

# 高性能爆薬PBX (plastic bonded explosive) の衝撃起爆特性とその応用

安部尊之\*, 吉田正典\*\*, 廣江哲幸\*\*\*, 藤原和人\*\*\*, 松尾日出男\*\*\*  
村田健司\*\*\*\*, 高橋勝彦\*\*\*\*, 加藤幸夫\*\*\*\*

筆者らは高性能爆薬PBX (plastic bonded explosive) を用いた円筒状収束衝撃波の発生実験を行っており、そのためには円筒状に成型したPBX爆薬の外表面を斉時性良く起爆する必要がある。そこで、PBX80U (HMX ; cyclotetramethylenetetranitramine. 80%, バインダー 20%, 密度  $1.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), PBX75RU (RDX ; cyclotrimethylenetrinitramine. 75%, バインダー 25%, 密度  $1.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), PBX80RU (RDX 80%, バインダー 20%, 密度  $1.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) の3種類のPBXを試作し、それぞれについて基本となる入射衝撃圧と定常爆轟までの到達距離の関係を得るため一次元衝撃起爆特性計測実験 (wedge test) を行った。実験の結果PBX80RUが最も衝撃起爆感度が高いことが確認され、また線爆発を用いたPETN (pentaerythritol tetranitrate) の面爆轟波発生装置と飛翔板衝突法を組み合わせるPBX円筒の外表面を起爆すれば円筒状収束衝撃波の発生実験での使用に十分な爆轟が得られると推測された。

## 1. 緒言

衝撃超高压の応用研究にはすでに実用化されている衝撃ダイヤモンド合成<sup>1)</sup>などの通常の高圧材料合成以外に、さらに極限的な超高压を実現して物性研究<sup>2)</sup>, 新材料開発<sup>3)</sup>, 核融合実現<sup>4)</sup>などを試みようとする基礎研究が行われている。筆者らはこのような衝撃超高压の発生方法として爆薬のパルスエネルギーを直接固体中衝撃波に変換する方法を基に、収束効果を利用することでテラパスカル域の超高压を発生させる円筒状収束波発生装置の開発を行っている<sup>5,6)</sup>。それにより超高压領域での試料の回収や、相変化の検出を含む状

態式の研究等が期待できる。

現在の円筒状収束波発生装置の概略図をFig. 1に示す。本装置は高性能爆薬PBX (plastic bonded explosive) を円筒状に設置し、中心の固体材料中に超高压を発生させるものである。その起爆プロセスについて説明する。PBXは爆轟圧は高いが比較的鈍感なので、外円周表面を一斉起爆するためにさらに外側に設置した感度の高いPETN (pentaerythritol tetranitrate) の円筒殻の一斉起爆を利用する。エッチング加工した銅メッシュにコンデンサーからの放電大電流を流し銅メ

1999年4月23日受理

\*熊本大学大学院自然科学研究科  
〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3013  
FAX 096-342-3010

\*\*物質工学工業技術研究所  
〒305-8565 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4792  
FAX 0298-54-4783

\*\*\*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

TEL 096-342-3690  
FAX 096-342-3729

\*\*\*\*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場研究開発部  
〒470-2379 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1

TEL 0569-72-1221  
FAX 0569-74-0008

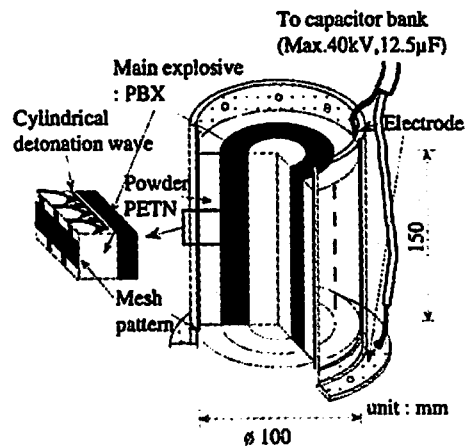


Fig. 1 Experimental setup for generation of cylindrical imploding shocks

ッシュの細線部分を一齐爆発させ、その爆発でPETNを起爆する。細線部分から進行する衝撃波が、図に示すようにPETN中での干渉効果により、円筒面に近い爆轟波となる。これをPBXに入射させて起爆させる。

