

K7-59

## 音速近傍流れにおける球体の衝撃波離脱距離

## Shock standoff distance of sphere at near-sonic flows

笠原一輝<sup>1</sup>, 菊池崇将<sup>2</sup>, 村松旦典<sup>2</sup>Itsuki Kasahara<sup>1</sup>, Takamasa Kikuchi<sup>2</sup>, Akinori Muramatsu<sup>2</sup>

Abstract: The shock standoff distance in an unsteady flow could be observed experimentally. Experimental results of three different density spheres were compared with the unsteady model. Experimental results of polyacetal and aluminum spheres agreed well with the model. However, the experiment results of the stainless sphere were different from the results of theory. The reason of this difference is verified by new experiments performed in this October. In deriving velocity history of the projectiles, it is necessary to use the technique of image resolution enhancement.

## 1. 研究背景

超音速流れ中の物体周りに生じる衝撃波形状は物体形状に依存する。鋭頭物体には付着衝撃波が発生し、鈍頭物体には離脱衝撃波が発生する。この鈍頭物体の先端と衝撃波の間の距離を衝撃波離脱距離と呼ぶ。衝撃波離脱距離は物体の大きさとマッハ数にのみ依存する。定常流れでは  $M=1$  に近づくにつれて衝撃波離脱距離は増大し、 $M=1$  の時、無限遠方に存在すると考えられている。一方、非定常流れにおいて  $M=1$  の時でも衝撃波離脱距離が有限の値を持つことがわかっている。我々は、物体の速度情報が離脱衝撃波へ伝わるまでに時間遅れが存在<sup>[1]</sup>するため  $M=1$  においても有限の値を取るということ仮説を立てた。

昨年度まで、仮説を検証するため同一形状で密度の異なる 3 種類の球状飛行体の衝撃波離脱距離を実験計測した。また密度の異なる球状飛行体周りの衝撃波離脱距離を予測する理論式を構築し、実験結果と比較したところ定性的・定量的な一致を得た。しかし減速に関する係数  $\alpha$  は飛行体形状と飛行体密度のみに依存し一定値を取ると予想されたが、バラツキの多い結果が得られた。この原因として実験データから係数  $\alpha$  を求める過程に大きな誤差が発生したと疑問を抱いている。

本稿では、過去の実験データの再解析結果と解析結果を受けて再検討した本年度の実験計画を示す。

## 2. 過去の実験

実験概要図を Figure 1 に示す。実験は東北大学流体力学研究所に設置された弾道飛行装置を用いた。高圧ヘリウムガス圧力で飛行体を加速・射出する。球状飛行体の直径と弾道飛行装置加速管内径が一致しないため、サボと呼ばれる支持具に格納した状態で射出した。サボは、自由飛行部の空気抵抗を受けて分離し、球場

飛行体のみが観測部を飛行する。音速付近で自由飛行する球と離脱衝撃波をシャドウグラフ法と高速度カメラで可視化、撮影する。

実験で用いた飛行体の材質は Polyacetal, Aluminum, SUS の 3 種類であり、それぞれ質量は 0.36g, 0.78g, 2.01g である。飛行体直径は材質によらず 7.938[mm] である。撮影した可視化画像から飛行体、離脱衝撃波の位置を測定し、衝撃波離脱距離を求めた。球の運動方程式から得られた位置履歴の理論式と、実験から得られた位置履歴をフィッティングさせて、減速に関する  $\alpha$  を求めた。実験によって得られた衝撃波離脱距離とマッハ数の関係のグラフを Figure 2 に示す。複数の実験データを一つのグラフに重ねている。グラフより Polyacetal 球, Aluminum 球の離脱距離は飛行体が  $M=1$  の場合で発散せず、 $M<1$  の範囲でも増加していることが確認された。また、SUS 球の実験データは未完了である。SUS 球の実験結果は、球の減速に従い衝撃波離脱距離が減少していることがわかる。この結果は理論と反する結果であり、Polyacetal 球, Aluminum 球の結果と異なった。この SUS 球データの検証のため以下の 4 つを検討した。

- 1 歪曲収差による画像データの歪み
- 2 弾道ズレによる位置履歴の誤算
- 3 ヘリウム混入による減速率の変化
- 4 データの解析ミス

結果としてデータの改善は見られず原因は 1~4 ではなかった。このため、我々が予想し得ない現象の可能性はある。

SUS 球の密度は他の二つの球体に比べ、密度が 3 倍近く大きい。高密度物体特有の現象の可能性はある。本年度の実験計画では、SUS 球の未取得データの取得を計画しており、同時に SUS 球より密度の高い球状飛

