

成形爆薬を用いた超高速衝突実験法の研究 (第1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^{****}

* 中国化薬株式会社吉井工場火工開発部 〒370-2131 群馬県多野郡吉井町岩崎2530

† corresponding author: miyoshi@chugokukayaku.co.jp

** 宇宙航空研究開発機構 〒105-8060 東京都港区浜松町2-4-1 世界貿易センタービル

†† corresponding author: kibe.seishiro@jaxa.jp

*** 三菱重工業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3月1日 受付 2004年4月26日 受理

要 旨

人類の宇宙空間での活動に伴い生成されたスペース・デブリが、運用中の宇宙機と衝突する危険性が指摘されており、宇宙機保護用のバンパーの開発が進められている。バンパーの評価のために、数 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の高速飛翔体を衝突させる必要があり、様々な射出装置が提案されている。10 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度の飛翔体を得るために、成形爆薬で生成されるジェットに注目し、先端部分だけを取り出す方法を検討し、インヒビタや防御板を組み合わせ後追いジェットやスラグを取り除いて、先端ジェットだけを取り出す方法を確立した。

1. 緒言

1.1 スペース・デブリの現状

人類はこれまでに宇宙を無限の空間として宇宙活動を行ってきたが、近年になり静止軌道、低軌道等の宇宙活動にとって有益な空間では、これまでに打ち上げられた衛星やロケットの残骸、放出物、爆発破片等が増加してきており、運用中の衛星や宇宙ステーションとそれらとの衝突の危険性が生じることが確認されている。これらの不要の人工物体をスペース・デブリという。¹⁾

スペース・デブリが宇宙機に衝突する危険性を回避する対策の一つとして、衝突確率の高い微小スペース・デブリに対しては衝突しても宇宙機が壊滅的な被害を受けない様な防御構造（以下、バンパーという）を備えることが考えられている。

宇宙空間における物体同士の相対速度は数 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の超高速となり、スペース・デブリが宇宙機に衝突して起こる損傷を評価し予測するには、実験的に衝突現象を再現することが必要になってくる。

1.2 バンパーの評価と研究目標

バンパーの開発では、数百 $\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ から10 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上まで種々の速度で、質量数gのアルミ片等の模擬スペース・デブリを衝突させ、機能を評価する試験を行う。

超高速の飛翔体を得るための射出装置については多くのものが提案されているが²⁾、現実的なものとしては速度に応じて1段式ガス・ガン、2段式軽ガス・ガン、レール・ガン、成形爆薬を用いたものの4種類があげられる。この中で10 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上のアルミ飛翔体を得られるのは成形爆薬を用いた方法だけであり、米国³⁾、欧州、日本において実用化のための研究が実施されている。日本では筆者らが1989（平成元）年より基礎研究を実施してきている。⁴⁾ 本研究における目標は、「速度10 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上、質量1 g程度の単一アルミ飛翔体を安定して得ること」である。

2. 理論

2.1 成形爆薬ジェット生成理論

成形爆薬 (Conical shaped charge: CSC) はFig. 1に示すように、円筒形の爆薬の窪み部分に円錐形の金属ライナをはめ込んだ形で構成される。爆薬の爆轟圧により、ライナを大変形させて中心軸上に集中させ、ジェットと呼ばれる金属の連続体を高速で射出するものである。成形爆薬によって生成されるジェットは進行方向に速度勾配を持つため、飛翔距離の増加に伴い長さが伸びて、ある時点で破断して長さ10 mmから数mmの粒状になる。これをブレイクアップと呼んでいる。また、ジェットに遅れてスラグと呼ばれるライナの残留生成物が速度数百 $\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度で放出される。⁵⁾

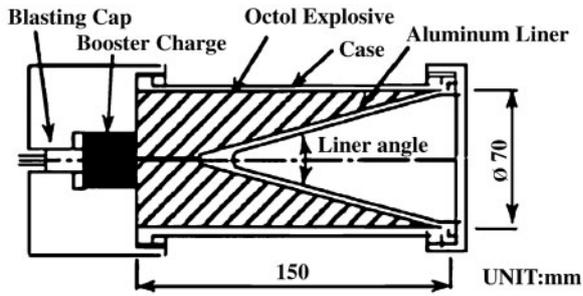


Fig. 1 Shaped charge configuration.

