

二段式軽ガス銃における微粒子単体衝突実験用サボの開発

○ 鶴井 健司 (法政大・院) 川合 伸明 (ISAS/JAXA) 長谷川 直 (ISAS/JAXA)
新井 和吉 (法政大) 佐藤 英一 (ISAS/JAXA)

1. 緒言

近年、宇宙開発の著しい発展により、国際宇宙ステーション (ISS) や人工衛星・惑星探査機など様々な人工物が宇宙環境で活躍している。しかし、これらの人工物は、地球周回の ISS や人工衛星ではスペースデブリとの衝突、惑星探査機ではメテオロイドとの衝突がそれぞれ懸念されている。これらの構造物のスペースデブリやメテオロイドに対する耐衝突性能を検討するには、二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突実験による損傷評価が必要となる。

二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突実験において、様々な大きさの飛翔体を発射できることが重要である。任意の飛翔体発射にはサボと呼ばれる装弾筒を使用する。飛翔体を詰めたサボを発射し、飛行中にサボと飛翔体を分離させることで飛翔体のみをターゲットに衝突させる。

ISAS/JAXA ではこれまで直径 1mm より大きい飛翔体ではシングルパーティクルショットと呼ばれる方法により実験を行い、直径 1mm 以下の微粒子飛翔体ではマルチパーティクルショットと呼ばれる方法で実験を行ってきた。

マルチパーティクルショットでは、サボの中に飛翔体を複数入れて発射する。この方法ではたくさんの飛翔体を一度に発射するため、ターゲットに衝突する飛翔体の数が予測できない。また飛翔体が複数衝突することによる損傷への影響が不明瞭なため、定量的な損傷評価が行えない可能性が考えられる。一方、シングルパーティクルショットでは、サボの中に飛翔体を1つだけ入れて発射する。マルチパーティクルショットとは異なり、飛翔体はターゲットに1つしか衝突しないため、メテオロイド単体衝突などの模擬に有効と考えられる。しかし、直径 1mm 以下の微粒子飛翔体を用いたシングルパーティクルショットを行う技術は未だ確立されていないため、安定して実験を行うことができない。

そこで本研究では直径 1mm 以下の微粒子飛翔体単体を高精度かつ高確率で発射できる新たな実験法の確立を行った。

2. 実験方法

シングルパーティクルショット実験は ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガス銃を使用した。図 1 に本研究で使用した二段式軽ガス銃を示す。二段式軽ガス銃のランチチューブは内径 7.00mm、長さ 1.5m で、バレル内部には 1m で 1 回転するらせん状のライフル溝が施されている。ランチチューブから発射されたサボと飛翔体はフライトチューブ内で分離し、サボはフライトチューブ内に設置されたサボストッパーに衝突し、飛翔体はサボストッパーの中心部に設けられた穴を通過してターゲットに衝突する。サボの分離距離はサボストッパー上の衝突痕、飛翔体の衝突位置はターゲット上の衝突痕でそれぞれ確認した。

メテオロイドやスペースデブリを模擬する飛翔体には直径 0.1mm から 1.0mm の SUS304 球、アルミニウム合金球、アルミナ球を使用した。本研究と並行して窒化珪素セラミックスの超高速衝突実験を行っていたことから³⁾、ターゲットには京セラ製窒化珪素セラミックス SN282 を使用した。衝突試験片には 60mm×60mm×1.5~3.0mm の平板を使用した。

3. サボの特徴と分離方法

本研究で使用したサボは Nylon66 製の円筒で、サボの分離を促進するためのスリットを導入したスリット型サボである。サボの外観および模式図を図 2(a)、図 2(b)に示す。サボの長さは 6.5mm で統一し、直径を 7.05mm か



Fig.1 Photograph of two-stage light gas gun

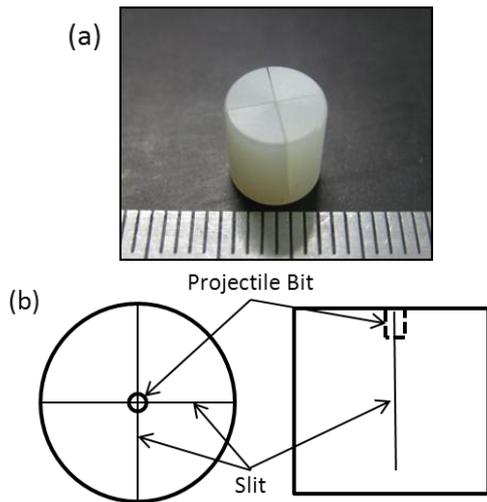


Fig.2 (a) Photograph of Nylon66 sabot and (b) schematic of Nylon66 sabot

ら 7.15mm とした。サボの中心には飛翔体の径に合わせた穴があり、この中に飛翔体を入れる。穴の深さは飛翔体直径の 1.5 倍とした。十字のスリットは刃厚 0.20mm のカッターを用いて手作業で入れ、スリットの深さは 6.00mm で統一した。

