

混相流解析における空気力モデルの検証

森崎 匡郎(東海大), 嶋田 徹(JAXA), 判澤 正久, 加藤 崇資, 吉川 峻(東海大)

Validation of the Aerodynamic drag model in the multi-phase flow analysis

Masao Morisaki, Toru Shimada, Masahisa Hanzawa, Takashi Kato, Takashi Yoshikawa

Keyword: Multi-Phase Flow, Rockets, CFD

Abstract

The multi-phase flow analysis in a solid rocket motor is very important when performing the performance of a motor, and prediction of nozzle ablation. However, only in consideration of regular power, it has analyzed as power which a metal particle receives from a flow until now. We conduct analysis and an experiment about the virtual mass clause which will influence at the place where acceleration is big. We aim at the improvement in accuracy of multi-phase flow analysis from the result.

Introduction

固体推進薬には、アルミニウム粉末 Al (粒径数 $\mu m \sim$ 数十 μm) が金属燃料として含まれている。この金属粉末が火炎に加熱されることで融解し、推進薬表面近傍で集塊を形成する。アルミニウムの燃焼が始まると、集塊が表面から離脱し燃焼生成物として酸化アルミニウム(アルミナ, Al_2O_3)を放出しながら固体ロケットモータ(Solid Rocket Motor, SRM)内部をガスとともに流れる。このように SRM 内部の流れはアルミニウム/アルミナを含む混相流となっており、SRM の性能やノズル材の耐熱特性を知るためには、これら粒子相の効果を考慮した混相流解析が必要である。

この混相流解析において、これまでは粒子が流れから受ける力について、定常力のみを考慮して解析を進めてきた。しかし、金属粒子が持つ大きなエネルギーによるノズル・ライナー焼損を数値解析(CFD)から予測するためには境界

層内で粒子がどのような運動をしているかを把握する必要があり、新しい数学モデルの構築が叫ばれている。

本研究では、SRM 内部の混相流解析の精度向上を目標とし、新しく高度な数学モデルの構築を目指している。ここでは、粒子に働く力のうちのノズル内など加速度が大きな場で影響があると思われる付加質量項の影響を調べるために行なった実験についての簡単に報告する。

Effect of virtual mass

流体中におかれた球形粒子の運動方程式を考えると、次のように書ける。

$$\begin{aligned} \text{質量} \times \text{加速度} &= \text{流体抗力} \\ &+ \text{圧力勾配による力} \\ &+ \text{応力勾配により力} \\ &+ \text{付加質量を加速するのに必要な力} \\ &+ \text{非定常な粒子と流体の} \\ &\quad \text{相対加速度により力} \\ &+ \text{流体揚力} \end{aligned}$$

この中で最も大きく働くのは流体抗力である。しかし先述したように SRM の性能予測には他の項の効果も重要である。そこで他の項の効果を検証するために、まずは今回注目する付加質量項の影響について、SRM ノズル壁の境界層内における付加質量の影響を見る数値実験を行なった。

上記の運動方程式から流体抗力項と付加質量項のみを取り出し書き出すと、次のようになる。

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \frac{d\bar{U}_p}{dt} = \frac{\pi}{8} C_D \rho D_p^2 |\bar{U} - \bar{U}_p| (\bar{U} - \bar{U}_p) + \frac{\rho}{2} V_p \left(\frac{D\bar{U}}{Dt} - \frac{d\bar{U}_p}{dt} \right) \quad (1)$$

D_p : 粒子径, ρ_p : 粒子嵩密度, U_p : 粒子速度, ρ : ガス密度, U : ガス速度, V_p : 粒子体積

この式を長さ: D_p , 時間: τ_v (緩和時間), 速度: U_∞ (主流速度) で無次元化する。ただし,

$$\tau_v = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu} \quad (2)$$

μ : 気体粘性係数

無次元化を施すと,

$$\frac{d\bar{U}}{d\bar{t}} = \frac{Re}{24} C_D |\bar{U} - \bar{U}_p| (\bar{U} - \bar{U}_p) + \chi \left(\frac{D\bar{U}}{D\bar{t}} - \frac{d\bar{U}_p}{d\bar{t}} \right) \quad (3)$$

但し, 無次元量 Re と χ はそれぞれ以下で定義される。

$$Re = \frac{\rho U D_p}{\mu}, \quad \chi = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (4)$$