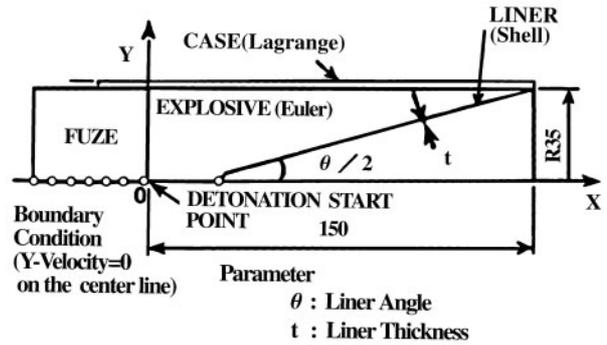


Fig. 2 Geometrical modeling by AUTODYNR-2D.

成形爆薬ジェットの生成理論は、1948年にBirkhoffら⁶⁾がライナの崩壊過程を幾何学的に解析することで最初に定常状態のジェット生成理論を発表した。その後、Pugh, Eichelberger及びRostoker⁷⁾は、ライナの崩壊速度が変化するを非定常状態で展開したPER理論を構築し、実際の現象を理論的に説明できるようになった。

2.2 ジェット生成の解析

ジェット生成とブレイクアップ、標的の侵徹等の成形爆薬の全般を解析するコードとしては、DYNA, EPIC, HEMP, HULL, AUTODYN, PISCES等が知られているが、本研究ではAUTODYN-2Dを使用してジェット生成に関する解析だけを行った。AUTODYN-2DではLagrangeとEuler Processorが併用可能で、ライナ部にShell subgridを採用することで、ジェット生成の解析ができるジェットオプションを使用して、目標のジェットが得られる最適な仕様が決定可能である。さらに、成形爆薬の各現象を数学的に解析したBASC⁸⁾と呼ばれるコードで、AUTODYN-2Dの解析結果の確認も行った。仕様決定に使用したAUTODYN-2Dの軸対象の解析モデルをFig. 2に示す。

ジェット生成の解析に使用される図表は数多くあるが、ライナ位置に対応したジェット速度分布のグラフ⁹⁾に注目した。Fig. 3にこの関係を示すが、ライナを分割した各要素

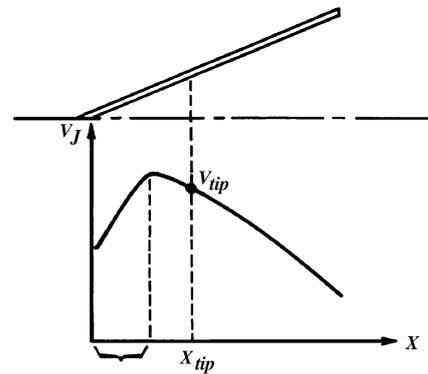


Fig. 3 A typical jet velocity distribution curve.

の中心軸上でのジェット速度を示している。ジェット速度が最高に達するまでは、各ジェット要素は後から生成するジェット要素に追突される形が続き、ジェット質量が蓄積される。最高速度に達した後は、そのジェット要素が先頭になって進行し、後のジェット要素を従える形でジェット全体の長さが伸びていく。

