

# 成形爆薬を用いた超高速衝突実験法の研究(第2報)

三好 仁\*, 引地 誠\*\*, 木部勢至朗\*\*\*†, 戸田 勸\*\*,  
山本哲也\*\*\*\*††, 小林 充\*\*\*\*, 久納麻夫\*\*\*\*, 廣江哲幸\*\*\*\*\*

\*中国化薬株式会社企画部 〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-5-14 入江ビル  
e-mail: miyoshi@chugokukayaku.co.jp

\*\*中国化薬株式会社吉井工場火工開発部 〒370-2131 群馬県多野郡吉井町岩崎2530  
e-mail: hikiji@chugokukayaku.co.jp

\*\*\*宇宙航空研究開発機構 〒100-8260 東京都千代田区丸の内1-6-5 丸の内北口ビルディング  
†corresponding author: kibe.seishiro@jaxa.jp

\*\*\*\*三菱重工株式会社名古屋航空宇宙システム製作所研究部 〒455-8515 名古屋市港区大江町10  
††corresponding author: tetsuya\_yamamoto@mx.nasw.mhi.co.jp

\*\*\*\*\*熊本大学工学部知能生産システム工学科 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1  
e-mail: hiroe@gpo.kumamoto-u.ac.jp

2004年8月4日 受付 2004年11月2日 受理

## 要旨

成形爆薬で生成されるジェットから $10\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ の程度の超高速飛翔体を取り出す技術を用いて、軽ガスガン等の装置で得られるのと同様な約 $7\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ の速度の飛翔体を得る技術を確認した。成形爆薬の仕様では、薬種をオクトールからTNTに変更し、ライナ角を40度、ライナ厚さを4.2 mmとし、インヒビタについては円錐部高さを13.4 mm、ジェット入口径を20.0 mmとすることで、 $7.5\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ の速度、質量が1.4 gの飛翔体を得られた。

## 1. 緒言

地球軌道上に存在する超高速のスペース・デブリに対する人工衛星や宇宙ステーション等の宇宙機の防御構造を評価するため、成形爆薬を用いた超高速衝突実験法の研究を行ってきた。これまでの実験で成形爆薬にインヒビタ、スペーサ、防御板を組み合わせるにより、不要な低速のジェット要素やスラグを遮断して、 $10.6\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ および $9.6\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ の形状の整った単体の先端ジェットを取り出すことが可能になった。<sup>1)</sup>

宇宙機のデブリ防御構造評価において、飛翔体速度約 $6\sim 7\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ までは軽ガスガン等を用いて数多くの有効なデータが取得されているが、これ以上の速度を安定して得ることはこれまでの射出装置では困難である。

成形爆薬を用いて得られた超高速飛翔体は、軽ガスガン等で使用される飛翔体とは以下に示すような異なる特性を示す。すなわち、(1)形状が完全球体でない、(2)飛翔体の相状態は固体と液体の混相状態である、(3)内部エネルギーが異なる。

このうち、(3)については標的損傷に与える影響は小さく、形状や質量の影響が大きいという報告がある。<sup>2)</sup> 実際のスペース・デブリがすべて球体であり、完全な固相であるとは言え

ないが、飛翔体速度 $6\sim 7\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以下が得られる軽ガスガン等による方法とそれ以上の速度が実現できる成形爆薬による方法が、共通の土台での議論を可能にし、成形爆薬法の試験としての有効性を確実にして行くことが必要だと考えた。このような観点から成形爆薬の先端ジェット速度としては比較的低速な $6\sim 7\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ を得るための実験を企画した。<sup>3)4)</sup>

## 2. 理論

成形爆薬の先端ジェットは銅ライナとオクトールの構成では $10\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ 程度であるが、理論的に $6\sim 7\text{ km}\cdot\text{sec}^{-1}$ の速度の仕様が達成可能かどうか理論的な検討を行った。