付加質量項の影響が大きく現われるような状況として以下のような渦中に置かれた粒子の挙動について考える。

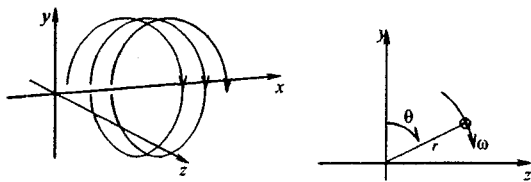


Fig.1 Numerical Experiment

ここで, 流れは定常で x 方向に一定速度 u , y , z 面内で角速度 ω で剛体回転しているものとする

$$\bar{U} = (u, -r\omega \sin \theta, r\omega \cos \theta) \quad (5)$$

このとき, 物質微分は

$$\frac{D\bar{U}}{Dt} = (\bar{U} \cdot \text{div}) \bar{U} = (0, -r\omega^2 \cos \theta, -r\omega^2 \sin \theta) \quad (6)$$

次に, この渦の中心近傍に粒子が上流から流れ込む様子を数値計算により調べる。中心は特異点となるので, 初期位置として $r=R \neq 0, \theta=0$ を想定する。主流は $u=1\text{m/s}$, 回転数 50Hz のため渦状の流れ場を想定する。

$R=0.1\mu\text{m}, 10\mu\text{m}, 1000\mu\text{m}$ 位置に直径 $100\mu\text{m}$ 及び $500\mu\text{m}$ の粒子を置いた場合の合計 6 ケースについて計算し, それぞれについて, 付加質量項を考慮する場合としない場合の粒子軌跡を比較する

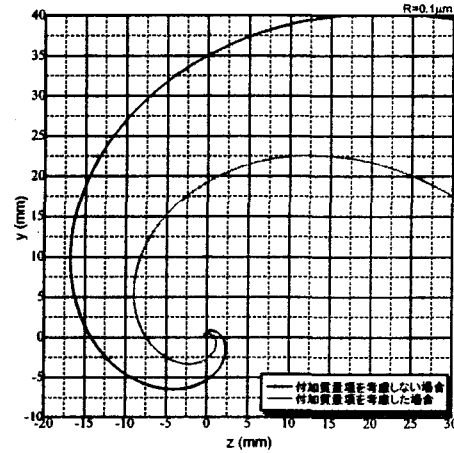


Fig.2 Effect of Virtual Mass
($R=0.1\mu\text{m}, D_p=100\mu\text{m}$)

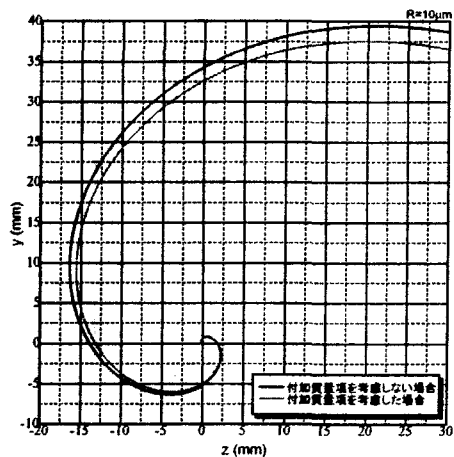


Fig.3 Effect of Virtual Mass
($R=10\mu\text{m}, D_p=100\mu\text{m}$)

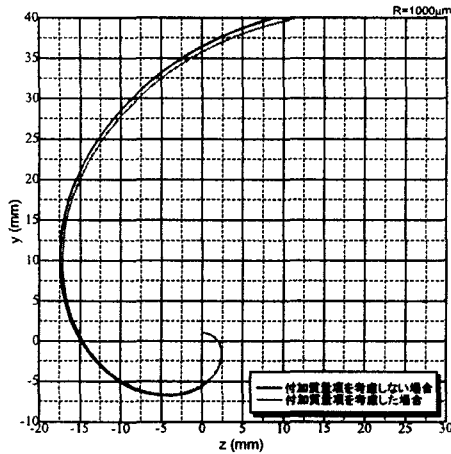


Fig.4 Effect of Virtual Mass
($R=1000\mu\text{m}$, $D_p=100\mu\text{m}$)

