

# リニアシェイプトチャージ (LSC) ジェットの侵徹特性

三好 仁\*, 大羽博道,\*\*†, 黒岩恵美子\*\*,  
井上達也\*\*, 北村秀樹\*\*, 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  
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

†corresponding author: ohba@chugokukayaku.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6月7日 受付 2004年7月14日 受理

## 要旨

リニアシェイプトチャージ (LSC) の侵徹性能を把握するために、円筒型の成形爆薬で実施されている実験方法を基にした基礎的な試験を実施した。フラッシュX線でLSCジェットを撮影し、アルミシースLSCでジェット先端速度が約 $2,400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であることを確認した。絶縁材と鋼板を交互に積層した対象物とパルスジェネレータ・デジタルオシロスコープを組み合わせた鋼板侵徹試験により侵徹速度が算出できたが、鉛・アルミシースLSCともに予想外に遅く、高速域でも $1,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であることが分かった。今回採用した実験方法はLSCの性能向上を図るための研究に有効である。

## 1. 緒言

リニアシェイプトチャージ (LSC: Linear shaped charges, V型成形爆破線) は発生するジェットの切断機能を活用してビル、鉄橋、クレーン等の大型構造物の解体、H-IIA ロケットの第1段エンジンの分離、さらに緊急事態が発生してロケットの制御が不可能になった場合の指令破壊等に使用されている。

爆薬にくぼみを作り、そこに金属板を置き、爆薬の爆轟により指向性を持った金属の高速連続体であるジェットを生成する成形爆薬 (Shaped charges) は、この現象を1883年に発表した功績者の名前から von Forster 効果、1888年にこの現象を発表した研究者の名前から Munroe 効果、あるいは1910年代に侵徹威力向上を図った研究者にちなんで Neumann 効果と呼ばれる。成形爆薬には一般的な円筒型の CSC (Conical shaped charges) と LSC が知られている。

生成されたジェットは数千 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の速度で飛翔して対象物を侵徹 (Penetration) するが、このような高速現象下では物質の材料強度より密度が侵徹の支配的要因となり、物質を非圧縮性流体として取り扱うことが可能であり、流体力学の基礎的な理論である Bernoulli の定理で侵徹機構が説明できる<sup>1)</sup>。

侵徹性能の向上にはジェットの侵徹速度を増加させ、ジェットが延伸する際に破断 (Break-up) して粒子化する

ことを抑える必要がある。CSC では侵徹速度の計測や、フラッシュX線撮影によりブレイクアップ現象の確認等が実施されてきているが、LSC ではそのようなデータ取得が行われていない<sup>2)3)</sup>。

著者らは高侵徹威力を持つLSCの開発を目標としており、本報ではLSCの基本的な特性を把握するための実験方法の考案と、これらの実験により取得されたデータの分析及びシミュレーションを行ったので報告する。

## 2. 理論

ジェットによる侵徹現象を表現する侵徹速度の式は次のような考察から導き出される<sup>1)</sup>。

ジェットが対象物を侵徹する状態を、対象物が速度 $U$ で移動する移動座標系で示したのが Fig. 1 である。ジェットは速度 $V-U$ で右方向へ移動し、対象物は速度 $U$ で左方向へ移動する。ジェットと対象物のインターフェースにおける両側の圧力は同じでなければならない。この現象は本座標系において定常状態と見てよいので、軸線に沿って Bernoulli の定理を当てはめることができ次の式が成立する。

$$\frac{1}{2} \rho_j (V_j - U)^2 = \frac{1}{2} \rho_i U^2 \quad (1)$$

ここで、 $\rho_j$  はジェットの密度、 $\rho_i$  は対象物の密度、 $V_j$  は

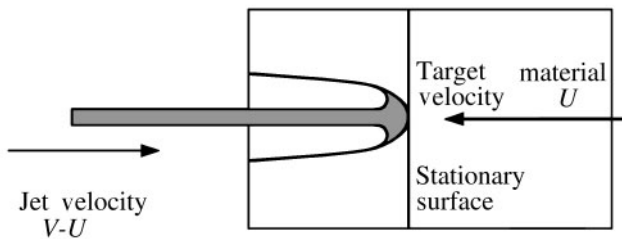


Fig. 1 Jet penetration with a coordinate system moving at the penetration velocity,  $U$ .

