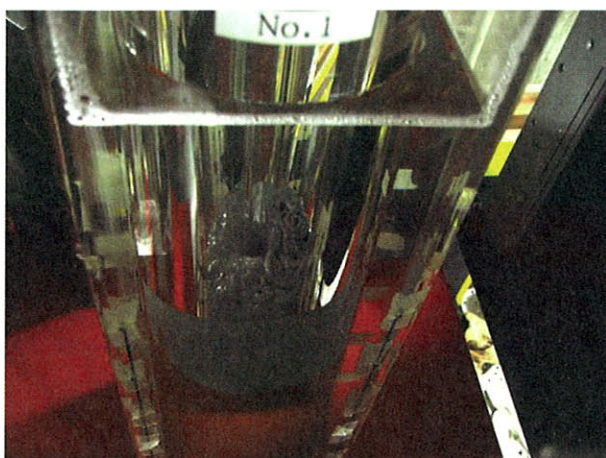


図7 流し込み直後のスラリの状況

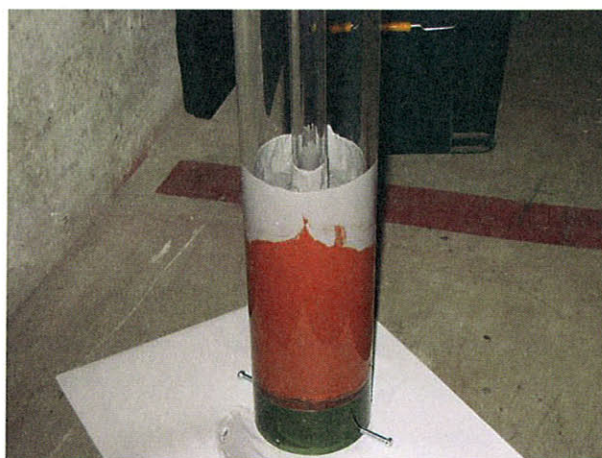


図8 注型終了後のバッチ境界の形状

表1 模擬推進薬の密度試験結果 (g/cm<sup>3</sup>)

| 試料No. | 下層用 (着色剤あり) | 上層用 (着色剤なし) |
|-------|-------------|-------------|
| 1     | 1.721       | 1.701       |
| 2     | 1.717       | 1.704       |
| 3     | 1.705       | 1.701       |
| 4     | 1.699       | 1.698       |
| 5     | 1.719       | 1.708       |
| 平均    | 1.712       | 1.702       |

層へやや押しのけるように流れ、注型口の反対側で、回り込んだスラリーが一体化し、山状の独特な形状となった(図8)。使用したスラリーの粘度測定の結果から、流動性は実用推進薬と同等であることがわかった。

### 3.1.2. 硬化後の状況

硬化は実用ロケットと同様に60℃で7日間実施した。硬化後の供試体は、外観では先述の“山状の独特な形状”を保持したまま硬化を終了していた。しかし、後日実施したCT画像からは、硬化期間中にトレーサ粒子が下方へ降りていることが判明した。注型直後なのか、硬化中のいつの段階で降りたのかは不明である。

スラリーを注型ホッパーへセッティングする際、容器近傍に温水が存在していたが、特に硬化の異常は認められなかった。

硬化後測定した密度試験結果を表1に示す。本実験に使用した模擬推進薬の密度は実用推進薬とほぼ同等であることがわかった。

## 3.2. FPDとXIIのX線画像

予備試験として、X線透過装置を2台同時に照射した場合にも正常な撮影が可能であることを確認し、映像的にも鉛玉の検出が容易であることを確認した。その際、スラリー中の鉛玉数は300個/5kgを選定した。この予備試験の中で、2方向撮像における散乱線の影響によって部分的なハレーションが生じることが分かったため、散乱線の影響を減らすために、X線検波器の側面にパーティションを設置すると共にX線発生装置のコリメータを延長し性能を改善した。

X線を照射した際のトレーサ粒子の良好なコントラストを得るために様々な候補物体を用いて確認試験を行った。候補として使用したのは、鉄玉、鉄片、鉛玉、鉛片、ワイヤ線などである。その結果、直径1mmの鉛玉がスラリー推進薬内の沈殿速度に悪影響を及ぼすことなく、良好なコントラストが取得できることを確認した。トレーサの直径選定のために、静止した模擬推進薬内にトレーサを置いて沈降速度を測定した。この測定から、直径1mmの鉛玉の場合、注型実験時間内の沈降量が直径程度であることが確認され、トレーサとして有効であることが確認された。同時に1mmの鉛玉のコントラストをスラリーに混ぜて滴下しX線撮影することによって確認した。スラリー滴下直後は、気泡によって容器内にまだら模様が形成され、鉛玉のコントラストが一部悪い状態もあったが、全体的な鉛玉のコントラストは良好であった。X線画像の典