ここで、精度の良い収束衝撃波発生のためにはPBXによる爆轟波は安定で精度の良い円筒面状である必要があり、そのためには外表面から衝撃起爆されたPBXの円筒殻中で即座に安定な爆轟波が発生する必要がある。即ちPBXの起爆誘導距離(run distance to detonation)を極力短くする必要がある。また過去の円筒爆縮実験で主爆薬にPBX80Uを用い、円筒爆縮実験を行ったところ、主爆薬が定常爆轟に到達していない可能性が見出された<sup>5,6)</sup>。故にPBXに入射させる衝撃圧力をより高くする必要があるが、銅メッシュを用いた面爆轟波発生装置で使用可能なPETNは低密度なものに限られるので、その爆轟圧は限定される。従って起爆感度の高いPBXを用いるか、さらに入射圧力を高くするよう装置を改良する必要がある。

そこで、PBX80U(HMX ; cyclotetramethylenetetranitramine, 80%, バインダー 20%, 密度  $1.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )に較べて、より敏感であると期待されるPBX75RU(RDX ; cyclotrimethylenetrinitramine, 75%, バインダー 25%, 密度  $1.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )およびPBX80RU(RDX 80%, バインダー 20%, 密度  $1.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )を試作した。なお、ここで用いたバインダーは爆発エネルギーを下げにくいようエネルギー成分を含んだ活性バインダーであり、その成分はニトロ可塑剤(BDNPA/F : bis-dinitropropyl acetal/bis-dinitropropyl formal, 50/50wt%)およびポリエチレングリコール系(PEG)である。これらPBXおよび比較参考用の爆薬(中国化薬製PBXK-C1106<sup>7)</sup>, LX-04<sup>8)</sup>)の組成、密度およびKHT爆轟計算<sup>9)</sup>による定常爆轟圧力 $P_{CJ}$ についてTable 1にまとめた。

本研究ではPBX80U, PBX75RUおよびPBX80RUに対して一次元衝撃起爆特性計測実験(wedge test)<sup>10)</sup>を実施し、さらに実験結果の応用として円筒状PBX

の一齐起爆への適用性について検討を行った。

## 2. 一次元衝撃起爆特性計測実験(wedge test)

Fig. 2に実験装置の略図およびストリーク写真の一例を示す。平面爆轟波発生器<sup>11)</sup>によって生成された平面爆轟によって主爆薬が面起爆され、駆動板(driver plate)に平面衝撃波が入射される。さらに衝撃波は駆動板表面に貼り付けられた楔形成型爆薬(wedge)および標準試料に入射される。このときwedge, 標準試料の表面に光を照射し反射光を高速流しカメラ(streak camera)で撮影する事により、標準試料中の衝撃波速度 $U_{SD}$ と試料爆薬中の衝撃波速度 $U_S$ を計測した。PBXに入射する衝撃圧力は主爆薬と駆動板材料の組み合わせを変えることにより変化させることが出来る。なお、光源として、クリプトンガス中に衝撃波を発生させ急激に圧縮する際の発光現象を利用するクリプトンフラッシュ(krypton flash)を用いた。クリプトンガス中の衝撃波発生は爆速約7km/sのPETN/SR(pentaerythritol tetranitrate/silicon rubber, 70/30wt%)を用いた。

