

## 爆薬による飛翔体加速の解析

田中克己\* 藤原修三\* 日下部正夫\*

コンポジションB等の高性能爆薬の爆ごうによるアルミニウムまたは鋼の飛翔体加速の実験結果について一次元及び二次元流体力学解析により検討した。その結果、爆薬の種類、飛翔体の厚み、飛翔距離等の飛翔体加速に及ぼす効果がわかった。数値解析の結果は薄いアルミニウム板以外に対してはよく合致した。

### 1. 緒言

爆薬の爆ごうにより飛翔体を加速して数 km/s の速度で標的に衝突させると容易に 100 万気圧程度の衝撃超高压力を発生できる。このようにして生じた超高压力は物性研究、材料合成研究、あるいは地球物理学の研究といった分野に応用されている。我々は液体爆薬レンズによりコンポジションBやサイクロトールを起爆してアルミニウム又は鋼の薄板を加速して標的に衝突させる方法により衝撃超高压力実験を行っている。このような方法による実験では飛翔体の加速の制御を正確に行う必要がある。

爆薬による飛翔体の加速は数  $\mu\text{s}$  の短い時間内で行われ、その機構は Fig. 1 に示すようになる。Fig. 1 は衝撃圧力  $P$  と粒子速度  $u_p$  のユゴニオを変化したもの

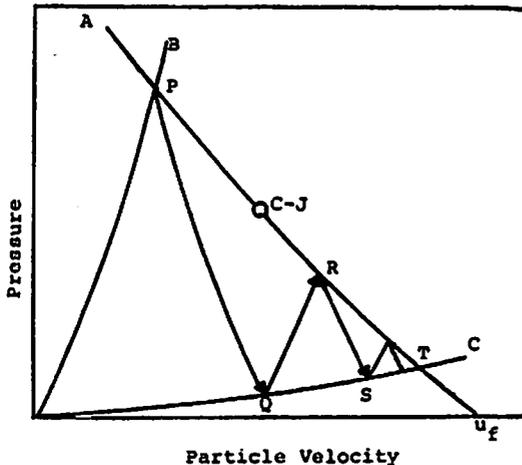


Fig. 1 Hugoniot diagram of the pressure-particle velocity for the flyer-plate acceleration (schematic)

で、爆ごう波面背後の状態が Chapman-Jouguet (C-J) 値で一定に保たれた場合を想定している。この時 C-J 点を通る膨張または圧縮曲線 (Fig. 1 の曲線 A) と飛翔体のユゴニオ曲線 (Fig. 1 の曲線 B) との交点 (Fig. 1 の点 P) が最初に飛翔体に入射した衝撃波の圧力と粒子速度である。次に飛翔体から空気へ衝撃波が入射すると Fig. 1 の点 P を通る飛翔体の反射波の膨張曲線と空気のユゴニオ曲線 (Fig. 1 の曲線 C) との交点 (Fig. 1 の点 Q) の状態となる。点 Q の状態での粒子速度はいわゆる自由面速度である。次に点 Q の状態の反射波が飛翔体中を伝播し再度爆ごうガスと相互作用し Fig. 1 の点 R の状態となる。以上の反射を繰り返しながら飛翔体は加速され爆ごうガスの膨張曲線 A と空気のユゴニオ曲線 C との交点 (Fig. 1 の点 T) に近づいていく。したがって飛翔体の速度は曲線 C 上の点 Q, S, ……に対応する速度で不連続的に変化する。点 Q の状態から点 S の状態へ移るのに要する時間は飛翔体中を伝播する反射波の往復時間に等しい。もし真空中で飛翔体を加速すると最大飛翔速度は Fig. 1 に示した速度  $u_f$  となる。 $u_f$  は爆ごうガスの膨張特性にのみ依存し、これを  $P_{CJ} V_{CJ}^{\gamma}$  とすると Chapman-Jouguet 理論と Riemann 積分より