型的な例を図9に示す。

今回の試験でFPDとXIIを使用することにより、デジタル値とアナログ値の差異がどの程度発生するものかを確認することができた。即ち、XII（アナログ）は、ゆがみによる位置ずれが発生していることがわかり、XIIの外側では約5 mm程度、大きいところでは10 mm程度のずれが発生していることが判明した。一方、FPD（デジタル）では、位置ずれが発生していないことが確認された。

### 3.3. 画像解析

図10と図11に画像解析の結果得られたトレーサ粒子の3次元軌跡を示す。図には、三次元的に追跡された29個の粒子（2番目のバッチの）の軌跡が表示されている。（球は軌跡の終端に置かれ、識別のために配色した。）この図より、トレーサ粒子が中子の周囲を取り囲むように流れたことが分かる。

ここではさらに、トレーサ粒子の情報からスラリ内部の速度場を再構築することを試みた。得られた結果の例として、第1バッチ注型後の第2バッチのスラリの三次元速度ベクトルと流跡を図12に表示する。最初中子の後ろ側に滴下された

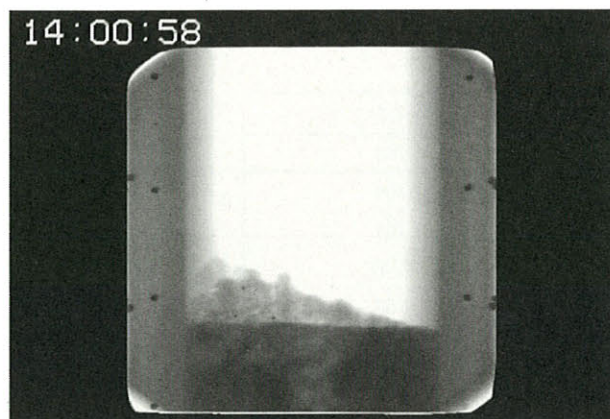


図9 X線画像の例

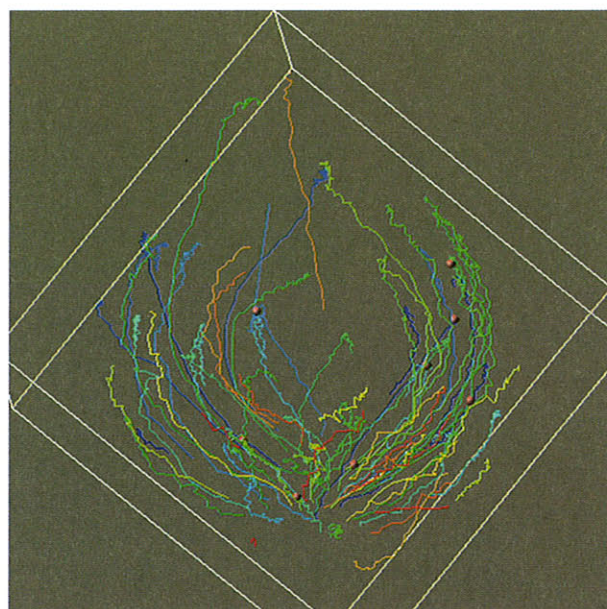


図10 トレーサの軌跡 (top view)

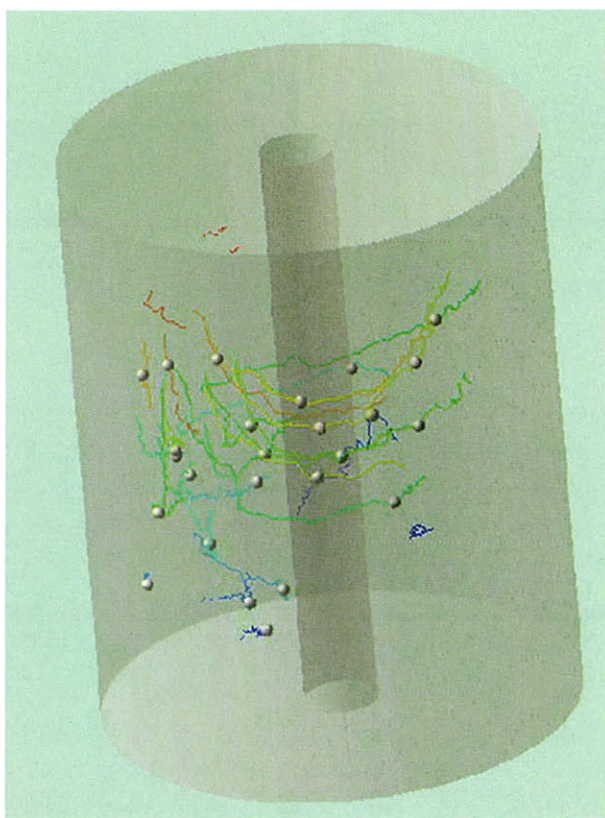


図11 トレーサの軌跡 (2バッチ, 片側のみ, side view)