実験装置の配置をFig. 3に示す。雷管起爆用電源D

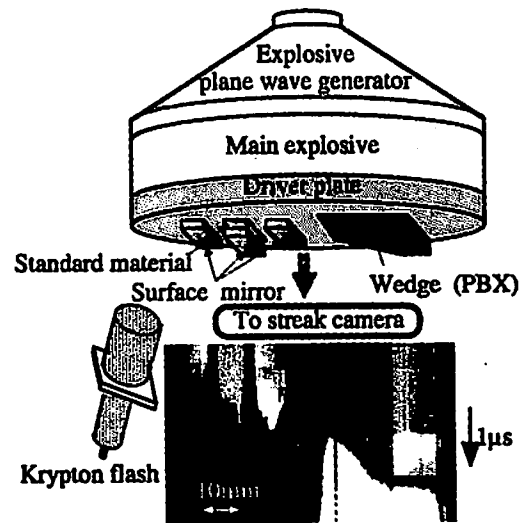


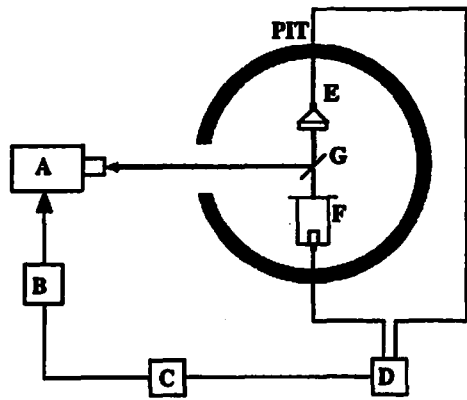
Fig. 2 Experimental setup for wedge test (upper) and a typical streak camera record (lower)

Table 1 PBX explosives

Explosive	Composition	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$P_{CJ}^{**}$ (GPa)
PBX80U	HMX80%, Binder*20%	$1.75 \times 10^3$	30.6
PBX75RU	RDX75%, Binder*25%	$1.64 \times 10^3$	25.8
PBX80RU	RDX80%, Binder*20%	$1.70 \times 10^3$	28.1
PBXK-C1106 <sup>7)</sup>	HMX82%, Binder 18%	$1.760 \times 10^3$	-
LX-04 <sup>8)</sup>	HMX85%, Viton 15%	$1.859 \times 10^3$	-

\*Binder : BDNPA/F + PEG

\*\* $P_{CJ}$  : KHT calculation<sup>9)</sup>



- A : Streak Camera
- B : Delay Pulse generator
- C : Control Box
- D : Capacitor Bank (5kV, 50J, 3ch)
- E : Experimental Set-up
- F : Krypton Flash
- G : Beam splitter

Fig. 3 Experimental block diagram

により、フラッシュFの爆薬、デバイスEを起爆し、現象をビームスプリッターGを介してストリークカメラAで撮影する。

Fig. 4に実験で得られるストリーク写真の模式図を示す。平面衝撃波が駆動板表面に貼り付けた標準試料、Wedgeの表面に達すると、その反射率が変化するため反射光は消光する。標準試料の消光時間差に対応するフィルム上での距離を $L_1$ 、ストリークカメラのフィルム上での掃引速度を $w$ とすると、消光時間差は $L_1/w$ である。これと標準試料の高さ $h_1$ から駆動板中の衝撃波速度 $U_{SD}$ は次の式で表される。

$$U_{SD} = \frac{h_1}{L_1/w} \quad (1)$$

また駆動板中の衝撃波速度 $U_{SD}$ と粒子速度 $u_{pD}$ には次の関係があることが知られている。

$$U_{SD} = C_{0D} + s_D u_{pD} \quad (2)$$

ここで $C_{0D}$ は駆動板の常圧下でのバルク音速、 $s_D$ は駆動板材料に固有の定数である。また運動量保存則より駆動板中の衝撃圧力を $P_D$ 、初期密度を $\rho_{0D}$ とすると

$$P_D = \rho_{0D} U_{SD} u_{pD} \quad (3)$$

(2), (3)式から

$$P_D = \rho_{0D} U_{SD} \frac{U_{SD} - C_{0D}}{s_D} \quad (4)$$

(4)式に(1)式から求めた $U_{SD}$ を代入することで駆動板中の衝撃圧力 $P_D$ を求めることができる。

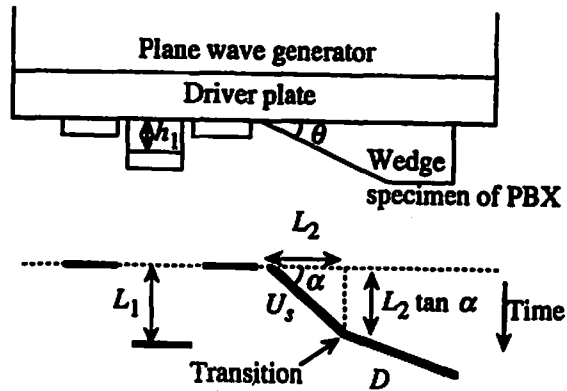


Fig. 4 Schematic of experimental assembly (upper) and a corresponding streak camera record (lower)