ジェット先端速度,  $U$ は侵徹速度である。侵徹理論では対象物とジェットの密度の比が重要であり, この比の平方根を  $\gamma$  で表す。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}} \quad (2)$$

式1, 2から侵徹速度  $U$  は次のように表される。

$$U = \frac{V_j}{(1+\gamma)} \quad (3)$$

これらの式はCSCの侵徹現象を説明するものであるが, LSCにも適用できるという前提で実験を企画した。

### 3. 実験方法

#### 3.1 フラッシュX線装置によるLSCジェット撮影試験

試験セットアップをFig. 2に示す。Fig. 3はフラッシュX線撮影装置(Scandiflash Model 450)のX線チューブヘッド側から見た供試品の取り付け方法を示す。LSCは幅17.7

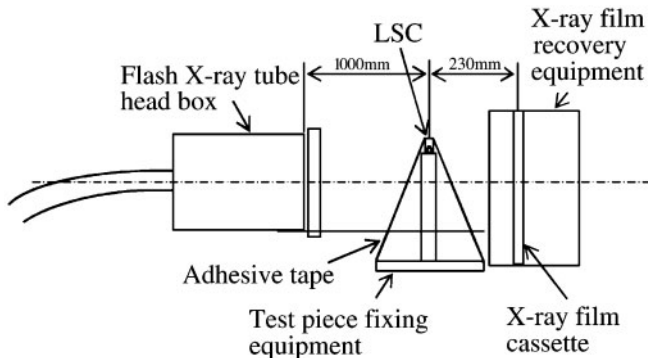


Fig. 2 Experimental set-up of the LSC jet imaging test by using a flash X-ray.

mm, 長さ200mmで, シース材がアルミニウム, 爆薬はRDX, 薬量は $650\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$  ( $1\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}=2.126\times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ) のものを使用した。

LSCの末端から50mmの位置のアルミシースと爆薬に孔を開け, 爆薬の中央部にイオン探針を挿入し, フラッシュX線のトリガ信号出力端子とした。この端末に電気雷管を取り付け, もう一方の端末は発泡スチロール柱の上面に粘着テープで固定した。

LSCとジェットの位置関係を掴むため, 1枚のX線フィルムにLSC起爆前の画像と起爆時の画像を写し込む二重撮りを行った。得られた写真はコントラストが低下してジェットの状況が見えにくくなるが, 後の解析にジェットの位置関係は不可欠であることから, この方法を採用した。X線の照射方向はLSCジェット面に垂直とした。理由はジェットのフロントラインを撮影することによりジェット速度を求めること, さらにブレイクアップ状況を判定することをねらいとしたことによる。

#### 3.2 LSCジェットによる鋼板侵徹試験

試験セットアップをFig. 4に示す。Fig. 5は対象物の構造を示す。LSCは幅25mm, 長さ100mm, シース材は鉛, 爆薬はRDX, 薬量は $900\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$ のものと, 幅17.7mm, 長さ100mm, シース材はアルミ, 爆薬はRDX, 薬量は $650\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$ を使用した。

鋼板は厚さ1.8mm, 縦200mm, 横100mmで, 隅を20mm角で切欠いた。表裏裏の順序で間に絶縁シートを挿んで積層し, 隅の切欠き部の空隙を利用して, 粘着テープで鋼板と補助脚線を接続した。絶縁不良の発生を防止するため, 絶縁シートは0.03mmのポリエステルシートを4枚重ねにした。

対象物は全厚26mmで, 1.8mm厚さの鋼板と0.2mmの絶縁層を13組積層した。絶縁層は0.03mm厚さのポリエステルシート4枚と空気層が0.08mmであった。対象物に占める絶縁層の厚さは無視できないものである。ジェットの速度