$$u_f = \frac{(3\gamma - 1)}{(\gamma - 1)(\gamma + 1)} D \quad (1)$$

が得られる。ここで  $V$  は体積で  $D$  は爆ごう速度である。(1)式は爆薬による飛翔体の最大速度が爆ごう速度と  $\gamma$  にのみ依存する事を示す。一般に  $\gamma \sim 3$  である事が知られておりその結果最大飛翔速度  $u_f$  は爆ごう速度と同程度となる。 $\gamma$  は圧力がさがるにつれて理想気体の比熱比に近づくので  $u_f$  は(1)で求められる値より更に大きくなる。しかし実際には爆ごう波面背後の圧力は減衰しているので(1)式の速度まで飛翔体を加速するのは困難である。Los Alamos グループ<sup>1)</sup>の実験によれば爆ごう速度が 6 ~ 9 km/s の爆薬に接した空気の粒子速度は 7 ~ 8 km/s となっているので通常の方法

昭和59年3月16日受理  
\*化学技術研究所保安環境化学部第2課  
〒305 茨城県筑波郡谷田部町東1-1  
TEL 0298-54-4789

では飛翔体の最大速度は 8 km/s 程度が限界であろう。

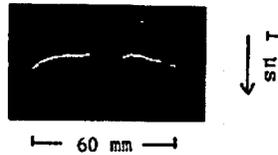
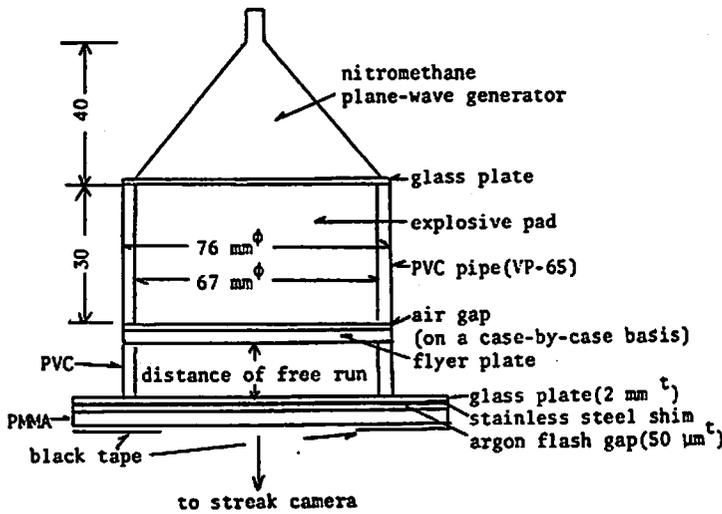
以上のような理由から加速された飛翔体の速度は使用した爆薬の薬量と飛翔体の厚さ及び加速距離（または時間）に依存する。ここでは爆薬による飛翔体の加速の機構を KHT 式<sup>3)</sup>により求めた爆ごうガスの膨張特性と一次元および二次元流体力学式を組合せて解析した結果について報告する。

## 2. 実験

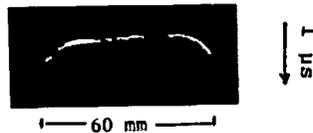
実験については日下部、藤原<sup>3)</sup>により既に報告されているので概要を述べるにとどめる。

飛翔体加速はニトロメタンと硝酸ヒドラジン/ヒドラジン混合液の組合せによる液体爆薬レンズでコンポジション B またはサイクロトールを起爆して加速された。飛翔体として 0.5~4mm 厚の 52-S アルミニウム板又は SUS-304 鋼板を使用した。加速用爆薬は薬径 6.7cm、薬長 3cm で栓び管に密閉されている。加速用爆薬として用いられたコンポジション B は初期密度 1.66g/cm<sup>3</sup> で爆ごう速度は 7.8 km/s、サイクロトールは初期密度 1.56 g/cm<sup>3</sup> で爆ごう速度は 7.5 km/s である。<sup>4)</sup>

飛翔体の加速時の変型の挙動は標的に衝突した時の



(a) without air gap (1 cm-free run).



(b) with 0.25 mm-air gap (2 cm-free run).  
The flyer plate is slightly inclined.

Fig. 2 The streak-camera record of 7.6 cm-diameter, 0.5mm thick 52-S aluminium flyer plate accelerated by the detonation of Composition B.