一方、Wedge側では、Wedge中を進行する衝撃波速度の傾きを持つ薄い光が写し出され、ある時間経過すると定常爆轟に移行する。その爆轟の光が定常爆轟速度の傾きを持つ光として写し出される。装置からフィルムへの拡大率を $M_f$ 、Wedge先端から定常爆轟に移行する点までのフィルム上でのスリット方向の距離を $L_2$ 、フィルム上での光の傾きを $\alpha$ 、Wedgeの角度を $\theta$ とするとWedge中の衝撃波速度 $U_s$ は次の式で表される。

$$U_s = \frac{(L_2/M_f) \tan \theta}{(L_2/w) \tan \alpha} = \frac{w \tan \theta}{M_f \tan \alpha} \quad (5)$$

得られた駆動板中の衝撃圧力 $P_D$ およびWedge中の衝撃波速度 $U_s$ からインピーダンスマッチングによってPBXの入射圧力と粒子速度が分かる。またこのときの起爆誘導距離 $R$ は次の式で表される。

$$R = \frac{L_2}{M_f} \tan \theta \quad (6)$$

同様の計測をPBXに入射する衝撃圧力を変化させた実験を数回行い繰り返すことによってPBXの $P-u_p$ 線図上でのHugoniotおよび、起爆誘導距離と入射圧力の関係を求めることが出来る。

### 3. 実験結果

実験で得られた試料爆薬の衝撃圧縮状態とそのときの起爆誘導距離をTable. 2に、実験で得られたストリーク写真の一例をFig. 2に示す。

実験結果の解析から得られたPBXの $U_s-u_p$  Hugoniot,  $P-u_p$  Hugoniotおよび起爆誘導距離と入射衝撃圧の関係をFig. 5, Fig. 6, Fig. 7に示す。なおPBX75RUについてのプロットは、実験データが少ないので正確さに欠ける恐れがある。また、参考のために中国化薬製

Table 2 Experimental results of wedge tests

PBX explosive	Incident shock wave			Run distance R (mm)
	$U_s$ (km/s)	$u_p$ (km/s)	$P$ (GPa)	
PBX80U	5.49	1.09	10.47	3.32
	4.57	0.746	5.96	6.52
	4.65	0.717	5.84	6.44
	6.40	1.60	17.92	2.55
PBX75RU	4.15	0.498	3.51	6.18
	4.63	0.724	5.70	4.17
	4.43	0.712	5.37	5.68
PBX80RU	3.92	0.50	3.34	3.80
	4.52	0.94	7.22	1.36
	4.35	0.738	5.46	3.40
	6.41	1.29	14.10	1.09
	6.74	1.26	14.40	1.35
	5.15	0.723	6.33	1.55