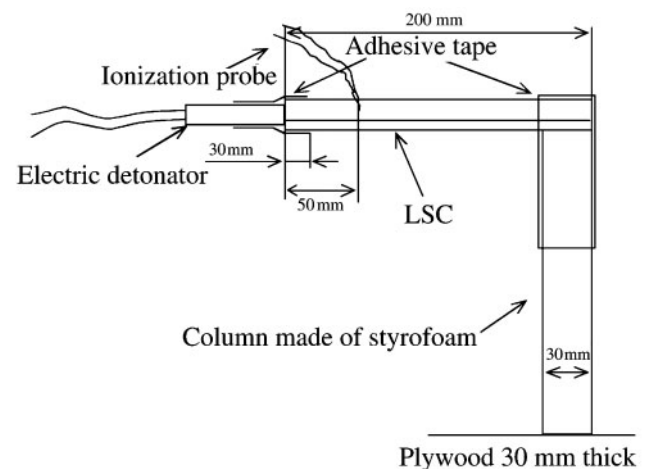


Fig. 3 Fixing configuration of the LSC and others, viewing them from the direction of a flash X-ray tube head.

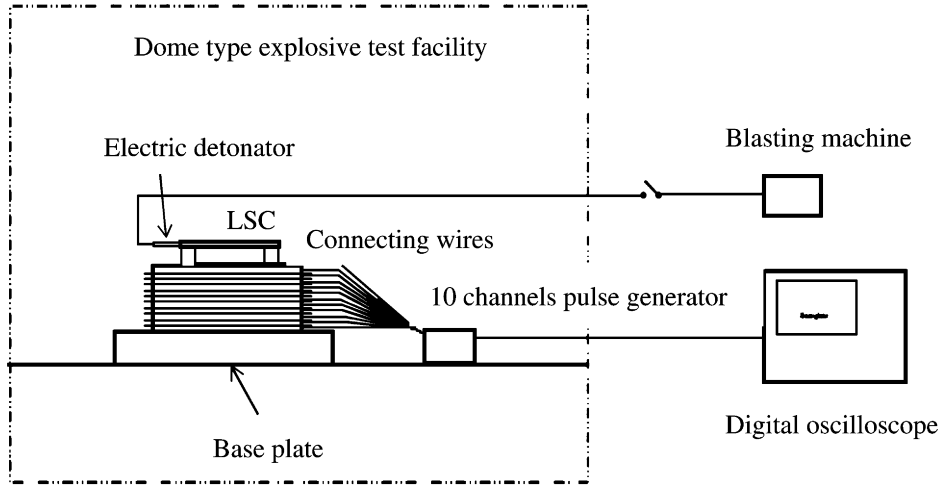


Fig. 4 Experimental set-up of the steel plate penetration test.

Table 1 Timing of flash X-ray exposure, as the delay time from the signal of the ionization probe.

Photo number	Delay time ( $\mu\text{s}$ )	Condition of the films
1	11	Jet front unclear
2	31	Jet front unclear
3	51	Good
4	71	Good

を一定とすると、ジェットが対象物の1層を侵徹する時間 $T$ は、式3を変形して次のように表現できる。

$$T = \frac{t_1}{V_j} \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_j}} \right) + \frac{t_2}{V_j} \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_j}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $t_1, t_2$ は鋼板、絶縁層の厚み、 $\rho_1, \rho_2$ は鋼板、絶縁層の密度である。今回の場合、実際の数値はそれぞれ1.8 mm, 0.2 mm,  $7.86 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $0.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ となる。なお、絶縁層の密度は空気とポリエステルから算出している。