アルゴンフラッシュの発光を流しカメラで撮影することにより観測した。爆薬と飛翔体の間に空気ギャップを用いた場合と空気ギャップを用いない場合の 52-S アルミニウム板の加速において観測された写真を Fig. 2 に示す。飛翔速度はピン接触法により測定した。使用したピンの数は 5 本前後で流し写真よりわかった平面性が保たれている部分にたてられた。実験値を Fig. 4 Fig. 5 に示す。

この実験より次の事がわかった。

- i) 飛翔板の厚みが減少するにつれて飛翔速度は増加し、飛翔体の湾曲度は小さくなる。
- ii) 0.5mm 厚程度の薄いアルミニウム飛翔板では加速が不安定である。この不安定性は爆薬と飛翔体の間に緩衝材を設けると軽減され、緩衝材としてはプラスチック材料より空気ギャップの方が効果

的である。

- iii) 鋼よりアルミニウム板の方が同一飛翔距離では変型が小さい。

以上の実験結果を数値解析により検討した。

### 3. 解析

爆薬の爆ごうによる飛翔体の加速の数値解析は一次元計算については Mader の SIN<sup>®</sup> を使い、二次元計算については田中の 2DL<sup>®</sup> を使用した。解析に使用した 52-S アルミニウム及び SUS-304 鋼のユゴニオには藤原の実測値<sup>7)</sup> を適用した。(但し、SUS304 の実測値はないので以下 SK-4 鋼のユゴニオを使用した。McQueen 等<sup>8)</sup> の鋼のデータとほとんど同じであることから実験との比較には問題はない。) Grüneisen 係数、降伏応力、せん断弾性係数等には McQueen 等<sup>9)</sup> のアルミニウム及び 347 steel のデータを代用した。(ユ

Table 1 Shock properties of flyer plate.

	$\rho_0$ <sup>7)</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	$C$ <sup>7)</sup> (cm/us)	$s$ <sup>7)</sup>	$r$ <sup>5)</sup>	$Y_0$ <sup>5)</sup> (kbar)	$\mu$ <sup>5)</sup> (Mbar)
52-S Aluminum	2.65	0.5228	1.458	1.7	5	0.256
SK-4 Steel	7.83	0.419	1.49	2.02	7.5	0.987

$$U_s = C + S u_p, \quad \Gamma: \text{Grüneisen constant}, Y_0: \text{Yield stress}, \mu: \text{Shear modulus}$$

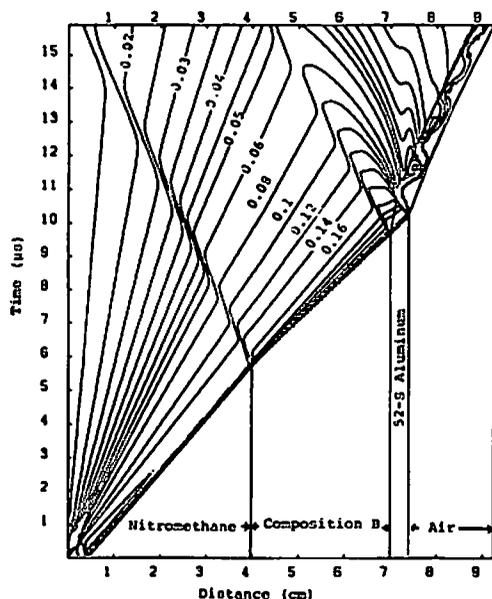


Fig. 3(a) Calculated results of distance-time characteristics shown by isobars (Mbar) for 52-S aluminum-flyer plate (4 mm thickness) accelerated by the detonation of Composition B. (calculated by SIN<sup>®</sup>)