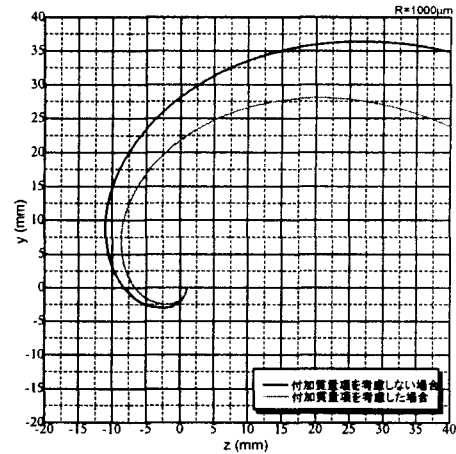


Fig.7 Effect of Virtual Mass
($R=1000\mu\text{m}$, $D_p=500\mu\text{m}$)

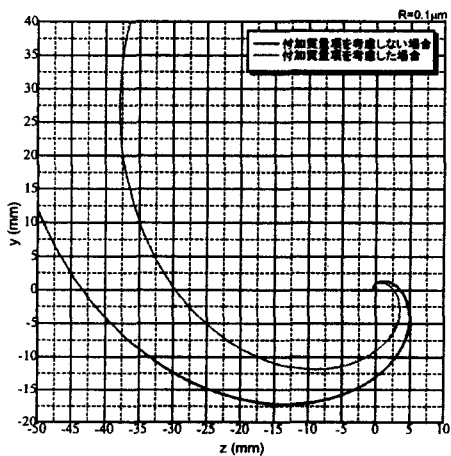


Fig.5 Effect of Virtual Mass
($R=0.1\mu\text{m}$, $D_p=500\mu\text{m}$)

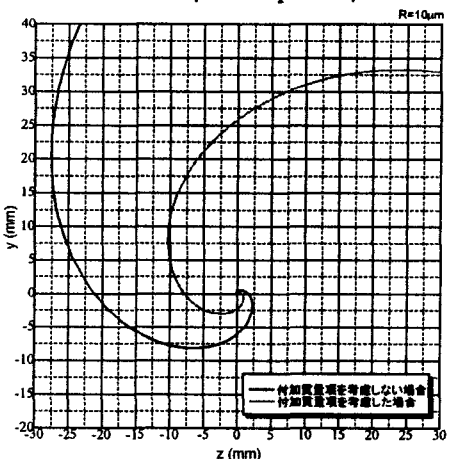


Fig.6 Effect of Virtual Mass
($R=10\mu\text{m}$, $D_p=500\mu\text{m}$)

以上のグラフより、①粒子の初期位置が渦の中心に近いほど、また、粒径が大きいほど付加質量項の効果大きい。②中心の極近傍に粒子を置くと、付加質量項を考慮した場合としない場合でわずかな距離を移動する間にも大きな差異が生じる。従って、大きな角速度を持つ渦の中心など加速度が大きい場合には付加質量項を考慮する必要がある。

Experiment Method

実験を行うにあたって、SRM 内部のような高速流れにアルミニウム粒子を用いて実験を行うことは事実上不可能である。そこで式(1)において、右辺第1項のレイノルズ数と、右辺第2項の粒子密度とガス密度の比 χ をモータ内部の値と合わせることで相似な流れとすることができる。これにより、実際のモータ内部の(小さい χ) \times (大きな加速度) という関係を、(大きな χ) \times (小さな加速度) として、粒子に働く力の検証が可能となる。

検討の結果、本実験では、風速 $1\sim 2\text{m/s}$ 程度、直径 2mm 程度で密度 20kg/m^3 程度の発泡スチロール球を用いることとした。

流れに対する粒子軌跡を写真で撮影するにあたり、アクリル製の簡易低速風洞を製作した ($H \times W \times L = 350\text{mm} \times 100\text{mm} \times 650\text{mm}$)。そこに大型プロアを用いて風速 $1\sim 2\text{m/s}$ の流れを作り上流側の上部より粒子を一粒落下させる。その粒子が流れより力を受けて下流へと流されてい

く様子を,最大 500Hz で発光するストロボフラッシュと 500 万画素のデジタルカメラとを使用して連続撮影を行なった。

今回の実験では風洞内の流速は 1.2m/s に設定した。また,風洞上流に渦式流量計を設置し,流量を監視するとともに,風洞出口にて熱線流速計を用いて各点における流速の測定を行なった。これにより,後の解析における境界条件の設定を行なう。