鉛シースLSCの場合、 $\rho_j$ は $11.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ なので $T_{pb} = 3.545 \cdot V_j^{-1}$ となる。対象物1層が厚さ2mmの鋼板だけの場合は $T_{pb}' = 3.666 \cdot V_j^{-1}$ となる。従って、鋼板の0.2mm分が絶縁層に置き換わることにより、侵徹時間が約3.3%短縮されることになる。逆に言えば、全層が鋼板である場合と比較して侵徹速度は理論上約3.3%増大する。同様な計算でアルミシースLSCでは約4.8%増大することになる。

## 4. 結果及び考察

### 4.1 LSCジェット撮影

撮影した写真について、イオン探針の信号からの延期秒時等を Table 1に示す。写真はコントラストが極めて低く、

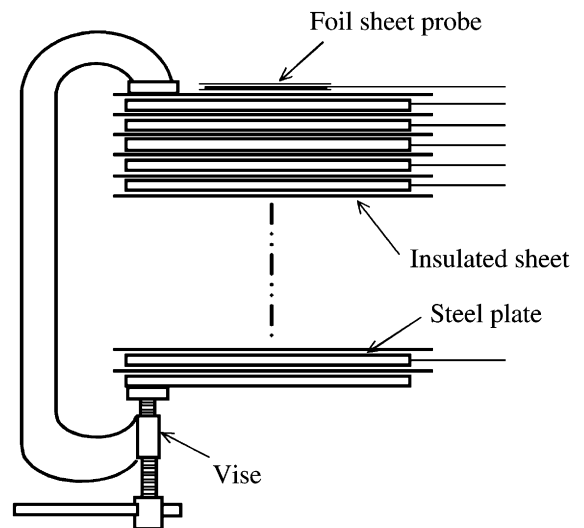


Fig. 5 Schematic diagram of the target.

透過画像でしかジェットを判別できないので、書き取った画像を Fig. 6に示す。また、ブレイクアップについても判定ができなかった。Photo No. 1, 2ではジェット先端部を確認できなかったので画像を省略する。全ての写真でライナベース部が撮影されているが、ライナの下端部分がライン状に飛翔しているものと推定している。

#### 4.1.1 ジェット先端速度の算出

ジェットエレメントの速度ベクトルは、Fig. 7に示すように必ずしもジェットの波面に垂直にはならないので、LSCのジェット先端速度はジェットエレメントの速度と一致する訳ではない。従って、LSCジェット先端速度はジェット

先端波面の進行速度で定義するのが適切である。この定義によると速度ベクトルは波面に垂直となり、LSCの爆速との関係は次式で表される。

$$V_j = D \sin \theta \tag{5}$$

ここで、 $V_j$ はジェット先端速度、 $D$ はLSCの爆速、 $\theta$ はLSCと波面のなす角である。

アルミシース650gr·ft<sup>-1</sup> LSCの爆速は過去の計測データから8,325m·s<sup>-1</sup>で、Photo No. 3, 4から $\theta$ は17度であり、これらの値から算出されるジェット先端速度は2,430m·s<sup>-1</sup>である。

Photo No. 3, 4はイオン探針の信号からそれぞれ51, 71  $\mu$ s後に撮影したもので、この時間差でジェット先端は47 mm進行しており、この関係からジェット先端速度は2,350 m·s<sup>-1</sup>である。

以上の結果から、アルミシース650gr·ft<sup>-1</sup> LSCのジェット先端速度はおよそ2,400m·s<sup>-1</sup>であると推定される。

#### 4.1.2 爆轟不安定領域の算定

ジェットの左端部分が曲線状をなしていることがFig. 6から分かるが、これは起爆端側のジェット先端速度が低速であり、起爆端から離れるにつれて高速となり安定した速度に移行することを示している。写真からはジェット先端とライナベース部の軌跡が認められるが、前述のようにジェットエレメントの速度ベクトルがジェット先端に垂直にならない現象が見られることから、ライナベース部の飛翔状態を基にラインが曲線から直線に移行する変曲点を求めてLSCの爆轟不安定の長さを決定する方法を採った。ライナベース部の飛翔速度とLSCの爆轟不安定領域の算定に関する模式図をFig. 8に示す。