サボの加工を簡単にするため、サボ加工用に治具を作製した。図 3 にサボ加工用の治具を示す。サボの加工はまずサボを治具に固定し、ヒートガンでサボを加熱して、ナイロンサボを柔らかくする。その後、治具を組み合わせ、カッター刃を使用して十字にスリットを入れる。スリットを入れる際には、十字に入れたスリットがサボの中心穴で交差するように加工する必要がある。

このサボはライフルバレルを用いて発射される。サボはランチチューブ内を加速中に回転し、遠心力によってサボは分離し、飛翔体は回転により弾道安定性を得る。この分離方法はサボ分離を空気抵抗に頼らないため、実験チャンバーおよびフライトチューブ内を真空にすることができ、高い照準精度を得られることも利点である。

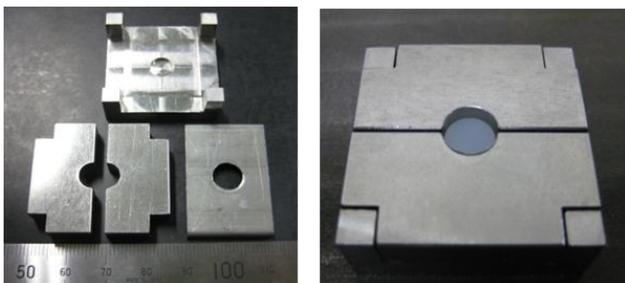


Fig.3 Photograph of jig

4. 実験結果と考察

4.1 サボ分離距離

サボの分離距離は、サボの回転による遠心力に依存する。そのため、サボ径とランチチューブ内径の組み合わせの最適化を図り、サボを十分に回転させる必要がある。サボ分離距離に関して、サボ径の影響を調査するために、7.05mm、7.10mm、7.15mm の 3 種類のサボを用いて 2.5~7.0km/s の速度域で分離実験を行った。

図 4 に各サボ直径におけるサボ分離距離とサボ速度のグラフを示す。ここで、サボ分離距離は 4 つに分離したサボそれぞれの衝突痕から弾道軸までの距離の平均としている。全ての速度域において、直径 7.10mm、7.15mm のサボは 7.05mm よりも分離距離が大きくなった。また、7.10mm、7.15mm のサボの分離距離はほぼ同一で、速度依存性は小さい。7.05mm のサボでは分離距離が小さく、ばらつきが大きい。これは直径 7.05mm ではバレルのライフレリングとサボが十分にかみ合わず、分離に必要な遠心力が得られていないためであると考えられる。実際、サボの分離距離が十分に得られず、サボがサボストッパーを通過してターゲットに衝突するケースも確認された。

これらの結果から、サボ径をランチチューブ内径より 0.1mm 以上大きくし、ライフレリングとしっかりかみ合わせることで、安定した分離距離を得られることがわかった。

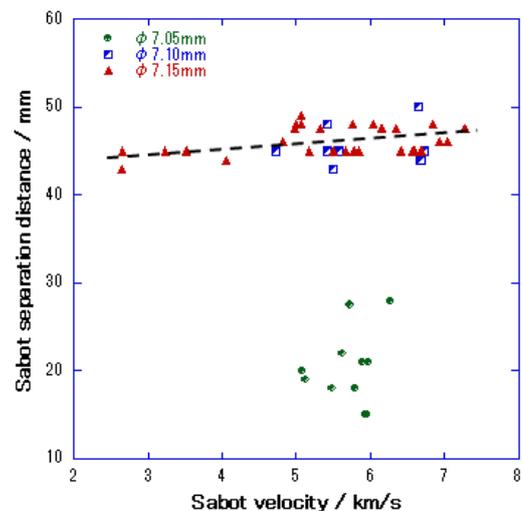


Fig.4 Relation between sabot separation distance from ballistic axis and sabot velocity