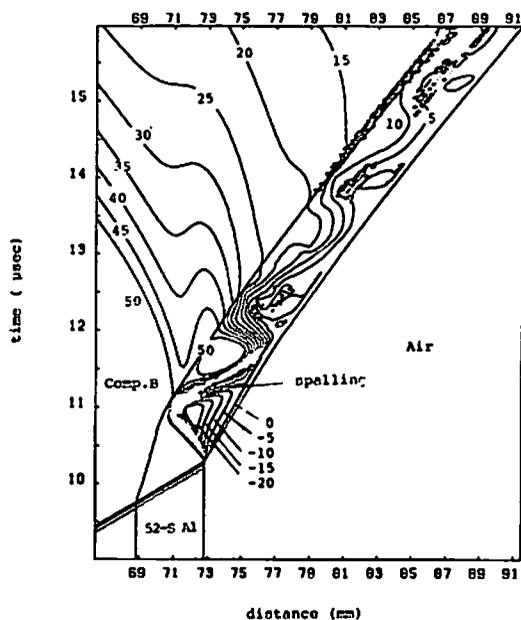


Fig. 3(b) The extended diagram of Fig. 3(a) (Pressure range between -20 and 50 kbars)

ゴニオ以外のデータはここで解析した系には鈍感なものである。) また爆ごうガスの状態式は KHT 式により求めた C-J 点を通る等エントロピー膨脹曲線<sup>2)</sup>を使用した。爆薬の反応式には C-J volume burn 法を適用した。この反応式は爆薬の反応率の変化が体積変化に比例し C-J 体積になったところで反応が完了するというものである。計算に使用した 52-S アルミニウム, SK-4 鋼の特性質を表 1 に示す。

SIN による一次元計算のモデルは爆薬レンズを薬長 4 cm のニトロメタンとし, 初期密度 1.66 g/cm<sup>3</sup>, 薬長 3 cm のコンポジション B 又はこれと同等の重量に相当する薬長の爆薬の爆ごう波が空気を自由面とした飛翔体を加速した場合について行った。解析ではメッシュの大きさは飛翔体の厚さが 4 mm と 2 mm の場合に対しては 0.2mm, 0.04 $\mu$ s とし, 飛翔体の厚さが 1 mm と 0.5 mm の場合に対しては 0.05mm, 0.001  $\mu$ s

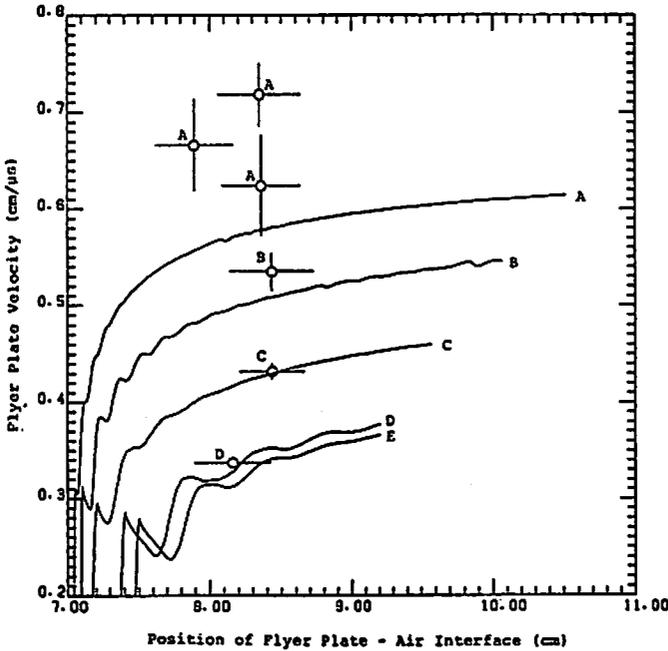


Fig. 4 The flyer-plate velocity of 52-S aluminum for free run accelerated by Composition B, corresponding to Fig. 3. Experimental data are shown by open circles in which horizontal bars are the measuring distance and vertical bars imply the experimental errors from the deviation of least squares fitting. The thickness of the flyer plate is A 0.5mm, B 1 mm, C 2 mm, D 4 mm, and E 4 mm with PMMA plate (1 mm thickness). (Curve D corresponds to Fig. 3)