解析の結果、今回の試験に使用したアルミシース650 gr·ft<sup>-1</sup> LSCの爆轟不安定領域の長さは21mmであることが分かった。

#### 4.2 鋼板侵徹

デジタルオシロスコープで得られたデータの一例をFig. 9に示す。それぞれのパルス状波形は対象物の鋼板に一对一で対応し、波形の立ち上がりの秒時を侵徹時間として読み取る。得られたデータについて侵徹開始点を算定するために回帰曲線により補正処理を行った。

##### 4.2.1 侵徹長と侵徹秒時の関係

鉛シース、アルミシースLSCについて、侵徹長-侵徹秒時の関係をTable 2に、グラフ化したものをFig. 10に示す。左の鉛シースLSCは右のアルミシースLSCに比べて、同一の侵徹秒時での侵徹長が大きいことが確認でき、相対的に鉛LSCの侵徹威力が優れていることを示している。CSCでの関係に比較してデータのばらつきや曲線の変動が目立つが、計測誤差と現状のLSCの品質が原因するものと推定している。

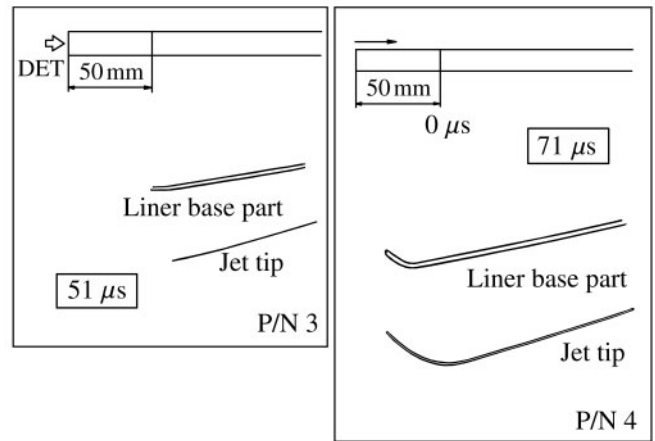


Fig. 6 Depictions of the flash X-ray films.

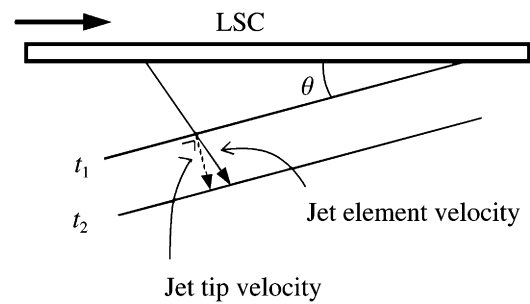


Fig. 7 Definition of the jet tip velocity.

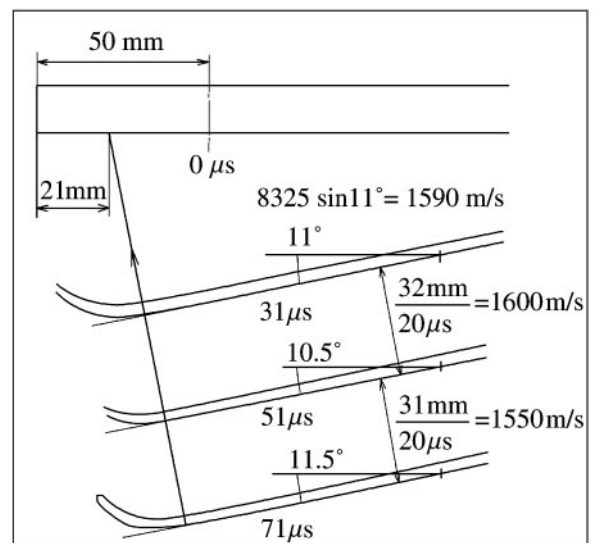


Fig. 8 Schematic diagram for calculating of unstable detonation region.

Table 2 Measurement data on the penetration depth and the time of penetration of the lead- and aluminum-sheathed LSC.