研究目標の速度10 km・sec⁻¹以上、質量1gのジェットが

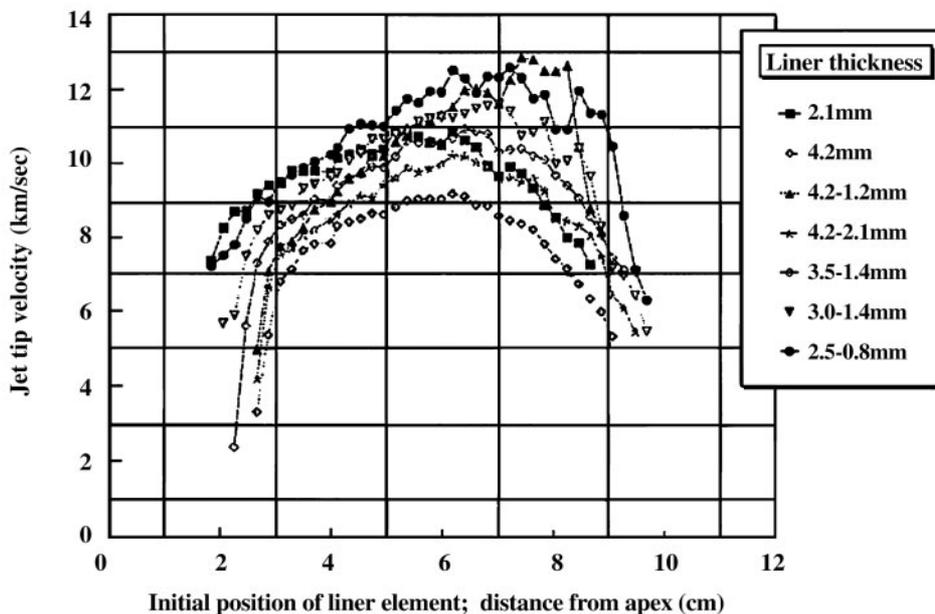


Fig. 4 Calculated jet velocity of each line element.

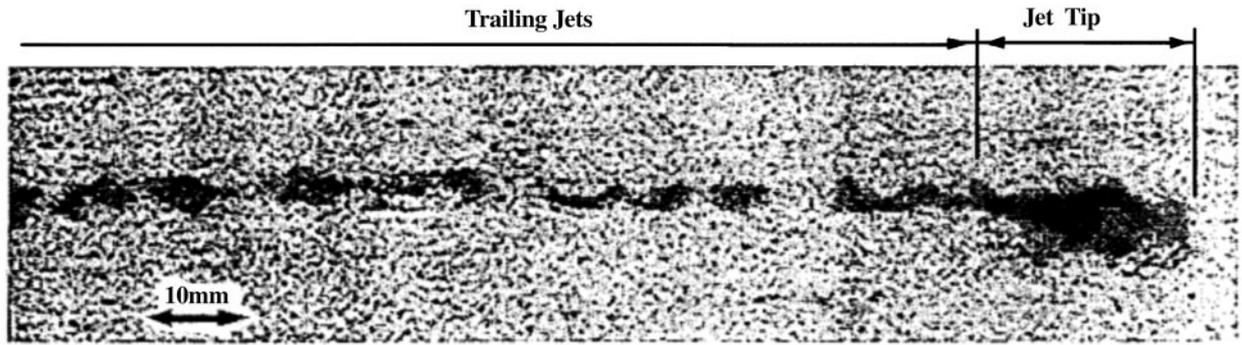


Fig. 5 Flash X-ray image of jet from shaped charge with aluminum liner.

得られる仕様を確定するには、最高速度に到達するのがライナの頂点からなるべく離れた位置であることが望ましく、ジェット要素が後から先頭のジェット要素に追突し続けることでジェット質量が累積され、目標が達成できることになる。このような観点から解析を行った例をFig. 4に示す。

3. 実験方法

3.1 ジェットの飛翔状態

成形爆薬で生成されるジェットは使用する爆薬の種類及びライナの材質によって8~12 km・sec⁻¹であることが知られている。このような超高速のジェットを可視化する方法としては、Streak Cameraを使用した例もあるが、薬量の制限や成形爆薬の爆轟により発生する衝撃波や爆風を考慮して、X線照射部だけを爆源近くに置き、その他の機器は遠隔に設置可能なフラッシュX線撮影装置 (Scandiflash Model 450) を使用した。実験は中国化薬株吉井工場及び江田島工場の爆発試験壕で行った。Fig. 5にアルミライナの