のメッシュ幅とした。一次元計算では飛翔体の剝離を考慮したが, 剝離を考慮しない場合と比較すると飛翔速度に対してはほとんど影響はなかった。

Fig. 3 に爆ごう波及び 4 mm 厚の 52-S アルミニウム飛翔体中の圧力の時間と距離による変化を等圧線図にして示した。この計算では最初, 空気と飛翔体の境界面で剝離が生じ次に第 2 反射波の通過とともに飛翔体の中心部が剝離する。

Fig. 3 より Fig. 1 に示したように飛翔体で衝撃波が何回も反射しながらアルミニウム板を加速している様

子がわかる。Fig. 3 に示したアルミニウムと空気の時間に対する境界面の傾きが飛翔速度を歪む。Fig. 4 及び Fig. 5 に 52-S アルミニウム及び SK-4 鋼の飛翔距離と飛翔速度の解析結果を実験値とともに示す。剝離は 52-S アルミニウムでは 2 mm 厚以上, SK-4 鋼では 1 mm 厚以上でおこる。Fig. 4 及び Fig. 5 に示した実験値の丸印の横方向の線はピン接触法により測定を行った区間を示し, 縦方向の線は飛翔距離と飛翔時間の実験値より最小自乗法(一次式)を用いて求めた飛翔速度の誤差である。

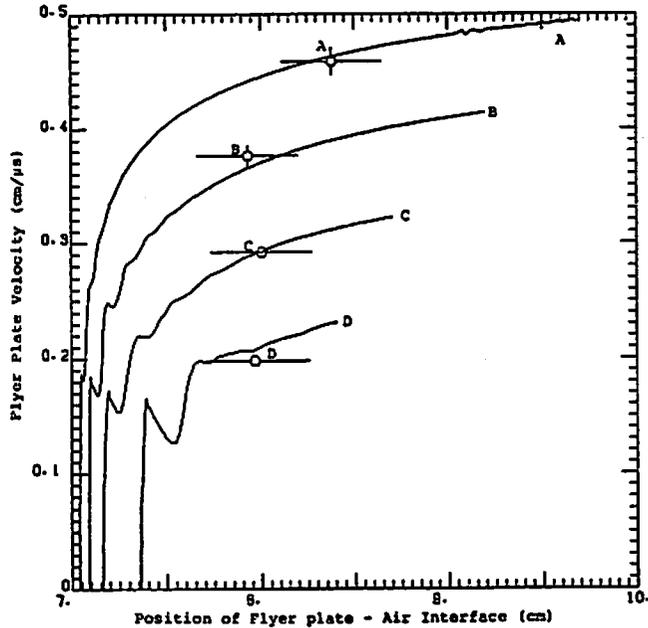


Fig. 5 The flyer-plate velocity of SK-4 steel for free run accelerated by the detonation of Composition B. Experimental data for SUS 304 are shown as in Fig. 4. The thickness of the flyer-plate is A 0.5 mm, B 1 mm, C 2 mm, d 4 mm.

Table 2 Detonation properties of high explosives computed using the KHT for the calculation of flyer plate acceleration.

	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	D (m/s)	$P_{C-J}$ (kbar)	$\gamma_{C-J}$	$V_{C-J, gas}$ (moles/100 g)	$Q_{C-J}$ (cal/g)
Composition B	1.66	7820	252	3.03	3.112	1403
Cyclotol	1.57	7651	231	2.98	3.244	1414
HMX	1.74	8501	311	3.03	3.396	1464
Octol	1.8	8456	320	3.02	3.224	1426
Nitromethane	1.128	6263	122	2.64	3.868	1292
TNT	1.53	6624	173	2.89	2.622	1260
Pentolite	1.55	7154	205	2.87	2.943	1367
HN/HH(61.4/36.6)	1.314	8011	207	3.08	4.916	1219

HN; Hydrazine Nitrate HH; Hydrazine Hydrate

実験値と解析結果は厚さが0.5mmと1mm厚のアルミニウム板の場合を除いて概略よく一致している。0.5mm及び1mm厚のアルミニウム板の場合の実測値と解析値の違いについては後述する。

