

K7-81

音速近傍流れにおける衝撃波離脱距離

Shock standoff distance at near sonic flow

國分智晴¹, 菊池崇将²Tomoharu Kokubun¹, Takamasa Kikuchi²

Abstract: While the shock standoff distance at the steady flow is divergent in Mach number 1.0 in theory, the shock standoff distance is not divergent in Mach number 1.0 in experiment. We set up a hypothesis that this contradiction in near sonic flow was caused by the unsteadiness of flow and built a theoretical model of the unsteady shock standoff distance. The model was verified by experiments using a ballistic range. The model agreed qualitatively with the experiments, especially agreed quantitatively with the experiments at ranging higher than Mach number 0.98.

1. 研究背景及び目的

衝撃波は移動物体の形状に依存して発生する場所が異なり、球などの鈍頭物体では物体から離れて存在する離脱衝撃波となる。物体と離脱衝撃波の距離は衝撃波離脱距離と呼ばれ、定常流れでの衝撃波離脱距離はマッハ 1 において無限大である。物体の移動速度が変化する非定常流れの場合、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し^[1]、非定常状態での衝撃波離脱距離は、マッハ 1 においても無限大に発散せず、有限の値を持つと考えられる。

本稿は、弾道飛行装置を用いて球状飛行体を射出し、減速する物体の衝撃波離脱距離を測定した結果を報告する。同一形状で密度の異なる飛行体を用いることで飛行体の減速率を制御し、流れの非定常性のみを変化させた。また、減速する球周りの非定常な衝撃波離脱距離モデルを作成した。衝撃波離脱距離とマッハ数の関係を比較することで、音速近傍での非定常な衝撃波離脱距離と減速する物体の飛行速度の関係性を示す。

2. 実験

非定常での衝撃波離脱距離を測定するため弾道飛行装置を用いた離脱衝撃波可視化実験を行う。実験装置の概要を Figure 1. に示す。軽ガス銃で球状飛行体を音速付近まで加速させ、離脱衝撃波を写真法による光学可視化と高速度カメラを用いて撮影することで非定常の流れ場を観測する。球状飛行体の直径と弾道飛行装置の加速管内径が一致していないため、球状飛行体を Polycarbonate 製の円柱形サボの内部に装填し加速させる。サボは加速管から射出された直後から空気抵抗によって分離する。飛行体の減速率の差異のみによる離脱距離の変化を比較するため、同一直径で Aluminum と Polyacetal の材質の異なる 2 種類の球を用いる。質量はそれぞれ 0.78g, 0.36g, 直径 7.938mm 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。可視化画像から直接速度履歴を求めた場合、読み取り誤差の影響が大きくなるため、球の運動モデルを用いて高精度な速度履歴を求めた。実験によって得られた衝撃波離脱距離を Figure 3 に示す。いずれの材質でも離脱距離は飛行体が $M=1$ の場合では発散せず $M<1$ の範囲でも増加していることが確認された。また、材質の異なる飛行体は同じ速度域でもそれぞれ離脱距離の増加率に違いがみられ、polyacetal はより増加率が小さい特性を示した。減速率が大きくなるほど衝撃波離脱距離の増加率は小さくなると考えられる。