CSCで生成されたジェット全体のうち、先端部分についてのX線写真を示す。時間差を付けて撮影した2枚のX線写真から、ジェット先端の速度は9.64 km・sec⁻¹であり、先端ジェットの質量は実寸換算から0.5 gであることを確認した。

3.2 後追いジェットとスラグの分離

Fig. 5に示したように、ジェットは先端部に質量が累積された部分があり、その後には後追いジェットが存在する。さらにX線写真には速度時間差が大きいためフィルム上に写っていないが、遙か後方にはスラグも存在する。前述の研究目標を達成するためには、速度の最も早い先端ジェットのみを取り出し、不要な後追いジェット及びスラグは分離する必要がある。

この不要部を分離する方式としては、飛翔板方式、シャッター方式、インヒビタ方式等が提案されているが¹⁰⁾、事前確認試験等でインヒビタ方式での効果を確認した。インヒビタの高さとジェット入口孔径を変化させて、最適の形状を決定した。

実験を進める過程でライナの空隙部に装着するインヒビタに加えて、スペーサと防御板を追加することにより、後追いジェット等を遮断することが可能になった¹¹⁾。このインヒビタ/スペーサ/防御板の構成をFig. 6に、試験のセットアップをFig. 7に示す。X線フィルム容器はウレタンフォームやベニヤ板で保護し、爆風で変形しないように固定せずに規定の位置に置くだけになっている。

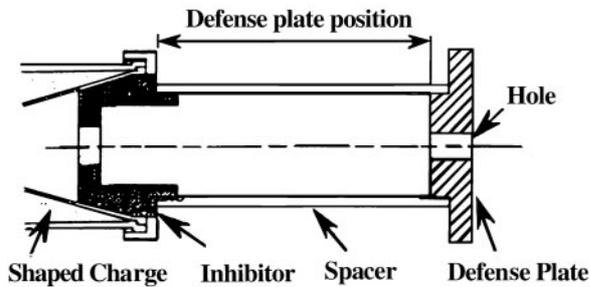


Fig. 6 Configuration of inhibitor, spacer and defense plate.

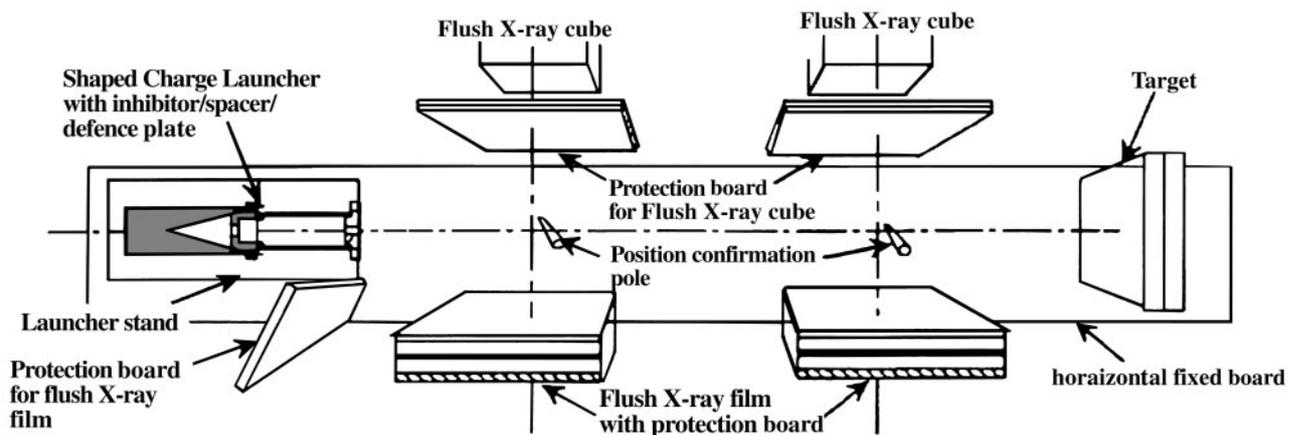


Fig. 7 Test set-up in the atmosphere.