Fig. 4には1mm厚のPMMA緩衝材をコンポジションBと4mm厚のアルミニウム板の間に置いた場合について示してある。結果は最終速度が少し低くなり加速も滑らかになったが剝離のおこり方についてはP

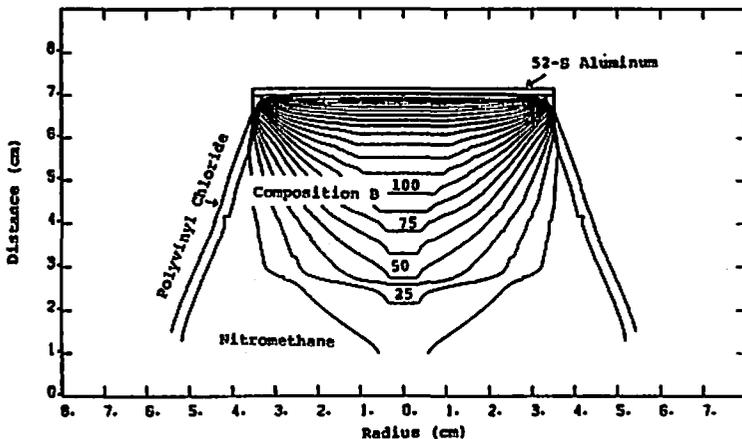
MMA緩衝材がない場合と比べてほとんど同じであった。0.5mm厚のアルミニウム板とコンポジションBの間に0.1mm厚のPMMA緩衝材を置いた場合についても解析したが結果は緩衝材がない場合とほとんど同じであった。

次に駆動爆薬の薬種による効果をみるため我々がよく用いるコンポジションB以外の爆薬による計算を行った。計算に使用した爆薬の特性値は全てKHT式

**Table 3** Calculated 2 mm-thick flyer-plate velocities by SIN<sup>®</sup> for explosives which charge weight are equal to 3 cm-length, density of 1.66 g/cm<sup>3</sup>—Composition B with nitromethane plane-wave generator.

Plate	52-S aluminum		SK-4 steel	
	1	2	1	1.5
Free run (cm)				
Composition B	4.167	4.512	3.011	3.199
Cyclotol	4.151	4.512	3.001	-----
HMX	4.424	4.723	3.140	3.328
Octol	4.372	4.662	3.114	3.294
Nitromethane	3.844	4.257	2.756	2.959
TNT	3.824	4.178	2.785	2.968
Pentolite	4.015	4.371	2.913	-----
HN/HH (63.4/36.6)	4.246	4.631	3.059	-----

(unit; km/s)



**Fig. 8** Computed isobars of the detonation of 6.7 cm-diameter, 3 cm-high-cylindrical Composition B and 4 cm-high nitromethane before the acceleration of the flyer plate. (calculated by 2DL<sup>®</sup>)

より求めたもので実験値とともに表2に示す。SINによる一次元計算で求めた加速距離と飛翔速度の結果を表3に示す。解析では薬量は前述のコンポジションBと同じにしている。表3に示すように爆速の高い爆薬を使うと高い飛翔速度が得られる。しかしTNTとニトロメタンの場合を比較するとTNTの方が爆ごう速度及び爆ごう圧力が高いにもかかわらず飛翔速度はニトロメタンの場合と同程度である。これは(1)式からわかるようにニトロメタンの爆ごうガスの $\gamma$ が低くガス量が多いためである。Maderの実験値<sup>1)</sup>でも空気中に生ずる衝撃波の粒子速度はニトロメタンの方がTNTより大きくなっている。

次に加速中の飛翔時の変型をみるために二次元計算を行った。計算は液体爆薬レンズにより直径6.7cm、

薬長3cmの植ビ管に密閉したコンポジションBを起爆し2mm厚の52-Sアルミニウム又はSK-4鋼を加速する場合について行った。計算に用いたメッシュは軸方向及び径方向ともに0.4mmの大きさで0.004 $\mu$ sの時間差分である。剝離は考慮していない。爆ごう波が飛翔体に到達する前の圧力分布はFig.6に示すようになる。このような圧力分布のもとでは飛翔体の径方向の位置により加わる圧力が違うためFig.7に示すように衝撃波の入射と同時に飛翔体は湾曲し周辺に近いほど平面性が失われる。飛翔体が厚くなるとFig.4及びFig.5に示したように自由面速度が減少し、また飛翔体の周辺部と中心部での自由面速度の差が大きくなるため飛翔体は湾曲しやすくなる。Fig.8に計算で求めた0.4 $\mu$ s毎の飛翔体の形状を示す。

