

## 転像管カメラによる Linear-Shaped Charge 現象の観察

大場 芳信\*, 岡崎 一正\*

目標材の切断に用いられる小型 LSC について、爆轟によって生ずるジェットの様態を高速の転像管カメラで観察した。ライナー材としては厚さ 1mm のアルミ板、0.5mm 及び 1mm の軟鋼板を用い、カメラの撮影速度は  $1 \times 10^6$  fps とした。

その結果、アルミ板ライナーでは、ライナーの崩壊とジェットの発生がほぼ同時であるが、軟鋼板ライナーの場合には、ライナーの崩壊は直ちにジェットの発生を伴わず、時間遅れがあり、この遅れは 1mm 軟鋼板の場合が最も顕著であることが認められた。

また、ジェット速度の測定値は流体力学理論から予想される値よりも低く、この速度の大小は、1mm アルミ板、0.5mm 軟鋼板、1mm 軟鋼板の順である。

### 1. 緒言

キャビチー効果を利用するライナー付き成形爆薬のうち LSC (linear-shaped charge) は、くさび形断面を有する細長い爆薬から発生するジェットが一線上に集中するので、目標材の切断に使用されるものである。爆発穿孔器や対戦車兵器に採用されている円錐形空どうを有する成形爆薬 (conical shaped charge)<sup>1)</sup>に比べ LSC に関する研究は少ないので、本研究では小型 LSC についての基礎的な実験として、ライナーの崩壊とジェット発生過程を光学的に観察した。

ライナー材としてはアルミ板と軟鋼板を、観察には転像管カメラを用いて、この高速カメラの爆轟現象観察への応用を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試料

ライナーの材質は一般に採用されることの多いものから選び、厚さ 1.0mm のアルミ板、0.5mm 及び 1.0mm の軟鋼板の 3 種類を Fig. 1 に示すように、頂角  $90^\circ$ 、装薬幅 15mm、装薬高 45mm に圧搾成形した。このライナーを  $180 \times 100 \times 5$ mm の透明アクリル板に垂直にアラルダイトで接着固定した。透明アクリル板を使用したのは、試料を保持するためのほか、爆轟生成物の拡散や衝撃波面の発光によって視野が妨害されるのを防ぐためである<sup>2)</sup>。

装薬としては可塑性混合爆薬のコンポジション C-4 (RDX 91%, 可塑剤 9%) を用いた。

#### 2.2 撮影方法

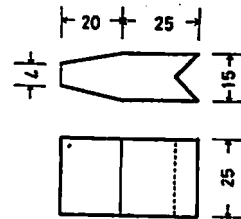


Fig. 1 Shape and size of LSC sample

LSC は二次元構造であるので、後方に光源を置いて試料を断面方向から観察することにより、ライナー及びジェットの挙動を陰影像<sup>3)4)</sup>としてとらえることができる。

本実験における光学系の分解能は高くはないが構成容易な diffusing screen type<sup>5)</sup>を用い、光源はアルゴン爆薬フラッシュとした。

使用した転像管カメラは、John Hadland 社(英)製で、 $F: 300$ mm,  $f: 4$  の対物レンズを有する。コマ撮り速度はフレイミング・プラグインを交換することにより  $2.5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^7$  fps の範囲に、またコマ数は 6~20 に可変であるが、本実験では  $1 \times 10^6$  fps, 8 コマとして撮影した。この場合には、コマ間隔は 1.0  $\mu$ sec, 1 コマの露出時間は 0.2  $\mu$ sec, 総記録時間は 8  $\mu$ sec となる。現象は ASA 3,000 のポロロイドフィルム上に撮影される。

#### 2.3 縮小率および同期

テストチャートにより試験した結果、系の分解能は入射光量の影響を受けて変動することが判明したので 6 l/mm 以上の分解能が得られたと判断されたもの

昭和52年4月9日受理

\*防衛大学校化学教室 〒239 横浜須賀町史水1-10-20

のみをデータとして採用した。

また、予備実験で現象中最も低速なもの（1.0mm 軟鋼板ライナーより生ずるジェット速度）は約 3 mm / $\mu$ sec であることが分かっているので、像の縮小率を S とすれば、この現象のフィルム面上における移動速度は、35mm/ $\mu$ sec となる。従って、1コマ間隔について分解能 6 l/mm の逆数と移動長との比は 0.17/3S となるので、測定誤差を 10% 以下とするために S を 0.56 以下にした。

縮小率を 0.56 としたときの試料位置におけるカメラの視野は 27×27mm しかなく、現象の全過程を 1 回で写してしまふことはできないので、撮影ごとに視野を前後させ、また現像の過程に応じてカメラのトリガー時期を調整した。全体の 実験配置を Fig. 2 に示す。試料と光源の爆薬の起爆には導爆線を用い、光源の発光開始時期は、その長さで調整した。