4.2 飛翔体の弾道誤差

サボと飛翔体の直径が弾道精度に及ぼす影響を調査するために、直径 0.1~1.0mm の飛翔体を用いて 2.5~7.0km/s の速度域で微粒子単体衝突実験を行った。図5、図6にそれぞれのサボ・飛翔体直径における弾道誤差と飛翔体速度のグラフを示す。ここで、弾道誤差は照準からの衝突点までの距離としている。図5は飛翔体直径 0.3mm 以上の実験結果を示している。弾道誤差に関して、飛翔体直径の影響は見られないが、速度が増加するにつれてわずかに増加する傾向が見られた。図6は 0.2mm 以下の実験結果を示している。7.05mm, 7.10mm サボに比べ、7.15mm サボで大きな誤差が生じている。これは他のサボに比べて径が大きいため、ランチチューブ挿入時にサボが変形し、飛翔体中心とサボの回転軸がずれたためと考えられる。

4.3 シングルパーティクルショット成功率

シングルパーティクルショットによる実験を行った結果、直径 7.10mm 以上のサボを使用することで、飛翔体直径 0.3mm で 80%, 直径 0.5mm 以上ではほぼ 100% に近い成功率で実験を行えるようになった。飛翔体直径 0.2mm 以下では、50% 程度まで成功率は向上した。飛翔体直径 0.2mm 以下ではスリット幅に対する飛翔体直径の比が小さいため、飛翔体が中心に固定できていない可能性がある。飛翔体中心が回転軸とずれると、回転による遠心力の影響で飛翔体の弾道が逸れてしまう可能性があり、このことが直径 0.2mm 以下の飛翔体での成功率の低下につながっていると考えられる。したがって、スリットをより薄くし、飛翔体をサボの中心に固定するため

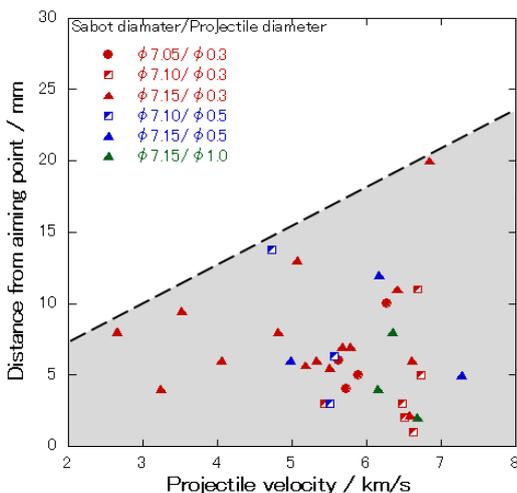


Fig.5 Relation between impact point distance from aiming point and projectile velocity (larger than 0.3mm in projectile diameter)

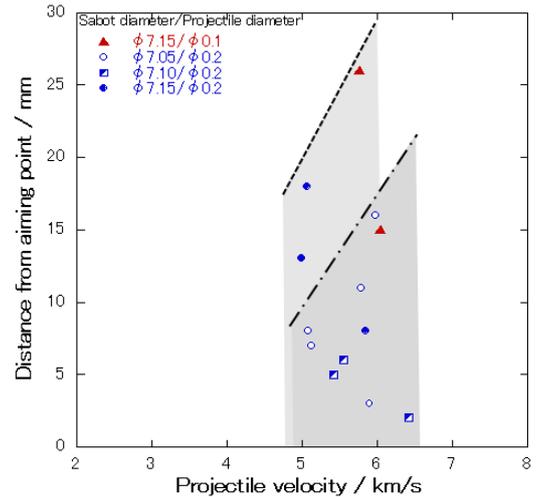


Fig.6 Relation between impact point distance from aiming point and projectile velocity (less than 0.3mm in projectile diameter)

に、刃厚 0.1mm のカミソリ刃などを用いてスリットを入れる必要があり、現在改良を試みている。

5. 結言

二段式軽ガス銃を用いたシングルパーティクルショットによる実験を高精度かつ定常的に実施できるようにするため、スリット導入型ナイロン 66 サボを用いて衝突実験を行った。その結果、サボ直径と銃身内径の比が微粒子単体衝突実験法の確立のため、直径 1.0mm 以下の飛翔体を用いて超高速衝突実験を行った。サボ径とランチチューブ内径の組み合わせがサボの分離距離や命中精度に強く影響することがわかった。本手法を用いることにより、直径 1.0~0.1mm の球形飛翔体を高精度かつ高確率で発射できるようになった。

参考文献：

- (1) Y.Motoyashiki et al., *Int. J. Impact Eng.* **35**, 1666 (2008).
- (2) B.G.Cour-Palais et al., *Int. J. Impact Eng.* **23**, 137 (1999)
- (3) N.Kawai et al., *Int. J. Impact Eng.* **38**, 542-545 (2011)