ジェット生成に関するPER (Pugh, Eichelberger, Rostoker) 理論<sup>5)</sup>におけるライナ崩壊過程をFig. 1に示す。爆轟波はライナに沿って点Pから点Qに移動するが、点Qに達したとき点Pにあったエレメントがライナの法線と $\delta$ の角をなす方向に崩壊し、ライナ軸上の点Jに到達するものとする。このとき崩壊するライナはQMJの曲線を示す。ライナの崩壊速度 $V_0$ が一定であれば点Pが点Jに到達したとき、点P'は点Nに達するはずであるが、実際にはP'の崩壊速度がPよりも低速であるために、点Mに存在する。

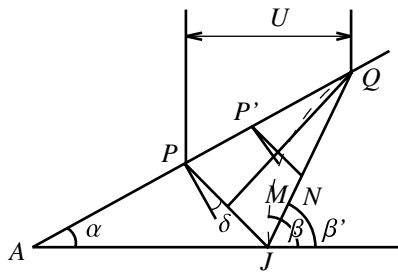


Fig. 1 Liner collapse process of the shaped charge.

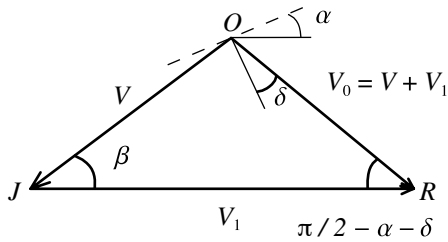


Fig. 2 Jet formation stage on the stagnation point with a moving coordinate system.

移動座標系で結合点 $J$ (stagnation point)の状態を見ると Fig. 2が成立する。ライナの軸線は $\overline{JR}$ で、 $\overline{OJ}$ はライナエレメントが軸に向かって移動するライン、 $\overline{OR}$ はライナエレメントが崩壊するラインを示す。座標の移動速度、ライナの流入速度およびライナの崩壊速度はそれぞれ $V_1$ 、 $V$ および $V_0$ であり、正弦定理により次の関係が導かれる。

$$V = \frac{V_0 \cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta} \tag{1}$$

$$V_1 = \frac{V_0 \cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta} \tag{2}$$

結合点にBernoulliの定理を適用すると、流れの速度 $V$ は同じ速度で方向が反対の2つに分かれる。その一つはジェット velocity  $V_j$ となり $V_1 + V$ で表され、他方がスラグの速度 $V_s$ となり $V_1 - V$ で表されるから、式(1)と式(2)からジェットとスラグの速度は次の式で表される。

$$V_j = V_0 \frac{\cos\left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \tag{3}$$

$$V_s = V_0 \frac{\sin\left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \tag{4}$$

ライナの崩壊現象は爆轟波によって金属板が曲げられることにより開始されるが、この角度 $\delta$ はTaylor角と呼ばれDefourneauxが提案した次の式により決定される。<sup>6)</sup>

$$\frac{1}{2\delta} = \frac{1}{\phi_0} + \frac{\rho K}{e} \tag{5}$$

ここで、 $\rho$ はライナの密度、 $e$ はライナの厚さ、 $K$ は炸薬の厚さ、 $\phi_0$ は炸薬の種類、および爆轟波がライナとなす角によって決定される定数である。

これらの式をまとめた形の成形爆薬特性解析コードBASC<sup>7)</sup>を用いて、6~7 km・sec<sup>-1</sup>のジェット生成の可能性を試算したところ、ライナをやや厚めにして爆速の遅いTNTを使用することで実現できることが確認できた。さらにAUTODYN<sup>®</sup>-2Dで仕様検討のための解析を行った。

解析モデルを前報のFig. 2と同一で、Subgrid構成は、爆薬部分はEuler、ライナはShell、容器および起爆部押さえはLagrangeとした。爆薬はTNTとし、ライナの角度と厚さをパラメータとして、ジェットの先端速度を計算した。

計算結果をFig. 3に示すが、ライナ厚さ42mmでライナ角度40および50度、ライナ厚さ6.3mmでライナ角度40度の構成でそれぞれ6.74、6.15および5.94 km・sec<sup>-1</sup>の予測値が得られ、この3種類で確認実験を行うこととした。