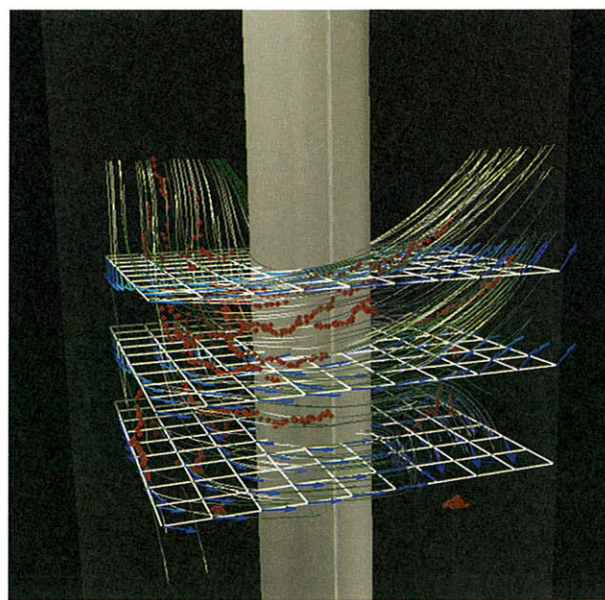


図12 3次元速度ベクトルと流跡の推算結果 (時間平均場)

スラリは中子の周囲を取り囲むように流れる。この際、最初スラリは下向きに流れるが、その後中子を左右に取り囲む流れが衝突するようにして、中子の手前側では上向きに流れることが見て取れる。この図を作成するに当たり、全てのサンプリング時刻における 2114 個のトレーサ粒子の位置と速度の情報から、容器内に仮想的に設けた格子点上での時間平均速度を内挿により算出した。

目視により粒子の抽出および追跡を行っているため、粒子の重心座標はピクセル単位の精度である。そのため、重心座標の精度は、2 ピクセル程度、約 1 mm の誤差を含む。追跡による時間方向の粒子の追跡は非常に粗な粒子数であるため、ほぼすべてで正しく追跡できた。ペアマッチングでは、複数個の粒子が同時刻に注入されたのは、5 個程度であり、ほぼすべてで正しくペアマッチングが行えた。しかし、粒子数の増加をさせる場合には、目視による粒子の抽出および追跡を自動化するとともに、より高精度に粒子抽出と粒子の同定を行う必要があると考えられる。但し、鉛のトレーサ数を一方的に増やすことはスラリ本来の特性を変えてしまうため、トレーサや透視方法を見直すことも必要になると考えられる。

## 4. 結 言

ここでは、2 方向の実時間 X 線透過ビデオ撮像とデジタル画像解析を用いることにより、模擬固体推進薬スラリの注型時の三次元非定常流れを可視化し、速度場を評価することが可能であることを示した。本研究分野は未熟であり、今後の発展が期待される。この研究を進める過程で、そのためのいくつかの技術課題を識別することができた。

## 謝 辞

本報告は JAXA における U 4-4 K 2-USRPJ-1003 (「推進薬注型挙動と燃焼特性予測技術の研究」) の成果に基づく。

## 参 考 文 献

- 1) Beckman, C.W. and Geisler, R.L., "Ballistic Anomaly Trends in Subscale Solid Rocket Motors," AIAA 82-1092, AIAA/SAE/ASME 18 th Joint Propulsion Conference, June 21-23, 1982 / Cleveland, Ohio
- 2) Heister, S.D., "Ballistics of Solid Rocket Motors with Spatial Burning Rate Variations," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 649-651
- 3) Ishikawa, M., Miyachi, H., Shimada, T., Habu, H., Ooya, S., and Seike, Y., "Flow visualization of slurry fluid using two-directional X-ray photograph," Kobe Visualization Symposium 2006, Kobe, Japan, Sept. 2006
- 4) Le Breton, P. and Ribereau, D., "Casting Process Impact on Small-Scale Solid Rocket Motor Ballistic Performance," Journal of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 6, November-December 2002, pp. 1211-1217
- 5) Ribereau, D., Le Breton, P., and Giraud, E., "Solid Rocket Motor Three-Dimensional Surface Burnback Computation Using Mixes Stratification Deduced from Three-Dimensional Grain Filling Simulation," AIAA Paper 99-2802, 35 th AIAA/SAE/ASME/ASME Joint Propulsion Conference, Los Angeles, CA, June 1999





## 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-021

---

発行 平成 19 年 3 月 30 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

---

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