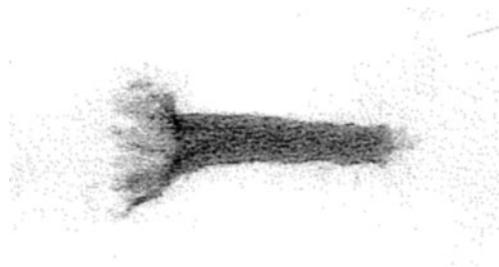


Fig. 8 Flash X-ray image of inhibited jet tip that distance from CSC base is 428 mm.

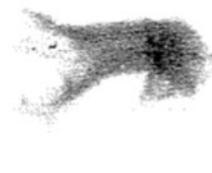


Fig. 9 Flash X-ray image of inhibited jet tip that distance from CSC base is 960 mm.

Table 1 Inhibited jet tip profile.

Distance from CSC base: mm		Jet tip in the Fig. 8	Jet tip in the Fig. 9
Mass of jet tip: g	Measured	1.66	1.15
	Calculated	2.12	
Velocity of jet tip: km · sec ⁻¹	Measured	10.54	
	Calculated	10.55	

4. 結果

分離されたジェットのX線写真の例をFig. 8とFig. 9に示す。AUTODYNによる解析と実験の結果をTable 1に示す。Table 1に示すように、先端ジェットの速度は予測どおりであったが、質量は空気抵抗により減少した。この現象を確認するため真空中での実験を行った。真空状態を模擬した試験装置のセットアップをFig. 10に示す。この装置ではCSCを縦置きに設置し、標的の上方からジェットが飛翔する設定を取った。

また、バンパーの評価には様々な速度の飛翔体が必要とされることから、9 km · sec⁻¹程度の速度も新たな研究目標として追加した。¹²⁾

試験結果をTable 2にまとめる。ジェットの質量は真空中では大気中に比較して大きくなっており、真空中での空気抵抗が減少したことによりジェット形状の崩れが小さいものと考えられる。ジェットの速度も真空中では0.3 km · sec⁻¹速くなっており、これも空気抵抗が要因と推定できる。9 km · sec⁻¹仕様でジェット速度が解析値より約0.7 km · sec⁻¹速くなっている。計測系を含めて原因の検討を行う。

分離されたジェットをバンパーに衝突させた状況をフラッシュX線で撮影した。また、インヒビタの最適化を測るために、高さと孔径を変化させて試験を行った。それぞれの写真をFig. 11及びFig. 12に示す。¹³⁾ これらの写真では楔形に成形したアルミ片を画像に写しこみ、撮影されたジェ

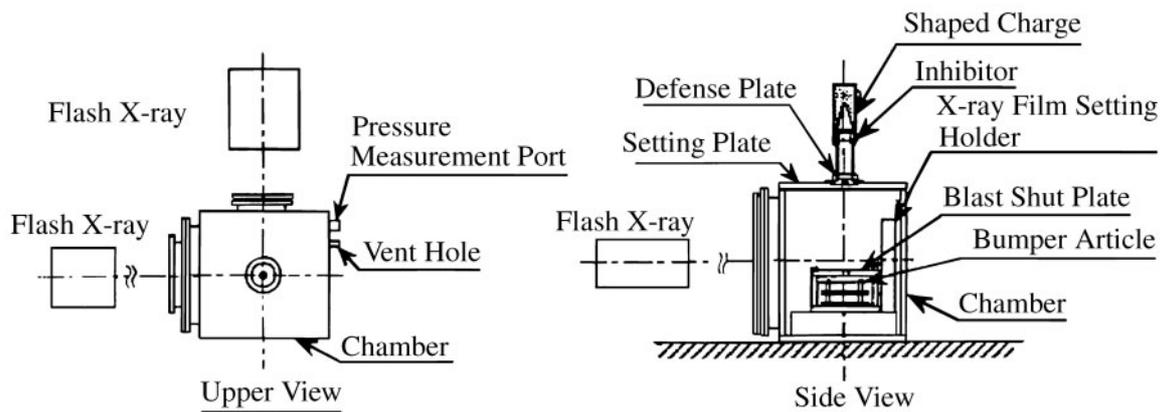


Fig. 10 Test set-up for vacuum condition.