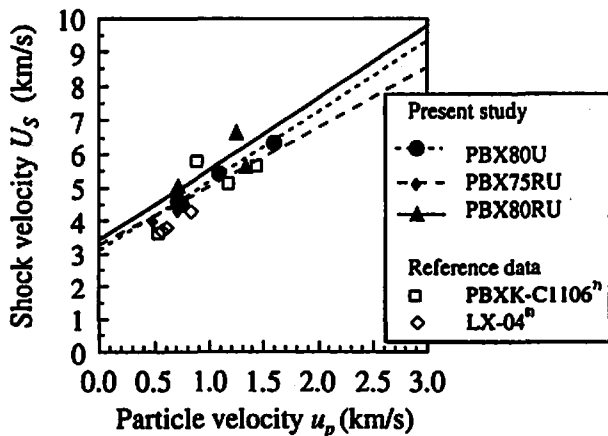


Fig. 5  $U_s$ - $u_p$  Hugoniot

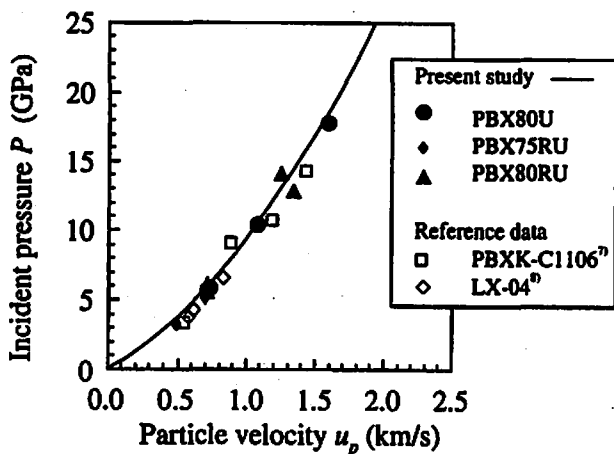


Fig. 6  $P$ - $u_p$  Hugoniot

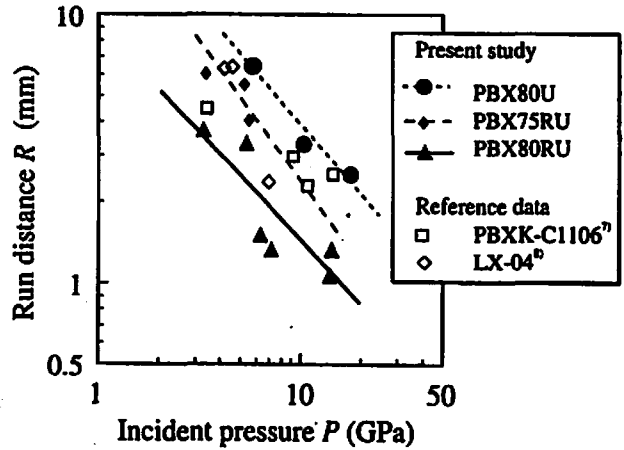


Fig. 7 Run distance vs. incident pressure relationships

PBXK-C1106<sup>7)</sup>(HMX 82%, 活性バインダー 18%, 密度  $1.760 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) および LX-04<sup>8)</sup>(HMX 85%, Viton 15%, 密度  $1.859 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) についてもプロットした。 $R$ - $P$ ,  $U_s$ - $u_p$  の各プロットに対する回帰式は、起爆誘導距離を  $R$  (mm), 入射圧力を  $P$  (GPa), 衝撃波速度を  $U_s$  (km/s), 粒子速度を  $u_p$  (km/s) とすると次の通りである。

PBX80U

$$\log_{10} R = -8.72 \times 10^{-1} \log_{10} P + 1.47 \quad (7)$$

$$U_s = 3.12 + 2.07 u_p \quad (8)$$

PBX75RU

$$\log_{10} R = -1.04 \log_{10} P + 1.41 \quad (9)$$

$$U_s = 3.25 + 1.78 u_p \quad (10)$$

PBX80RU

$$\log_{10} R = -7.93 \times 10^{-1} \log_{10} P + 9.57 \times 10^{-10} \quad (11)$$

$$U_s = 3.44 + 2.12 u_p \quad (12)$$

グラフから分かるとおり  $U_s$ - $u_p$  Hugoniot および  $P$ - $u_p$  Hugoniot には爆薬の違いによる差はさほどみられなかったが、PBX80RU が入射圧に対する起爆誘導距離が最も短い、即ち衝撃起爆感度が最も高いことが分かった。

#### 4. 円筒爆縮実験への適用方法の検討

前節で得られた各種 PBX の Hugoniot 特性及び衝撃起爆感度を基に円筒状 PBX の有効な衝撃起爆方法について考察する。円筒爆縮実験における PBX の衝撃起爆方法には前述の銅メッシュの線爆発を利用した PETN の面爆轟波発生方法で生成した円筒状収束爆轟波を直接 PBX に入射させる方法(直接法)と、PETN の収束爆轟波で厚さ 0.2mm 程度の円筒状プラスチックを飛翔させ、内側に設置した PBX 円筒外表面に衝突させる方法(衝突法)とが考えられる。そこで、それぞれの方法で起爆する場合について PBX の入射圧を推定

し、そのときの起爆誘導距離を推定した。前述のとおり最終段階の固体中円筒状収束衝撃波の精度の向上と爆轟波の収束効果を活かすためには起爆誘導距離は極力短いことが望ましい。過去に主爆薬にPBX80Uを用いて円筒状収束波発生実験を行った際、起爆誘導距離は3mm弱と推測され、対称性の良い収束衝撃波の発生に成功したが、定常爆轟に到達していない可能性が示唆<sup>5)</sup>された。そこで起爆誘導距離をさらに短くする必要があると考え、本研究では2mm以下の起爆誘導距離を目標にPBXの選定と円筒爆縮実験の設計を行うことにする。