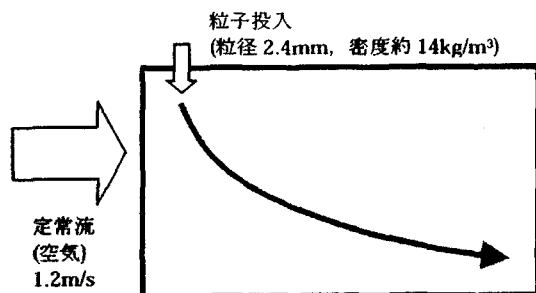


Fig.8 Outline Figure of Experiment

Taken Photograph

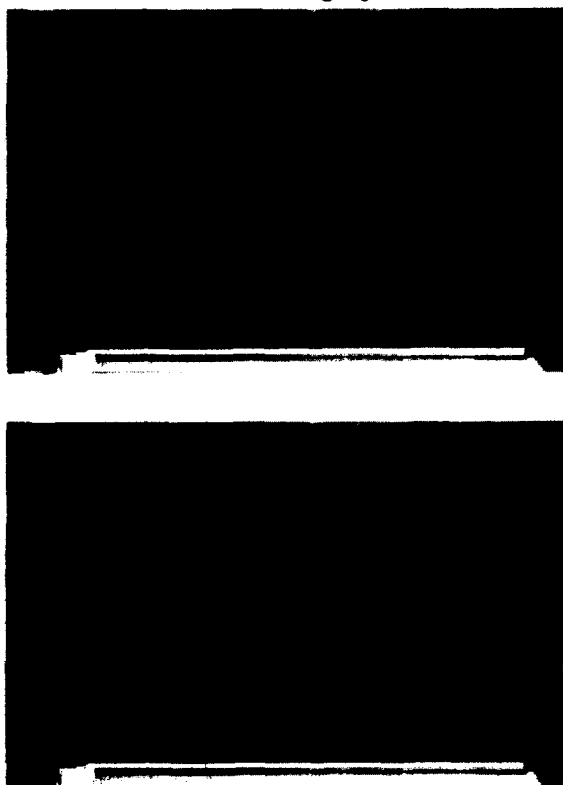


Fig.9 The taken photograph

このような写真を同じ条件の下,計 130 枚撮影した。撮影した写真より各軌跡の座標データを取得し,全ての軌跡より平均を求め,それを最も適切な代表粒子軌跡とした。その代表軌跡を以下に示す。

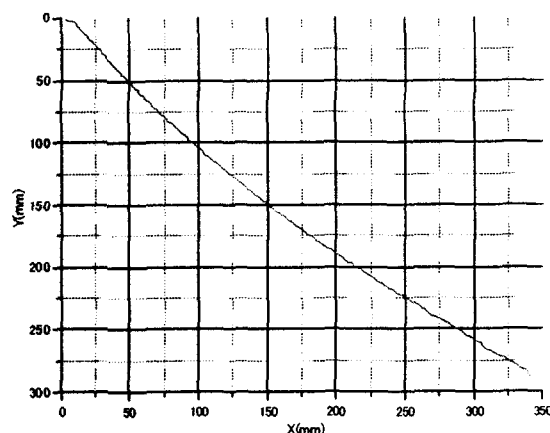


Fig.10 Particle Pass

A Future Effort

今回の実験により得られた写真やデータを数値計算結果と比較する。それにより,大きな加速度場における付加質量項の影響について調べ,CFD における数学モデルへと反映させることにより精度向上を図る。

またその他にも SRM 内部混相流解析における数学モデルの課題は多く残る。金属粒子の分裂・凝集や SRM 内部での粒径による分布の違い,また乱流モデルなどである。それらの一つ一つ解決し,よりより数学モデルの構築を目指す取り組みを進めていきたい。

References

- 1)嶋田徹,関野展弘 “固体ロケット内部混相流解析～粒子相記述法による相違～” 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2002
- 2)嶋田徹,関野展弘 “固体ロケット内部混相流の数学” 第 43 回航空原動機・宇宙推進講演会
- 3)Rocket Propulsion Elements
George P. Sutton