Table 2 Inhibited jet tip profile in the atmosphere and vacuum.

		10.6 km · sec ⁻¹ required		9 km · sec ⁻¹ required
		Atmosphere	Vacuum	Atmosphere
Mass of jet tip: g	Measured	1.91	2.09	2.38
	Calculated	2.12		2.42
Velocity of jet tip: km · sec ⁻¹	Measured	10.5	10.9	9.67
	Calculated	10.55		8.95

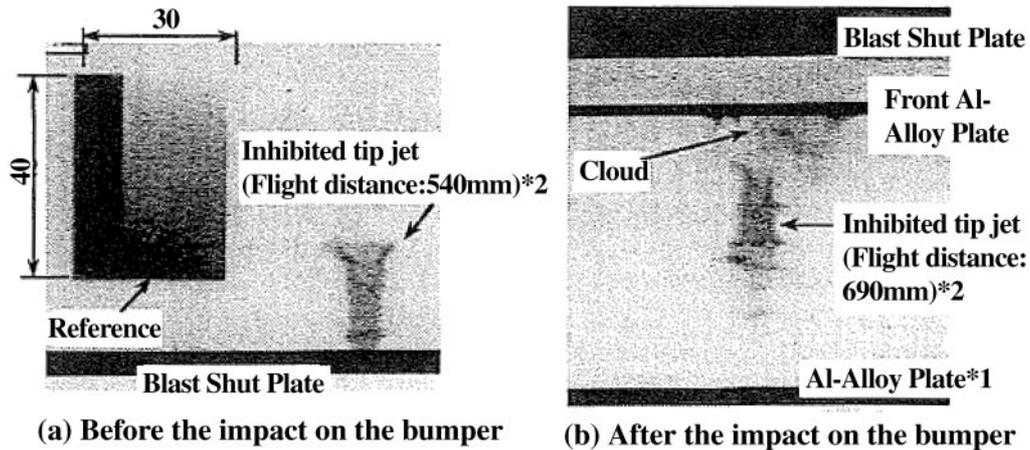


Fig. 11 Inhibited jet tip image penetrating Al-Alloy plate.

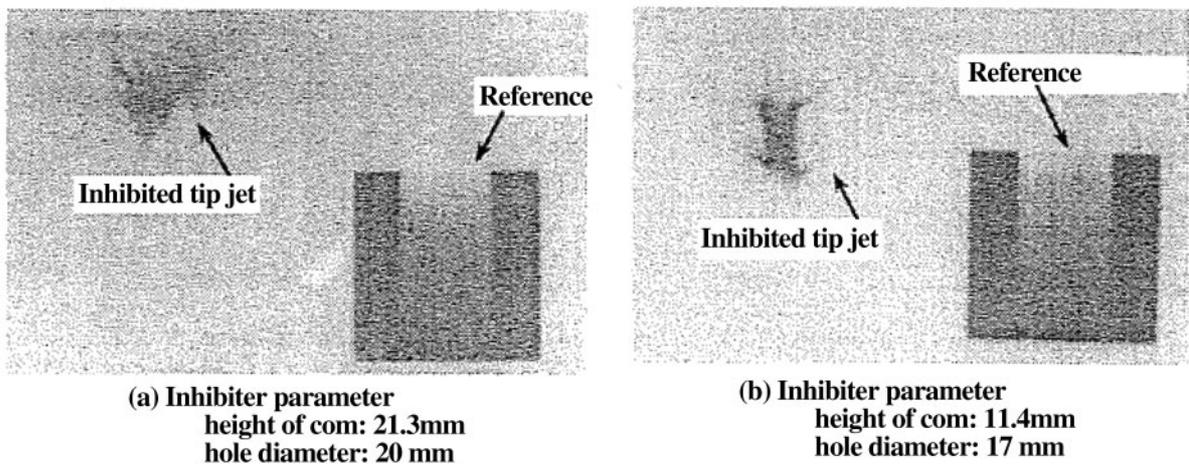


Fig. 12 Inhibited jet tip image with being different from inhibitor parameters.