まず、インピーダンスマッチング法によりそれぞれの起爆法によるPBXの入射圧の違いを推定した。銅メッシュを用いた面爆轟波発生方法で使用可能なPETNは密度が $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 前後のものに限られるため、そのPETNで直接PBXを衝撃起爆する場合と、同じ方法で生成したPETNの面爆轟波により厚さ0.2mmのPET (polyethylene terephthalate) 飛翔板を衝突させてPBXを衝撃起爆する場合のPBXの入射圧を推定し比較した。なお、飛翔板は2mm程度の間隔を飛翔させて2.8km/sに加速されることを実験によって確認<sup>6)</sup>している。インピーダンスマッチング法による入射圧の推定をFig. 8に示す。各PBXでHugoniot特性に大きな違いがないことから入射圧には大きな違いはない。それぞれの方法についての起爆誘導距離の推定をFig. 9に示す。図から分かるとおり密度 $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ のPETNでPBX80RUを衝撃起爆するとき起爆誘導距離は2.3mm、飛翔板衝突法で1.4mmとなり、飛翔板衝突法を用いると円筒爆縮実験での使用に十分といえる。

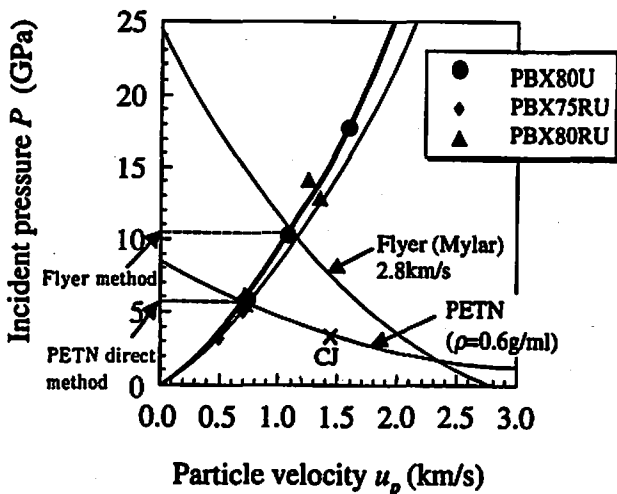


Fig. 8 The evaluation of initiation methods for the PBX's.

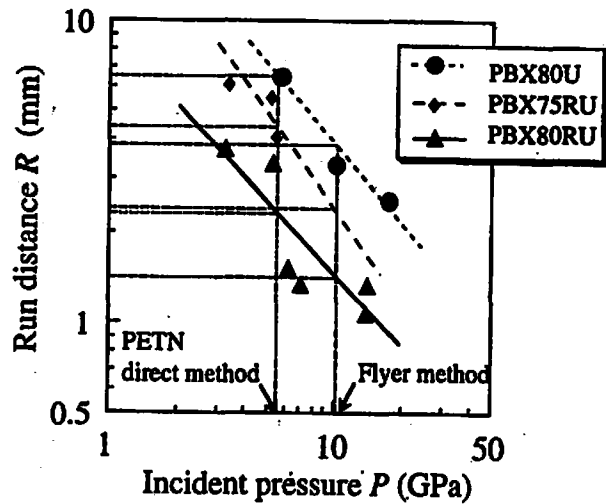


Fig. 9 The estimation of run distances for initiation methods

Table 3 Estimated shock initiation of PBX's

	PETN direct		Flyer method	
	P (GPa)	R (mm)	P (GPa)	R (mm)
PBX80U	5.7	6.5	10.6	3.8
PBX75RU	5.6	4.4	10.1	2.4
PBX80RU	5.7	2.3	10.8	1.4

P : Incident pressure  
R : Run distance to detonation

推定結果を Table. 3 にまとめる。

### 5. 結論

PBX80U, PBX75RU, PBX80RU について次元衝撃起爆特性計測実験を行い以下の結論を得た。

衝撃起爆特性を計測したところ、 $P-u_p$  Hugoniot および  $U_s-u_p$  Hugoniot については3種ともほぼ同等、衝撃起爆感度はPBX80RU, PBX75RU, PBX80U, の順で高いことが確認された。

インピーダンスマッチング法により、衝撃起爆した場合の起爆誘導距離を推定したところ、PBX80RU を飛翔板衝突法で衝撃起爆した場合、円筒爆縮実験に十分な爆轟が得られることが分かった。

### 文献

- 1) L. F. Trueb, J. Appl. Phys., 39, 4707 (1968) .
- 2) D. C. Swift, "Shock Compression of Condensed Matter-1997", eds. S. C. Shmidt, D. P. Dandekar, J. W. Forbes, p.23 (1997) . American Institute of Physics.
- 3) V. F. Nesterenko, "Shock Compression of Condensed Matter-1997", eds. S. C. Shmidt, D. P.

- Dandekar, J. W. Forbes, p. 609 (1997) , American Institute of Physics.
- 4) T. Saito, and I. L. Glass, Proc. Royal Soc., London, A.384, 217 (1982)
  - 5) T. Hiroe, H. Matsuo, K. Fujiwara, S. Sakai, T. Abe, M. Yoshida, and S. Fujiwara, "Shock Compression of Condensed Matter-1995", eds. S. C. Schmidt, W. C. Tao, p. 977 (1995) , American Institute of Physics.
  - 6) T. Abe, M. Yoshida, T. Hiroe, K. Fujiwara and H. Matsuo, Proc. Int. Conf. on High Pressure Science and Technology, 7, 912 (1998)
  - 7) 三好 仁, 夏堀雅彦, 青木晃禎, 香月日出雄, 神津 直, 松村知治, 中山良男, 吉田正典, 火薬学会春季研究発表会要旨集, 149 (1998)
  - 8) R. Gibbs, A. Popolato "LASL Explosive Property Data" p.370, (1980) , University of California Press.
  - 9) 田中克己, 「爆薬の爆轟特性解析」, (1983), 化学技術研究所
  - 10) A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay, J. R. Travis, The Physics of Fluids, Vol. 4, No. 4, 511 (1961)
  - 11) K. Tanaka, S. Fujiwara, M. Kusakabe, M. Yoshida, "Shock Waves in Condensed Matter", edited by Y. M. Gupta, p. 929 (1985), Plenum Press, New York.
  - 12) 吉田正典, 藤原修三, 廣江哲幸, 松尾日出男, 藤原和人, 宮田政信, 酒井伸二, 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 火薬学会秋季研究発表会要旨集, 41 (1994)
-

## Shock initiation characteristics of plastic bonded explosives (PBX) and its application

Takayuki ABE\*, Masatake YOSHIDA\*\*, Tetsuyuki HIROE\*\*\*, Kazuhito FUJIWARA\*\*\*  
Hideo MATSUO\*\*\*, Kenji MURATA\*\*\*\*, Katsuhiko TAKAHASHI\*\*\*\*, Yukio KATO\*\*\*\*

Generation of cylindrically imploding shock waves in solids requires the simultaneous initiation of detonation of high explosive shell at outer surface. In this study, the shock initiation characteristics of three kinds of PBX explosives: PBX80U (HMX wt.80%,  $1.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), PBX75RU (RDX wt.75%,  $1.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), and PBX80RU (RDX wt.80%,  $1.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) are investigated by the wedge tests to examine applicability of PBX to generation of imploding shock waves. Hugoniot and the relationships of incident pressure and run distance to detonation for these PBX have been determined. Using these data, we evaluated initiation run distances for these explosives with two different initiation system; direct initiation by the detonation of low density PETN and flyer impact initiation by a plastic thin layer accelerated by low density PETN. The impedance matching method has suggested that the most sensitive PBX80RU can be expected to produce the symmetrical cylindrical strong shocks in solids successfully with the flyer impact initiation method.

(\*Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto, 860-8555, JAPAN

\*\*National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN

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

\*\*\*\*NOF Corporation, 61-1 Kitakomatsudani, Taketoyo, Chita, Aichi, 470-2398, JAPAN)