1 : 日本大学 学部 航宇 2 : 日本大学 教員 航宇

行体を用いた実験を実施し、高密度物体特有の現象の可能性を検証する。

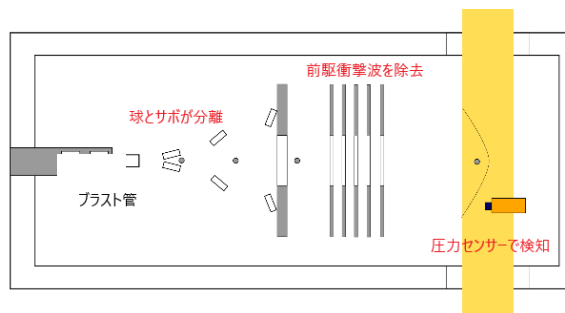


Figure 1. Outline of experiment

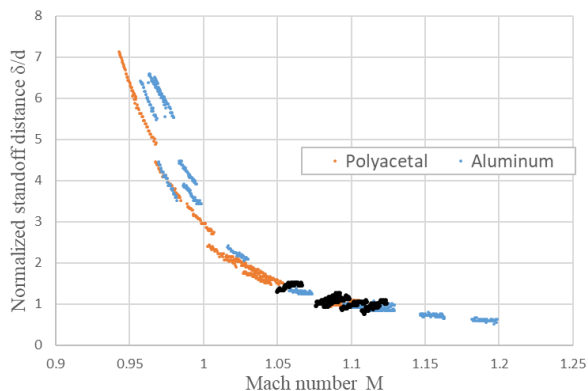


Figure2. result of Experiment

### 3. 減速の係数 $\alpha$ の関して

球状飛行体中心位置履歴を、実験で取得した連続画像から求め、球の運動方程式から導いた位置履歴の理論式とフィッティングさせて減速に関する係数 $\alpha$ の値を導く。係数 $\alpha$ は、理論的には飛行体の密度と形状のみに依存する。異なる速度で射出した飛行体のデータから算出した係数 $\alpha$ はばらついた値になっている。このばらつきの原因としては、カメラ撮影の段階など画像取得時に起こる誤差や画像データから位置履歴を求める際に生じた誤差などが考えられる。カメラ自体の精度には限度があるため、位置履歴取得法についての改善を検討した。川村らは、超音速自由飛行する球状飛行体の抗力係数を低解像度の連続撮影画像から算出する方法を提案している。<sup>[2]</sup> 高解像度化処理した球の画像データの図心を求めることで、飛行体中心位置履歴を算出している。球体の図心を求める手法のみを適用し、中心位置履歴を求めた。結果を Figure 3 に示す。図心を求める方法と既存の方法では、ばらつきに変化は見られなかった。従って画像データの高解像度化処理は必須である。高解像度化の例を Figure 4 に示す。

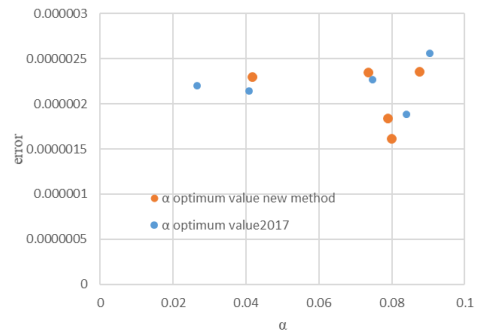
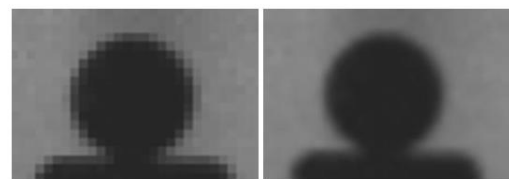


Figure 3. Least squares method by The coefficient  $\alpha$



(a) Original image 400×250 [pixel]  
(b) Image after processing 20000×12500 [pixel]

Figure 4. Example of high resolution <sup>[2]</sup>

### 4. 今後の研究計画

SUS 球の未取得データを実験計測する。前回実験で取得できていない  $M=0.95\sim 1.1, 1.15$  の速度で実験を行う予定である。あわせて、SUS よりも密度の高い材質の球状飛行体を用いた実験を実施し、SUS 球の理論と反する実験結果の原因を調査する。

減速に関する係数 $\alpha$ の値のばらつきが画像の解像度によるものであるということから高解像度化画像を処理できる手法を構築し厳密な $\alpha$ の値を導き出す。

### 5. まとめ

- ・ 衝撃波離脱距離を予測する理論式と実験結果が一致したが、SUS 球データに理論と反する結果が現れたため SUS 球データの追加、再取得を行う
- ・ 一定値を取ると予想された $\alpha$ の解析を行ったがデータにバラツキがあるため高解像度化画像を解析する手法を検討し球体ごとに正確な $\alpha$ を求める

### 6. 参考文献

- [1] R.F. Starr, M.O. Varner : 「Application of the measurement of shock detachment distance at low supersonic speeds」, AIAA Journal, Vol. 14, No. 4, pp.535-536,1967
- [2] 東北大学 流体科学研究所 「弾道飛行装置を用いた超音速飛行における球の抵抗計測」 pp.4 JSASS-2016-1043