ットと濃度を比較することにより、ジェットの質量を求めた。Fig. 11での標的は、他のバンパーで使用される繊維状の詰め物の代わりとなるアルミ合金板である。Fig. 11 (b)で標的を通過したジェットはCSCのベース部から690 mm 飛翔したもので、速度は $10.6 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$ である。Fig. 12ではインヒビタの仕様でジェットの形状変化を確認し、高さ11.4 mm、孔径17 mmで良好なジェットが得られている。なお、速度は $9.6 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$ である。

5. 結論

成形爆薬とインヒビタや防御板等を組み合わせることで、不要物を遮断した整った形状の約10及び9 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 仕様の飛翔体を得られた。成形爆薬のジェット生成理論を基本にした数値解析と実験結果との整合性が確認できたことで、バンパー評価用に様々な速度の飛翔体を得ることが可能になる。

高速飛翔体を得る手段として一般的な軽ガスガンでの貫徹データは数多く取得されてきたが、このガンでは貫徹限界 (Ballistic limit) 近くの質量を7 $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上に到達させるのは困難であるため、成形爆薬法でそのような速度の飛翔体を作ることを検討する。

文 献

- 1) 日本航空宇宙学会, 「スペースデブリ対策設計基準の調査検討」, 1994, 平成5年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書.
- 2) Committee on Space Debris, "Orbital Debris, A Technical Assessment", pp.103-107 (1995), National Academy Press.
- 3) D. Walker, D. J. Grosch, and S.A. Mullin, International Impact Engineering, 14, pp.763-774, 1993.
- 4) K. Ogasawara, M. Toyoma, M. Kunoh, H. Miyoshi and M. Hikiji, 43rd Congress of the International Astronautical Federation, IAF-92-0333 (1992), The International Astronautical Federation.
- 5) W. P. Walters, and J. A. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges", pp.1-9 (1989), John Wiley & Sons.
- 6) G. Birkhoff, D. MacDouglass, E. Pugh, and G. Taylor, J. Appl. Phys. 19, pp.563-582 (1948).
- 7) E. Pugh, R. Eichelberger, and N. Rostoker, J. Appl. Phys., 23, pp.532-536 (1952).
- 8) J. T. Harrison, Ballistic Research Laboratory, ARBRL-TR-02300 (1981).
- 9) P. C. Chou, and W. J. Flis, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 11, 99 (1986).
- 10) 小林充, 久納麻夫, 三好仁, 引地誠, 戸田勲, 木部勢至朗, 平成6年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 521-524 (1995), 衝撃波研究会.

- 11) 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7年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.223-226 (1996), 衝撃波研究会.
- 12) 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8年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.221-224 (1997), 衝撃波研究会.
- 13) 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.
-
-

Study of hypervelocity impact testing using a shaped charge (I)

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

This paper proposes a new technique of hypervelocity impact testing method using a shaped charge. For the development of a bumper to protect spacecrafts from space debris impact, hypervelocity impact testing has been studied. The speed of conical shaped charge jet tip is over $10 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$, but trailing jets and slug are needless for impact testing. To remove the needless matters from the shaped charge, the inhibitor method and defense plate system were tested and its effectiveness and problems were identified.

*Chugoku Kayaku Co. Ltd., 2530 Iwasaki, Yoshii-machi, Gunma 370-2131, JAPAN

**Japan Aerospace Exploration Agency, 2-4-1 Hamamatsu-chou, Minato-ku, Tokyo 105-8060, JAPAN

***Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 10 Oye-cho, Minato-ku, Nagoya 455-8515, JAPAN

****Kumamoto University, Department of Mechanical Engineering and Materials Science, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN