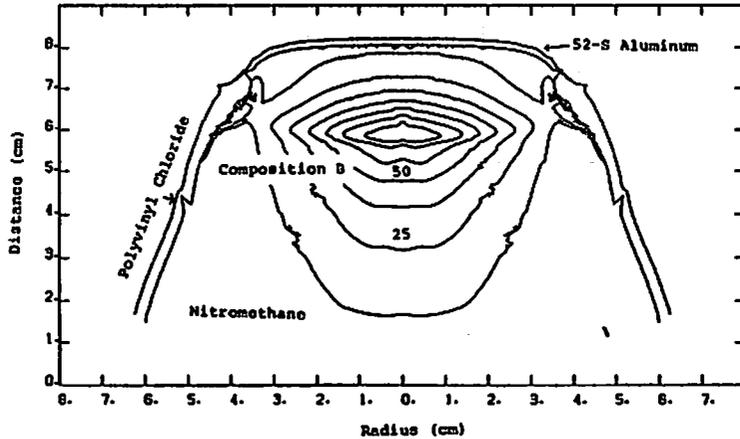


Fig. 7 Computed isobars and the configuration of the 2 mm-thick, 52-S aluminum plate after 3  $\mu$ s of time of Fig. 6.

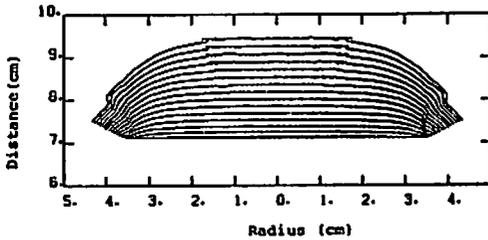


Fig. 8 Computed configurations of 2 mm-thick 52-S aluminum flyer plate for every 0.4  $\mu$ s accelerated by the detonation of Composition B.

実験では 2 mm 厚のアルミニウム板の平面部の直径は飛翔距離 10 mm で約 30 mm, 同じく飛翔距離 20 mm で約 15 mm となっており計算値と概略合致している。2 mm 厚の SK-4 鋼では爆ごうガス中への反射衝撃圧力がアルミニウムより高く, 逆に飛翔速度は遅い。そのため爆ごうガス中の圧力減衰が遅く, また径方向の圧力減衰の傾きがかなり大きい。そのため SK-4 鋼板の周辺部と中心部での飛翔速度の差が大きくなり同一の飛翔距離 (加速に要する時間は SK-4 鋼の方が 52-S アルミニウムに比べて約 50% 長くかかる) ではアルミニウム板に比べて湾曲しやすくなる。

なお 2 DL による中心部の飛翔速度の値は SIN による結果とほとんど同じであった。

#### 4. 考 察

最初に 0.5 mm と 1 mm 厚のアルミニウム飛翔体の実験値と計算値の不一致について検討する。この原因として考えられるものは

① 解析に用いたコンポジション B の膨張特性が実際と違っていた。

② 解析における爆ごう波面背後の圧力の減衰が実際より大きかった。

③ 加速に用いられたアルミニウム板の厚みが計算に用いた値より小さかった。

④ ピン接触法の測定誤差。

である。①の原因については(1)式に示したように計算に用いた爆ごうガスの特性のうち爆速と  $\gamma$  が加速に関係する主因子でありこれらは実験値とはあまり違いがなく, また他の厚みの飛翔体に対しては計算値は実験値とよく合致している。②は爆ごう構造に関係するもので実験に用いたコンポジション B は鈍感なものであるためここで用いた反応式 (C-J volume burn) が不適当であったかもしれない。もし反応帯長が飛翔体の厚みに匹敵しているならばここで用いた反応式は不適切であり爆ごう波面の圧力変化はこの計算と異っているであろう。しかし同じ 0.5 mm 又は 1 mm 厚の SK-4 鋼に対しては計算値と実験値はよく合っている。

