A 2 1 0

2 方向からの X 線撮影によるスラリーの流れの可視化

石川正明[○] (琉球大), 宮地英生 (㈱ケイ・ジュー・ティ), 嶋田徹 (JAXA), 羽生宏人 (JAXA),
大矢清司 (㈱日立エンジニアリング・アンド・サービス), 清家誉志男 (日本油脂㈱)

Flow visualization of slurry fluid using two-directional X-ray photograph

Masaaki ISHIKAWA, Hideo MIYACHI, Toru SHIMADA,
Hiroto HABU, Seiji OOYA and Yoshio SEIKE

ABSTRACT

A lot of slurry fluids have an opaque substance. It is difficult to visualize using previous photograph system with a visible ray. Therefore, we use the X-ray photograph to visualize inside a slurry fluid. And also to capture three-dimensional flow structure of the slurry flow, we use two X-ray sources and detectors. Time-serial data of the particle position are obtained by particle tracking and stereo-pair matching techniques. 3-Dimensional velocity vectors inside the slurry fluid are obtained

Keywords: Flow visualization, Slurry flow, X-ray photograph

1. 結 論

ロケットに利用される固体推進薬を注入する際、設計に従った品質になっていなければ、安定した推進力を得ることができない。その固体燃料はスラリー状の薬品を型に充填することで生成されるため、注型時のスラリー流動を把握することは燃料の製造システム設計上重要な問題である。しかしスラリー状の不透明な流体中の挙動を把握する場合、可視光線を利用した流れの可視化では困難である。そのような流体中における撮影方法として、X 線^①等を利用した撮影により、内部流動を明らかにする方法が取られている。本研究では、スラリー内部に鉛トレーサ粒子を注入し、直交した 2 台の X 線発生器・検出器を利用して、ステレオ撮影を実施し、それぞれの検出器によって得られた画像を、粒子追跡とステレオマッチングによって、3 次元流動の復元を行う。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に 2 台の X 線発生器と検出器を用いた撮影システムを示す。X 線発生器はエクスロン製 MG225 と理学電機社製 RF300HMG を、X 線検出器はバリアン社製フラットパネルと東芝製イメージインテンシファイアを利用し、撮影速度は 7.5fps で行った。2 台の X 線撮影システムは、直交するように配置し、X 線の廻り込みを防止するために、遮蔽、フィルタ、コリメータ等の対策をした。Fig. 2 に燃料注入を模擬した実験装置で、内径 110mm の透明アクリル製内部に 30mm の中子を設けている。容器高さは 350mm である。またその外周には X 線の透過量を均一にするためと、スラリー流体を 60 度に温度管理するために、矩形の水容器を用意した。スラリー流体は、

日本油脂㈱より提供された模擬推進薬を利用し、装置上部に設けた保温付きホッパーにより注入する。その際、スラリー内部の流動を可視化するトレーサ粒子として、1mm の鉛玉 (比重 11.3) を利用した。

Fig. 1 X-ray photography system

Fig. 2 Experimental apparatus

3. X 線撮影結果および 3 次元流動解析

X 線撮影システムによって得られたある時刻の 2 枚の画像を Fig. 3 示す。スラリーはホッパーより試験容器底

部にゆっくりと充填され、中子を避けて左右に流れながら堆積してゆく。最後は高さ約 150mm まで充填されていく様子が可視化観察からわかった。最終的に充填された状態でのトレーサ粒子数は約 80 個観察された。背景(白)、スラリー(薄い灰色)、トレーサ(濃い灰色)となっているため、多値化による粒子抽出を試みたが、空気だまりが存在することや、検出器の感度を調節しながらの撮影であったことで、良好な二値化画像を得ることができなかった。そのため、目視により各トレーサ粒子の画像座標の時系列データを作成した。Fig. 4 はその時系列データから得られた粒子の軌跡である。粒子の軌跡から、上部から注入された粒子が底部に当たり、反対側へ盛り上げながら粒子が進んで行くことがわかる。

Fig. 3 Stereo image

Fig. 4 Particle tracking result

次に、この粒子座標の時系列データを用いて、3次元座標へ復元した。復元を行うための校正には、X線を利用することもあり、常に校正できるよう、容器外部に鉛玉の校正用マーカーを各画像8点(手前4点、奥側4点)貼り付けて行った。校正方法は平均と線形補間を用いた最も単純な方法である。各画像内の8点のマーカーによる平均座標を (x_{FP0}, y_{FP0}) , (x_{II0}, y_{II0}) とし、その平均座標は実空間座標 $(X_0, Y_0, Z_0)=(0, 0, 750)$ を通る各断面と仮定して、左右4点ずつによって求まる平均座標の差と実サイズの比により各画像の横縦の倍率 (k_{FPx}, k_{FPy}) , (k_{IIx}, k_{IIy}) を計算する。そして、その各画像の平均座標と縦横倍率から、線形補間により、各画像の3次元座標を求める。

$$\begin{pmatrix} X_{FP} \\ Y_{FP} \\ Z_{FP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{FPx} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_{FPy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{FP} - x_{FP0} \\ y_{FP} - y_{FP0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_{II} \\ Y_{II} \\ Z_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k_{IIx} & 0 \\ 0 & k_{IIy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{II} - x_{II0} \\ y_{II} - y_{II0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

最後、各画像によって求まる座標の平均座標によって3次元座標に復元する。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{FP} \\ Y_{II} \\ (Z_{FP} + Z_{II})/2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

この方法によって得られた3次元の粒子の軌跡分布をFig. 5に示す。図(a)は斜め横からの結果で、図(b)は上方からの結果を示している。図(a)より上部から注入された流れは底面へ弧を描きながら進み、反対側で盛り上がる流れをする。また、図(b)より、中子を廻り込むようにスラリー流体が中子の裏へ流れてことがわかり、2台のX線発生器と検出器を用いて、3次元の復元が可能であることがわかった。今後、粒子追跡システムの自動化、画像の回転や歪み等を考慮する校正システムの高精度化を行い、より高精度な3次元解析を行う予定である。

Fig. 3 3-D particle trace

4. 結 論

ロケット模擬推進薬の注入を模擬したスラリー流れに、直交する2方向のX線撮影装置を利用して、ステレオ撮影を行った。そして、鉛トレーサ粒子の位置の時系列データを用いて、ステレオペアマッチングと3次元座標の復元を行い、スラリー流動の3次元流動の解析できることを示した。

参 考 文 献

- 1) 植村, 山本, 西尾, 村田, 上杉: 放射光X線を利用したPIV用画像撮影-混相流への適用を目指して-, 可視化情報全国講演会(新潟), Vol. 25, Suppl. No. 2 (2005) pp. 205-208.