### 3. 実験方法および結果

#### 3.1 フリージェット試験

決定したライナ仕様での先端ジェットの速度を確認するために、インヒビタを組み込まない状態で成形爆薬のフリージェットの速度を計測した。試験セットアップは前報<sup>1)</sup>のFig. 7に示したものとほぼ同じである。フラッシュX線(Scandiflash Model 450)の2チャンネルの照射タイミングを速度予測値に応じて変化させ、フィルム上にフリージェットの画像を捉え、形状および位置関係からジェット速度を算出した。今回は箔的による速度計測も実施し、2枚のX線フィルムの間と2枚目のフィルムとターゲットの間の2箇所を箔的を設置した。フリージェットが箔的を貫通した際に発生する信号の時間差からジェット速度を計測した。

計測結果をTable 1に示すが、ライナタイプAおよびBで2組ずつのデータは同一の実験でのデータである。フラッシュX線の写真から算出した速度と箔的で計測した速度の値は誤差2%以内に入っており、それぞれの方法および速度の値の妥当性が確認できた。計算結果との比較でジェット速度は、A、BおよびCのライナタイプで実測値の方がそれぞれ3.1、6.3および17.3%速い値を示している。

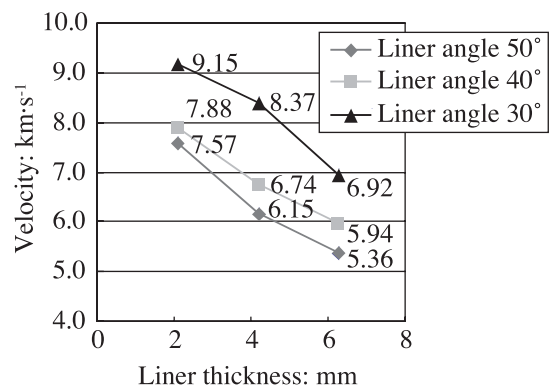


Fig. 3 AUTODYN<sup>®</sup>-2D analysis results.

Table 1 Results of the free jet velocity tests.

| Liner type | Liner thickness (mm) | Liner Angle (deg) | Test results (km·s <sup>-1</sup> ) |             | Analysis results (km·s <sup>-1</sup> ) |
|------------|----------------------|-------------------|------------------------------------|-------------|--|
|            |                      |                   | Flash X-ray                        | Foil sensor |  |
| A          | 4.2                  | 40                | 6.86                               | 6.82        | 6.74                                   |
|            |                      |                   | 7.12                               | 6.99        |  |
| B          | 4.2                  | 50                | 6.53                               | 6.42        | 6.15                                   |
|            |                      |                   | 6.61                               | 6.54        |  |
| C          | 6.3                  | 40                | 6.95                               | 6.95        | 5.94                                   |

この原因については次のように考えた。低速なジェットを得るために爆薬をオクトールからTNT単体に変えたが、TNTは起爆感度がやや鈍感であることを考慮してテトリルの伝爆薬の形状をΦ20mm×20mmからΦ30mm×20mmと薬量で10gから22.5gと大きめにした。当初の計算モデルでは点起爆として計算しライナタイプAで6.74 km·sec<sup>-1</sup>を得たが、伝爆薬の径を大きくしたことから面起爆の設定に変化させて再計算を行った。再計算値は7.46 km·sec<sup>-1</sup>のジェット速度となった。ジェット生成理論を模式的に表現したFig. 1は点起爆の状態を示しているが、面起爆の場合は起爆点がAJの線上より上部にも来ることになり、ライナが軸上で衝突する点Jが手前に移動する。従って角βは小さくなり、式(1)からVの値が大きくなる。同様に式(3)においてもV<sub>J</sub>が大きくなる。このような考察から、面起爆効果によりジェットの速度が速くなったと言える。

ただ、この計算値は実測値より約5%速い数値となっているが、成形爆薬の試験でジェット速度における通常のばらつきの範囲と判断した。また、AUTODYNでの計算が理想的なジェット生成を示していること、さらにジェット生成に大きく影響する爆薬の爆轟圧の差(TNT:18.9, オクトール:34.4 MPa)も無視できないと考えている。