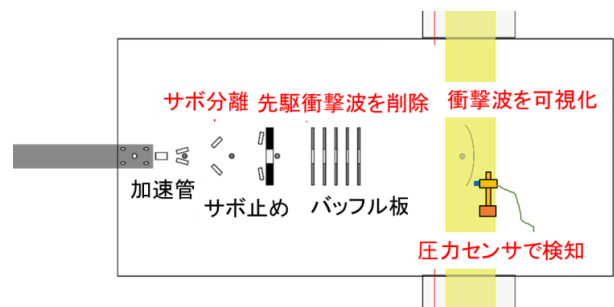


Figure 1. Outline of experiment

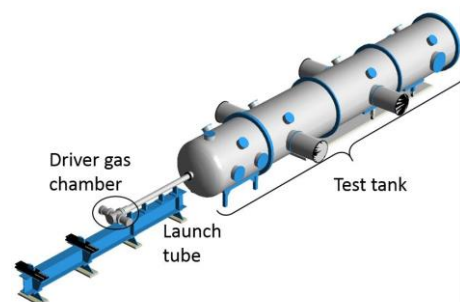


Figure 2. Ballistic range

1 : 日大理工 学部・航宇 2 : 日大理工 教員・航宇

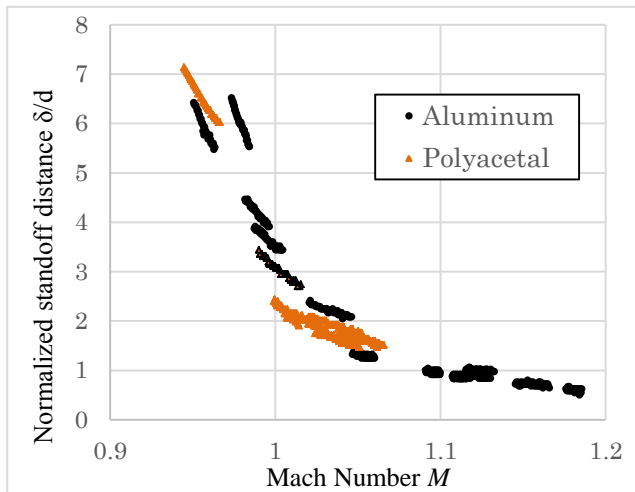


Figure 3. Experimental result

3. 非定常流れでの衝撃波離脱距離の予測モデル

作成した予測モデルの模式図を Figure 4 に示す. 超音速流れの中の物体の前方に離脱衝撃波が発生している. 物体から出た擾乱が離脱衝撃波へ到達したとき, 離脱衝撃波は擾乱の影響を受けて衝撃波離脱距離が変化する. 擾乱は, 物体と離脱衝撃波間の距離すなわち衝撃波離脱距離を有限時間かけて伝播する. このため, 物体の速度が変化した場合, 離脱衝撃波が物体の速度変化の影響を受けるまでに遅れ時間が存在する. 定常流れでの衝撃波離脱距離に対して, 遅れ時間が存在する場合の球の減速の考慮を加えることで非定常流れでの衝撃波離脱距離を予測する.

自由飛行する球の運動方程式を用いて, 非定常での影響を考慮した衝撃波離脱距離を (1)式に示す. ここで, ϵ は非定常流れと定常流れでの離脱距離の差, T は物体から衝撃波面まで擾乱が伝播する遅れ時間, v_1 は物体の T 時間前の速度, α は物体の減速による定数である. また, 物体から衝撃波面までの擾乱の遅れ時間は(2)(3)式から得られる.

$$\frac{\delta + \epsilon}{a} = \left\{ \delta + v_1 T - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + v_1 \alpha T) \right\} \frac{1}{a} \quad (1)$$

$$T = \frac{\delta}{a(1 - M_3)} \quad (2)$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}} \quad (3)$$

モデルから導いた Aluminum 球の減速を考慮した衝撃波離脱距離と実験結果の比較を Figure5 に示す. 実験値は, 各実験での平均マッハ数である. モデルは定性的に一致しており, $M \geq 0.98$ の範囲では定量的な一致も

確認できる.

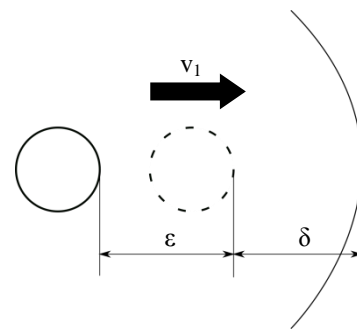


Figure 4. The standoff distance model

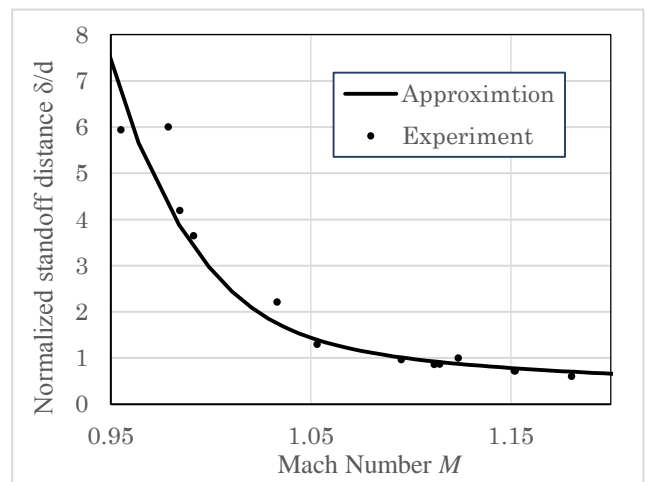


Figure 5. Predictive model in unsteady flow

4. 今後の予定

Aluminum 球と Polyacetal 球の未取得の速度条件での同様の実験を実施し, 実験データの精度を向上させる. また, 新たに SUS 球での実験条件を追加する. 高密度の飛行体材質での実験条件を追加することによって, より定常流れに近い実験データが得られ, モデルを厳密化できると期待している.

5. まとめ

非定常流れでの衝撃波離脱距離の予測モデルを作成し, 弾道飛行装置を用いた実験と比較した. 結果, 予測モデルは実験と定性的に一致した. 今後の追加実験により, 定量的な一致を確認する予定である.

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] A. Roshko・H. W. Liepmann: 「気体力学」,吉岡書店, pp.116-119,1960