### 3. 結果

#### 3.1 観察結果

各種ライナーについて代表的な記録例を Photo. 1 ~ 4 に示す。

Photo. 1 では、第 1 コマのライナー頂部をはさんだ二つの円弧状の明るい部分は爆轟波面で、爆薬中に含まれる空気の圧縮発光であろう。第 2 コマで爆轟波はライナー底部を通過しており、ライナーが崩壊しているのが分かる。注目されるのは、ライナーの崩壊にかかわらずジェットの発生が認められないことである。ジェットの発生は第 3 コマからで、以後次第に明瞭となり、ジェットの成長が観察される。第 2 コマにおけるライナーの頂角は 132° である。

Photo. 2 では、第 1 コマで爆轟波はライナー中央部に達しているが、ライナーの崩壊は認められない。崩壊は第 2 コマで明瞭であるが、ジェットの発生はみられない。ジェットの発生は第 4 コマからで、0.5mm の軟鋼板ライナーに比べ発生時期がさらに遅れてい

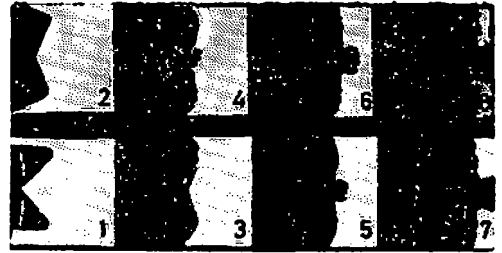


Photo. 1 Mild steel liner (0.5mm)

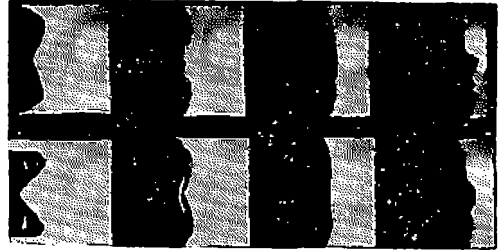


Photo. 2 Mild steel liner (1.0mm)

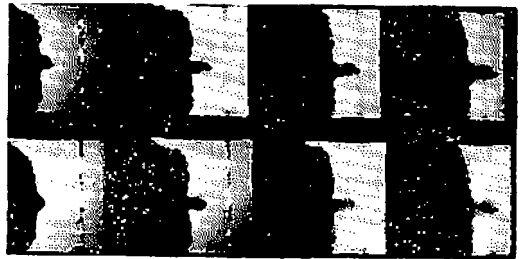


Photo. 3 Mild steel liner (1.0mm)

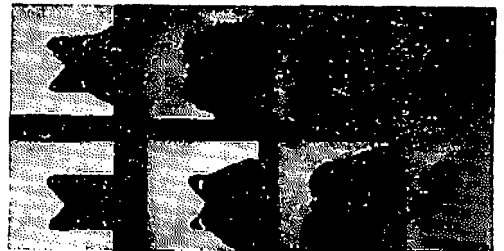


Photo. 4 Aluminum liner (1.0mm)

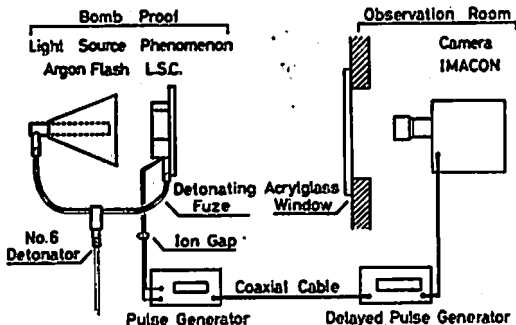


Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement

る。以後ジェットの先端部はライナー全体が前方へ移動するために一時判別しにくくなるが、再び明瞭となる。これは Photo. 3 に示すように、カメラのトリガー時期をさらに遅延させた記録の場合は、より明瞭となる。なお、画面の右側に現われている縦の線はアクリル板の端部である。第 2 コマの崩壊後のライナーの頂角は 130° である。

装薬の爆速は別法で測定しているが、Photo. 4 では、第 1 コマと第 2 コマに爆轟波面が記録されているので、これによっても爆速の測定ができる。第 3 コマ

で爆轟波はライナー頂部に達しており、ジェットが発生が認められる。第4コマでジェットはより明確となり、ライナー崩壊角は  $134^\circ$  と測定される。第5、第6コマでジェットの先端部分に発光が認められるが、これはアルミ板ライナーについてだけ観察された現象である。