Unit:  $\mu\text{s}$

LSC	Lead 900 gr·ft <sup>-1</sup>				Aluminum 650 gr·ft <sup>-1</sup>	
No.	Pb-1	Pb-2	Pb-3	Pb-4	Al-1	Al-2
Stand-off: mm	25				57	50
Penetration: mm						
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	2.97	2.38	3.24	2.77	2.57	2.52
4.0	6.31	5.52	6.39	6.24	4.91	4.78
6.0	9.49	8.82	12.61	9.42	7.51	7.19
8.0	13.37	12.50	16.15	12.43	11.20	10.15
12.0	23.40	23.45	26.05	21.73	20.83	18.69
14.0	28.58	24.90	32.47	29.55	31.40	23.86
16.0	35.33	40.90	38.70	36.08		
18.0	43.33	48.89	48.59	43.52		
22.0				66.33		

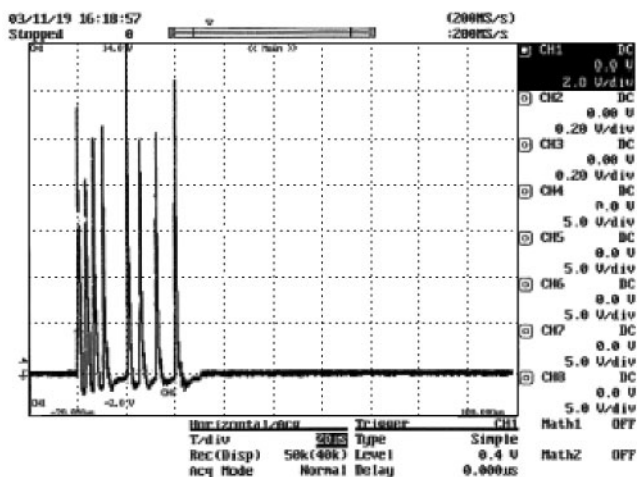


Fig. 9 Oscilloscope data, as an example.

#### 4.2.2 侵徹速度の算出

Table 2より、対象物n番目の一層(厚さ $t$ :各層一定)を侵徹する秒時 $\Delta T_n (=T_{n+1}-T_n)$ が求まるので、その層を侵徹する平均速度は、層の厚さ $t$ を $\Delta T_n$ で割った値として表される。すなわち、侵徹深さ $(n-1/2)t$ における侵徹速度 $U$ について次の式が成り立つ。

$$U_{(n-1/2)t} = \frac{t}{T_{n+1} - T_n} \tag{6}$$

式6で算出した鉛シース、アルミシースLSCの侵徹距離-侵徹速度の関係を図. 11に示す。左が鉛シースLSC、右がアルミシースLSCのグラフで、試験回数は4回と2回である。

侵徹速度もばらつきが極めて大きいのが、鉛シース、アルミシースLSCのいずれも予想外に低速で、最高速度でも約 $1,000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であることが分かる。CSCでは銅ライナでジェット速度が $8,000\sim 9000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり<sup>4)</sup>、対象物が鋼板の場合、式3から算出できるように侵徹速度が $4,000\sim$