③の原因については研磨したアルミニウム板を用いておりその時の厚みを正確に測定していない事から推定されるものである。しかし, 0.5 mm 厚の場合の不一致は実験で用いたアルミニウム板が 0.2~0.3 mm 厚程度又はそれ以下でないと説明できない。④の原因を考えたのは Fig. 4 に示すように飛翔体が薄くなるにつれて実験誤差が増加している事と再現性がよくない事による。しかし, 計算値と実験値の違いは誤差範囲以上である。したがって Fig. 4 に示した厚さが 0.5 mm 及び 1 mm のアルミニウム板の場合の実験値と計算値の違いの理由は不明である。

次に空気ギャップの効果について検討する。ここでは空気ギャップのある場合についての計算は解析技術上困難なため行っていない。しかし Fig. 4 に失した P

MMA ギャップを用いた場合のように加速が滑らかに行われるため、計算では示せなかったが Fig. 2(b) に示したように安定に加速されたのであろう。このような緩衝材の効果については McQueen 等<sup>8)</sup>も観測しており彼らは長い時間加速する場合は 0.2mm 程度の厚みのポリエチレンを緩衝材として用いている。また McQueen 等は飛翔体の厚みが大きい時は加速距離を小さくしているが、これはここで述べたように厚い飛翔体が湾曲しやすく、かつ剝離しやすい事による。PMMA やポリエチレンを緩衝材として用いた場合の飛翔板中へ入射する最初の衝撃波の圧力は空気ギャップを使用した場合に比べてかなり大きい。そのため空気ギャップの方がプラスチック緩衝材より飛翔体の加速の安定化に有効であったと考えられる。

## 5. 結論

実験結果と一次元及び二次元流体力学計算より次の事がわかった。

- (1) 高速飛翔体を得るには高爆速で  $\gamma$  が小さくガス量の多い爆薬を使用するのが適当である。
- (2) 飛翔板が厚くなると湾曲しやすくなり剝離しやすくなるため加速は不安定になる。これは飛翔速度が遅くなると加速に要する時間が増大しかつ飛翔体背後の径方向の圧力減衰が大きくなるため飛

翔体の平面性が失われやすい事による。

- (3) 飛翔体を爆薬で加速する場合は緩衝材や空気ギャップを用いるとよい

## 文 献

- 1) Mader, C. L., "Numerical Modeling of Detonations", Univ. California Press, page 84-85 (1979)
- 2) 田中克己, "爆薬の爆轟特性解析", 化学技術研究所 (1983)
- 3) 藤原修三, "爆発の利用と防止", (財) 日本産業技術振興協会, 技術資料, No. 127 (1982)  
日下部正夫, 藤原修三, 工業火薬協会秋季研究発表講演, 38, (1977)
- 4) 藤原修三, 日下部正夫, 工火誌, 40, 379 (1979)
- 5) Mader, C. L., "User's Manual for SIN", Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-7264-M (1978)
- 6) 田中克己, 未公表 (1975)
- 7) 藤原修三他, 第22回高圧討論会, 70, (1981)  
藤原修三他, 第24回高圧討論会, 234 (1983)
- 8) McQueen, R. G. et al, "High Velocity Impact Phenomena", Ed. by R. Kinslow, Academic Press, page 310-315 (1970)

---

## The Numerical Study on the Flyer-Plate Acceleration by the Detonation of High Explosives

by Katsumi TANAKA\*, Shuzo FUJIWARA\* and Masao KUSAKABE

The acceleration of the flyer plate by the detonation of Composition B and some other high explosives is studied numerically and compared with experimental results. One dimensional and two dimensional hydrodynamic analysis show the effect of the detonation properties, thickness of the flyer plate and distance of free run etc. Computed results agreed with experimental results except for thin aluminum plates.

(\*National Chemical Laboratory for Industry  
Yatabe, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305.)