### 3.2 ライナー頂部およびジェットの速度

以上のような観察結果からライナー頂部またはジェット先端部の位置と時間との関係を次のようにして決定した。

それぞれ同一条件で記録しても、コマ番号と現象過程には最大  $1 \mu\text{sec}$  程度のばらつきがある。従って個々の記録について単位時間当りの現象の変化量は求められるが、相互の比較は困難である。そこで、まず各記録につき最初のライナー底部の位置を基準としてライナー頂部またはジェット先端部の位置をプロットし、次にこのプロットからジェットが  $y=0$ 、すなわち、最初のライナー底部間を通過した時刻を最小自乗法で求め、この時刻を  $t=0$  とする。 $t=0, y=0$  を基準点として全データを一つの時間-位置関係図上にブ

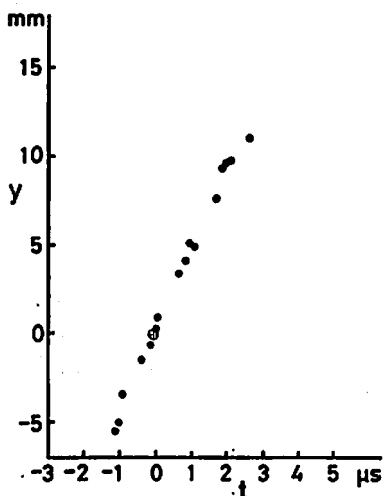


Fig. 3 Relative position ( $y$ ) of liner apex or jet front as a function of time ( $t$ ) for aluminum liner (1.0mm)

Table 1 Experimental values for the velocities of liner apex ( $V_1$ ) and jet ( $V_j$ )

Liner material	$V_1$ (mm/ $\mu\text{sec}$ )	$V_j$ (mm/ $\mu\text{sec}$ )
Aluminum (1.0mm)	—	4.4
Mild steel (0.5mm)	3.0	3.8
Mild steel (1.0mm)	2.4	3.0

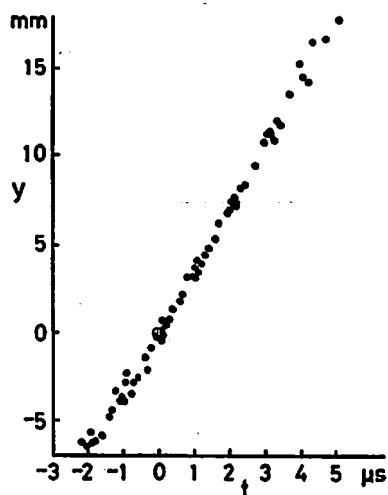


Fig. 4 Relative position of liner apex or jet front as a function of time for mild steel liner (0.5mm)

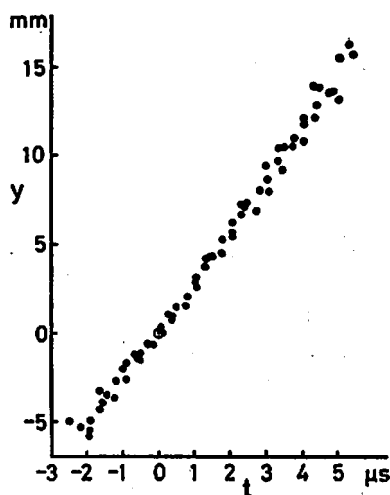


Fig. 5 Relative position of liner apex or jet front as a function of time for mild steel liner (1.0mm)

ロットすれば、3種類のライナーについて Fig. 3~5 が得られる。

これらの図からライナー頂部及びジェットの速度を求めると Table 1 のようになる。アルミ板ライナーの場合は、ジェットの発生時期が早いため、ライナー頂部の速度は測定困難である。

なお、現象の進行状況を比較するため、3種類のライナーについて  $1 \mu\text{sec}$  間隔で記録されたコマを同一図上に重ね合わせると Fig. 6 のようになる。図中の点線は最初のライナー位置を示す。ジェットの発生遅れは 1.0mm の軟鋼板ライナーが最大でアルミ板ラ

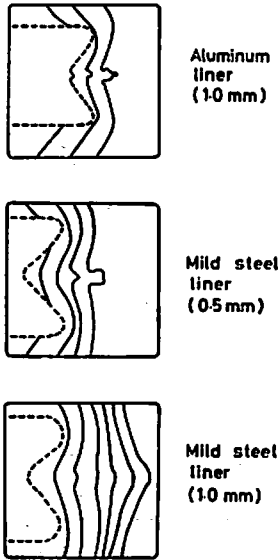


Fig. 6 Illustration of liner collapse and jet formation at one microsecond interval

イナーが最小である。

#### 4. 考察

G. Birkhoff<sup>10)</sup>の流体力学理論によれば、成形爆薬の爆轟によって生ずるジェット速度  $V_j$  は次式で与えられる。

$$V_j = V_d \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \left\{ \frac{1}{\sin \beta} + \frac{1}{\tan \beta} + \tan \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \right\}$$