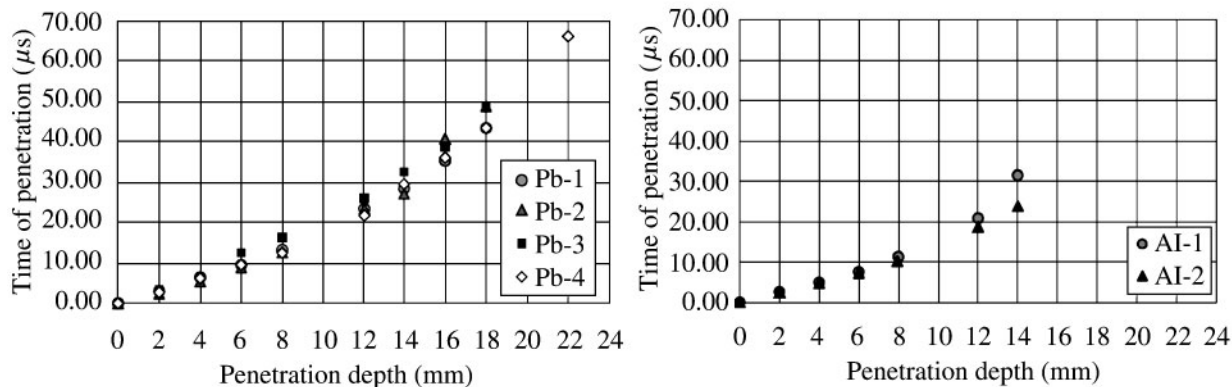


Fig. 10 Relation between the penetration depth and the time of penetration of the lead- and aluminum-sheathed LSC.

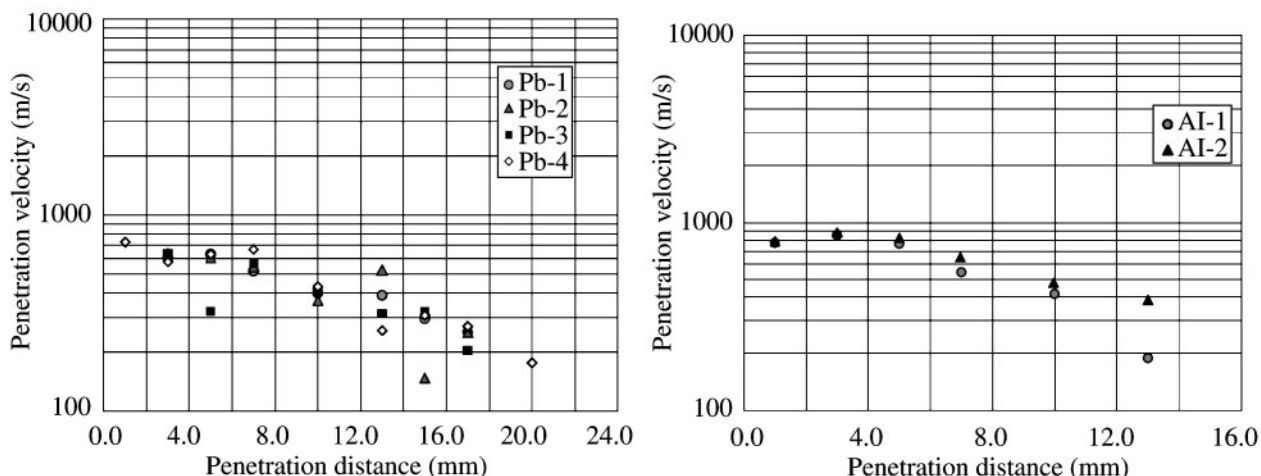


Fig. 11 Relation between the penetration distance and the penetration velocity of the lead- and aluminum-sheathed LSC.

$4.500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であることを考慮すると、ジェットとしての十分な性能が出ていないと考えられる。

#### 4.2.3 侵徹初速の妥当性検討

ジェット先端速度と侵徹開始時点の侵徹初速について式3の関係が成り立つ。

鉛シースLSCでは侵徹速度はFig. 11より $800\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度であり、式3より $V_{jpb}$ は $1,470\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と算出される。AUTODYN®-2DによるシミュレーションをFig. 12に示すが、それによるとジェット先端速度は $1,500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 前後であり、試験結果と概ね一致する。

アルミシースLSCは4.1.1項でジェット先端速度は約 $2,400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であると推定した。式3から $U_{Al}$ は $890\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ となり、Fig. 11からも侵徹初速が概ね同等な値であることが確認できる。

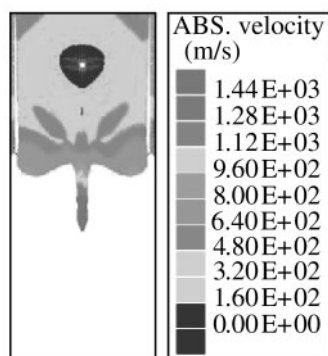


Fig. 12 Simulation of the jet forming process by using AUTODYN®-2D.