試験した3タイプのうちBはライナ角度が大きいため、ジェット先端を取り出すためのインヒビタの仕様最適化が難

しいと予測されること、Cはライナが厚いためこれまでの経験からジェット生成が不安定になると予測されることから、最終的にライナタイプAを選定した。

3.2 インヒビタ仕様設定試験

銅製インヒビタの形状をFig. 4に示すが、円錐部高さHと入口径diをTable 2のように変化させて試験を実施した。Case-5は今回の成形爆薬ロットのフリージェット速度を確認するために、インヒビタを装着しない状態での試験に使用した。フラッシュX線写真の解析からフリージェット速度は7.5 km·sec<sup>-1</sup>とフリージェット試験での速度よりやや速かった。試験セットアップは3.1と同等であるが、先端ジェットをより正確な形状として得るために、箔的は設置しなかった。

インヒビタの仕様と先端ジェット形状の結果をFig. 5に示す。インヒビタの円錐部高さHと入口径diには、Fig. 5の斜線部に示すように最適の仕様が存在する領域と考えられる。一般的にはHが長い場合、ジェットを阻止する部分が長いことから得られる先端ジェットは量的に少なくなり、Hが短いとジェットの量は増えるものの、後続のスラグを遮断できなくなる。一方diに関しては、径が小さいと先端ジェットとの干渉が大きくなり、大きな径ではスラグを遮断することができなくなる。

現段階では、Case-2およびCase-3が最適であると考えられるが、Case-3の場合後続のスラグを十分に遮断できていなかった。これは、Hとdiの一般的な考察に合致する結果だが、さらに実験回数の蓄積が必要と考えている。このような考察から、Case-2の仕様H=13.4mm, di=20.0mmのインヒビタを選定した。

先端ジェットの質量を推定するために、先端ジェット像と

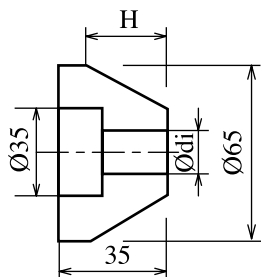


Fig. 4 Dimension of the inhibitor.

Table 2 Test parameters of the inhibitor.

| Test case | di (mm) | H (mm) |
|-----------|---------|--------|
| Case-1    | 20.0    | 10.4   |
| Case-2    | 20.0    | 13.4   |
| Case-3    | 17.0    | 10.4   |
| Case-4    | 17.0    | 13.4   |
| Case-6    | 20.0    | 15.0   |
| Case-7    | 15.0    | 10.4   |

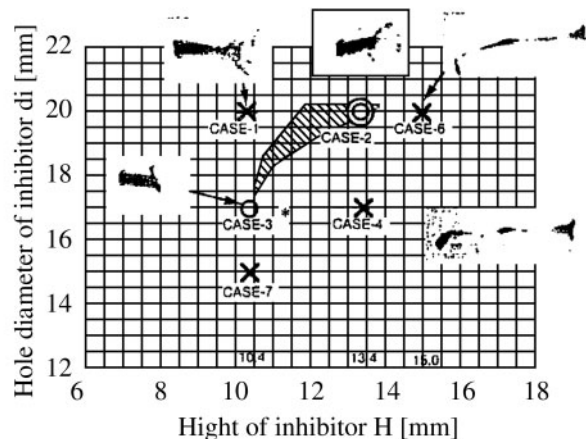


Fig. 5 Results of the inhibitor tests.

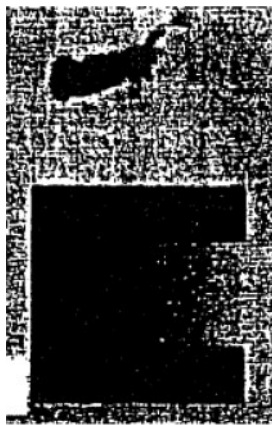


Fig. 6 The inhibited tip jet image.