ここに  $V_d$ : 装薬の爆速

$2\alpha$ : 最初のライナー頂角

$2\beta$ : ライナーの崩壊角

である。

$\alpha = 45^\circ$  であるから、実験により  $\beta$  と  $V_d$  を求め、上式より  $V_j$  を計算すれば Table 2 に示すようになる。

装薬の爆速は、コマ撮り写真法と流し写真法により各種ライナーについて数回ずつ測定した結果、ライナー材による変化はみられず、平均値として  $7.5 \text{ mm}/\mu\text{sec}$  を得た。

このライナー速度の計算値と Table 1 に示した実験値とを比較すると、実験値の方がかなり低い。その理由としては、Photo. 1~4 及び Fig. 6 に示したように小型の LSC では、ジェットの発生遅れのように流体力学理論が厳密に適用できない部分があると考えられる。

次にライナー頂部の移動速度  $V_1$  とジェット速度  $V_j$  とを比較すると、Table 1 から明らかなように、 $V_j$  は  $V_1$  より大である。

Table 2 Half angles ( $\beta$ ) of collapsed liner apex, average detonation velocity of explosive charge ( $V_d$ ) and calculated jet velocities ( $V_j$ )

Liner material	$\beta$	$V_d$ (mm/ $\mu\text{sec}$ )	$V_j$ (mm/ $\mu\text{sec}$ )
Aluminum (1.0mm)	$67^\circ$	7.5	6.7
Mild steel (0.5mm)	$66^\circ$	7.5	6.5
Mild steel (1.0mm)	$65^\circ$	7.5	6.4

Initial half angle of liner apex:  $\alpha = 45^\circ$

この二つの結果から、アルミ板ライナーを除いたライナーについては、後にジェットの先端部となるライナー頂部は、最初一定速度で駆動されたのち、なんらかの力を受けて加速され、ジェットに移行していると考えられる。

このライナーからジェットへの移行については、カメラの時間分解能及び光学的分解能の不足により、十分に究明することはできなかったが、前述のジェットの発生遅れと併せて興味ある問題である。

#### 5. 結論

一般的な小型 LSC を試料として、爆轟によるライナーの崩壊過程及びジェットの発生過程を観察した結果次のことが分かった。

(1) 小型 LSC におけるライナー崩壊過程とジェット発生過程は、ライナーの性状によって受ける影響が大である。

(2) ライナーの崩壊は直ちにジェットの発生につながらず、時間的な遅れの生ずる場合がある。

(3) ライナー頂部はジェット化及び加速がある。

最後に本研究に当り、施設の使用を快く許可して下さい防衛大学校土木教室の竹田教授並びに御援助下さった化学教室の教官、技官及び研究科学生に厚く御礼申し上げます。

#### 文献

- 1) E. M. Pugh, R. J. Eichelberger and N. Rostoker, J. Appl. Phys., 23, 532 (1952)
- 2) R. J. Eichelberger and E. M. Pugh, J. Appl. Phys., 23, 537 (1952)
- 3) M. A. Cook, "The Science of High Explosives", p. 226, Reinhold, New York (1958)
- 4) H. P. Tardif, Explosivstoffe, 7, 155 (1959)
- 5) M. Held, Astronautica Acta, 17, 599 (1972)
- 6) F. J. Weinberg, "Optics of Flames", p. 150, Butterworths, London (1963)
- 7) T. P. Liddiard, Jr., S. Jacobs and I. Kabik, J.S.M.P.T.E., 74, 90 (1965)

- 8) D. G. Oakley and H. G. Hanson, J. S. M. P. T.  
E., 71, 920 (1962)
- 9) E. M. Pugh, R. v. Heine-Geldern, S. Foner  
and E. C. Mutschler, J. Appl. Phys., 22, 487

(1951)

- 10) G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh  
and G. Taylor, J. Appl. Phys., 19, 563 (1948)

---

**Application of an image converter camera to the study of  
linear-shaped charge phenomena**

by Yoshinobu Oba and Kazumasa Okazaki

Phenomena concerning the jet formation process of a small linear-shaped charge were photographically recorded by a high-speed image converter camera.

An aluminum plate of 1mm thickness and mild steel plates of 0.5mm and 1 mm thickness were selected as the liner materials. The camera was fitted with a plug-in unit which has the framing speed of  $1 \times 10^6$  fps. The photographic records indicate that the jet can be produced from aluminum liner as soon as the liner has collapsed. In the case of mild steel liner, however, the time lag between the liner collapse and jet formation is remarkable. As to the jet velocities, the experimental values are lower than the calculated ones which deduced from a hydrodynamic theory, and the jet produced from aluminum liner shows the highest velocity.

(Department of Chemistry, National Defense Academy, Yokosuka, Japan)