以上の事実から、今回の試験で得られた侵徹初速は妥当な値であると判断できる。侵徹速度は侵徹が進行するにつれて低速になるので、一般的な侵徹速度は数 $100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであると言える。

## 5. 結論

### 5.1 フラッシュX線装置によるLSCジェット撮影試験

アルミシース $650\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$ LSCジェットのフラッシュX線撮影から次のことが判明した。

- (1) 定常爆轟領域のジェット先端速度は約 $2,400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で安定していることが分かった。また、LSC端部から約20mmの非定常爆轟部分のジェットは先端速度が次第に増加し、定常爆轟領域と連続的につながることが分かった。
- (2) ジェットのブレイクアップは、撮影した画像からは確認できなかった。これはジェットが薄く、かつ密度が小さいため、画像から目視できる程度のコントラストが得られなかったからである。

実験方法の評価としては、ジェット先端速度は今回実施した方法でデータ取得が可能であるが、ブレイクアップについては別の方法を検討するとともに、この現象自体の発生の有無も含めて考察する必要がある。

### 5.2 LSCジェットによる鋼板侵徹試験

鉛シース $900\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$ LSCとアルミシース $650\text{gr}\cdot\text{ft}^{-1}$ LSCでの鋼板侵徹試験で次のことが判明した。

- (1) 鋼板侵徹速度は鉛シース、アルミシースLSCともに数 $100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダー、高速域でも $1,000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であり、CSCに比較して予想外に低速であった。
- (2) 侵徹初速については、シミュレーション結果とフラッシュX線撮影画像から得られたジェット先端速度からの算出値が妥当な対応をしていることが分かった。

実験方法としては計測精度に問題はあるが、さらに緻密

化した方法を採用することにより、高精度なデータを取得できるものと考えている。

今回の試験結果からLSCの鋼板切断性能を向上するには、当初想定していたブレイクアップ防止対策より、ジェット速度の増加を図ることが重要な課題になると考えられる。今回採用した実験方法は、LSCの性能向上を図るための研究に有効な方法となる。

## 文 献

- 1) 弾道学研究会, 「火器弾薬技術ハンドブック (改訂版)」, p. 257-263 (2003), 財団法人 防衛技術協会.
- 2) A. C. Robinson and M. G. Vigil, Tenth International Symposium on Ballistics, pp. 493-500 (1987), The International Ballistics Committee.
- 3) J. S. Hwang, Y. I. Oh, S. K. Kwon, D. K. Kim, Y. B. Kim, and S. H. Kim, Thirty fourth International Annual Conference of ICT, pp. 133-1 - 133-7 (2003).
- 4) W. P. Walker, and J. A. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges", pp. 132-136 (1989), John Wiley & Sons.

---

---

## The jet penetration performance of linear shaped charges

Hitoshi Miyoshi\*, Hiromichi Ohba\*\*†, Mieko Kuroiwa\*\*, Tatsuya Inoue\*\*, Hideki Kitamura\*\*, and Tetsuyuki Hiroe\*\*\*

Fundamental jet performance tests of linear shaped charges (LSC) were conducted to evaluate their jet penetration behavior. The criteria used for these tests were based on penetration tests for conical shaped charges (CSC). Photos of the aluminum-sheathed LSC jet taken by using flash X-ray confirmed the jet velocities to be about  $2,400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The steel plate penetration tests uses steel plates, insulated sheets, a pulse generator and a digital oscilloscope. The penetration velocities of aluminum- and lead-sheathed LSC against steel plates were calculated to be less than  $1,000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  at a maximum region. These proposed testing methods are very useful for improving the performance of LSC.

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

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

†corresponding author: ohba@chugokukayaku.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