共にアルミ製参照体を写し込んだ。それぞれの濃度を比較参照する画像処理により、先端ジェットの質量値を求めた。Case-3の場合をFig. 6に示すが、ジェットは向かって左に進行しており、撮影位置は成形爆薬のライナベース部から690 mmの距離の点である。解析の結果、Case-3の先端ジェットの質量は1.43 gであった。

#### 4. 結論

速度が6~7 km・sec<sup>-1</sup>のフリージェットが得られる成形爆薬のライナ仕様を決定し、目標の先端ジェットを取得するための最適のインヒビタの仕様を決定した。しかし、後続のスラグ等

の微小飛翔物を完全に遮断するためには防御板(前報Fig. 6, Defense plate)の仕様を含めて総合的に検討する必要がある。

また、実際のスペース・デブリと同等の環境下での知見を得るために、真空セットアップでの試験も必要と考えている。さらに、6~7 km・sec<sup>-1</sup>の低速度領域における軽ガスガン等の射出装置との比較・検証を行うために、基準標的を用いた衝突実験を行い、その結果を評価する必要がある。

#### 文 献

- 1) 三好仁, 引地誠, 木部勢至朗, 戸田勸, 山本哲也, 小林充, 久納麻夫, 廣江哲幸, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 65, pp. 71-76 (2004).
- 2) M. Katayama, A. Takeba, S. Toda, and S. Kibe, 23, pp. 443-454 (1999), *International Journal of Impact Engineering*.
- 3) 戸田勸, 木部勢至朗, 山本哲也, 小林充, 久納麻夫, 三好仁, 引地誠, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 719-722 (1999), 衝撃波研究会.
- 4) 戸田勸, 木部勢至朗, 山本哲也, 小林充, 久納麻夫, 三好仁, 引地誠, 平成11年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 549-552 (2000), 衝撃波研究会.
- 5) E. Pugh, R. Eichelberger, and N. Rostoker, *J. Appl. Phys.*, 23, pp. 532-536 (1952).
- 6) H. Defourneaux and L. Jacques, *Proceedings Fifth Symposium (International) on Detonation*, Office of Naval Research Department of Navy, pp. 457-466 (1970).
- 7) J. T. Harrison, *Ballistic Research Laboratory*, ARBRL-TR-02300, ADA100275 (1981).

---



---

## Study of hypervelocity impact testing using a shaped charge (II)

Hitoshi Miyoshi\*, Makoto Hikiji\*\*, Seishiro Kibe\*\*\*†, Susumu Toda\*\*\*, Tetsuya Yamamoto\*\*\*\*†, Mitsuru Kobayashi\*\*\*\*, Asao Kunoh\*\*\*\*, and Tetsuyuki Hiroe\*\*\*\*\*

The technique of forming a high velocity projectile at over 10 km sec<sup>-1</sup> from a shaped charge jet was applied to produce a projectile at about 7 km sec<sup>-1</sup>. The velocity was easily obtained by using conventional launchers, e.g. a two stage light gas gun. The result of this study is to be effectively used to evaluate the penetration performance of the two types of the projectiles that have the same approximate velocity. The type of explosive used was changed to TNT from octol. The liner angle was 40 degree, the liner thickness 4.2 mm, and the height of cone part of the inhibitor was 13.4 mm with a hole diameter for the inhibitor at 20.0 mm. The resulting projectile had the velocity of 7.5 km sec<sup>-1</sup> and the mass of 1.4 gram.

\*Project Division, Chugoku Kayaku Co., Ltd. 4-5-14 Nihonbashi-honcho, Chuo-ku, Tokyo 103-0023, JAPAN  
e-mail: miyoshi@chugokukayaku.co.jp

\*\*Yoshii plant, Chugoku Kayaku Co., Ltd. 2530 Iwasaki, Yoshii-machi, Gunma 370-2131, JAPAN  
e-mail: hikiji@chugokukayaku.co.jp

\*\*\*Japan Aerospace Exploration Agency, 1-6-5 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8260, JAPAN  
†corresponding author: kibe.seishiro@jaxa.jp

\*\*\*\*Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 10 Oye-cho, Minato-ku, Nagoya 455-8515, JAPAN  
††corresponding author: tetsuya\_yamamoto@mx.nasw.mhi.co.jp

\*\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN  
e-mail: hiroe@gpo.kumamoto-u.ac.jp