

線爆発による平面爆轟波と強い収束波の生成に関する研究

廣江哲幸*, 松尾日出男*, 藤原和人*, 吉田正典**, 藤原修三**
宮田政信*, 酒井伸二***, 深野 剛*, 安部尊之*

PETN爆薬表面に平行・等間隔に設置した銅細線を衝撃電流で一斉爆発させることで平面爆轟波を発生させることができる。本研究では、まずこの方法による平面爆轟波の発生条件、特に線径、線本数、線間隔・薬厚比、電流値等と平面性の関係および爆轟波形成に関する計測実験を行った。この結果、比較的高密度の粉末PETNを低電圧高容量のコンデンサーを用いて起爆し、平面爆轟波を生成させる場合の基本特性が得られた。次に面起爆技術の応用として、高性能爆薬を用いての円筒状収束衝撃波発生装置の開発を行った。PETN爆薬のみを用いる収束波の生成に引続いて、より強い収束波の発生を狙った研究であり、PETNによる飛翔板加速実験やPBX爆薬の衝撃起爆特性実験等の予備実験結果に基づいて装置設計を行った。本装置による収束波計測実験により、PMMA中に対称性の良い強い収束波の生成が確認されたが、数値解析結果との比較からPBXは定常爆轟圧には達していないと判断された。

1. 緒 論

熊本大学と物質工学工業技術研究所の共同研究として、銅細線列の一斉爆発を利用して低密度の粉末PETN中に平面爆轟波や円筒状収束爆轟波を発生させる技術を開発している。これらの技術の応用として平面衝撃波によるダイヤモンドの合成・回収実験¹⁾やPMMA中の円筒状収束衝撃波計測実験²⁾等について報告している。これらの実験は物質研の比較的高電圧低容量型のコンデンサーを用いているが、このコンデンサーからの衝撃電流で起爆させる場合、PETN装填密度を1.0 g/cc程度まで上げると平面性が不良となるため、これまで0.5-0.6 g/cc程度の密度で使用してきた。一方、熊大の低電圧高容量型コンデンサーを用いてのこれまでの実験では、細線本数は物質研に比べ多くとれないが低密度PETNのほうが特に平面

性が良いとの傾向は得られておらず、これまで1.0 g/cc密度のPETNを用いてきた。本研究では、まず比較的高密度のPETNを用い、衝撃電流特性に大きな相違のある後者の装置での平面爆轟波発生条件、特に線径、線本数、線間隔・薬厚比、電流値と平面性の関係および爆轟波形成過程について調べた。

次に円筒状収束波の発生については、これまでPETNのみあるいはPETNによるPETNとシリコンゴムの混合爆薬の起爆によって40-50mm径のPMMA中に一次元の円筒状収束衝撃波を発生させた。本研究では引続きより強い収束波を生成させるために高性能爆薬であるPBX爆薬を用いて固体中に円筒状収束波を発生させる装置の開発を試みた。PETN爆薬を用いての飛翔板加速法とPBX爆薬の衝撃起爆特性に関する検討結果³⁾が装置設計の基礎となっている。本装置による衝撃波計測結果は数値シミュレーション結果と比較検討している。

2. 平面爆轟波発生条件の検討

2.1 実験方法

箱型容器に装填した粉末PETN爆薬(比重:1.0, 装填密度:0.85-1.00 g/cc)の片面上に設置した銅細線列をコンデンサー(20kV, 40 μ F)からの衝撃電流で一斉爆発させることで平面爆轟波を発生させ、爆轟波の爆薬反対面への到達時間をストリークカメラ(日立SP-1)で計測(スリット幅:0.1mm)した。コンデンサーは既報^{1), 2)}で使用してきたものに比べ低電圧高

1995年10月19日受理

*熊本大学工学部材料開発工学科

〒860 熊本市黒髪2丁目39-1

TEL 096-342-3690

FAX 096-342-3710

**物質工学工業技術研究所

〒305 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4788

FAX 0298-54-4783

***パプコック日立(株)

〒235 横浜市磯子区磯子1-2-10

TEL 045-751-1790

FAX 045-751-6132

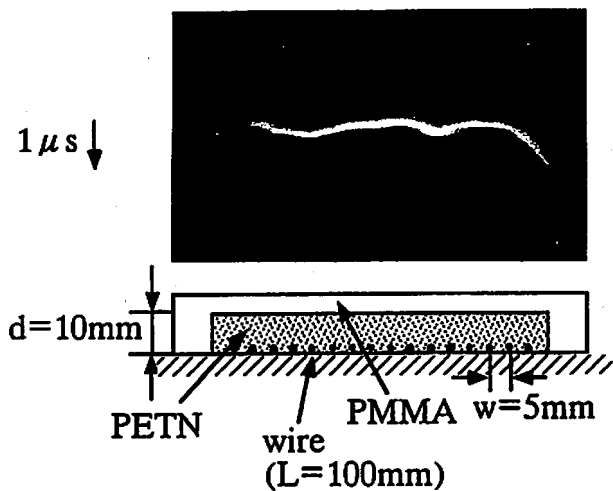


Fig. 1 A streak record for Type A

容量型であり、細線爆発に要する衝撃電流のピーク値までの平均立上がり速度は、これまでより約1桁おそい1 GA/s程度であった。これらの放電波形はログスケイコイルによってモニターされた。PETNの装填形状は3種類とし、平板状装置 (Type A) では細線列、薬厚の諸条件と爆轟波平面性の関連を、また階段状装置 (Type B,C) では爆轟速度と爆轟波形成について調べた。PETNの装填はタッピングのみであり、圧力は加えておらずある程度の装填密度のバラツキは避けられなかった。爆発実験は熊本大学工学部衝撃エネルギー実験所の設備を用いて行った。

2.2 細線列条件と爆轟波平面性

Type Aの実験では、銅細線径 ϕ (175, 100 μm)、細線本数 N 、線間隔 W と薬厚 d (5, 10, 15mm)の比 W/d (0.5-1.0)、衝撃電流計測値等の諸条件とストリーク写真計測による爆轟波到達時間差 Δt との関係を調べた。また各細線長さはいずれも100mmとした。Fig. 1にストリーク写真の例を示す。時間差 Δt を爆轟平面性の評価パラメータとし、衝撃電流については最大電流値 I_M を細線の全表面積 S で除した値 I_M/S を用いるとデータ整理に有効であることが分かった。Fig. 2にこれらのパラメータと線本数 N との関係を $d=10\text{mm}$, $W=5\text{mm}$ の場合のデータを用いて整理している。この図から Δt と N の関係 (下向き矢印、塗りつぶし記号) は N が増えると Δt が増加し平面性が劣化するが線径 ϕ が小さいほど劣化度は少なくなっている。しかし Δt を I_M との関係 (上向き矢印、白抜き記号) で表せば ϕ の影響が無くなり、一本の曲線で表示できることがわかる。これは平面爆轟波が各線からの放射状爆轟波の干渉効果によって線間で増幅・加速される過程を経て形成されることと関係があると思われる。次に本数 $N=8$ 、線径 $\phi=175\mu\text{m}$ に固定して平面性 Δt に

Max. Current/Surface Area I_M/S (A/mm^2)

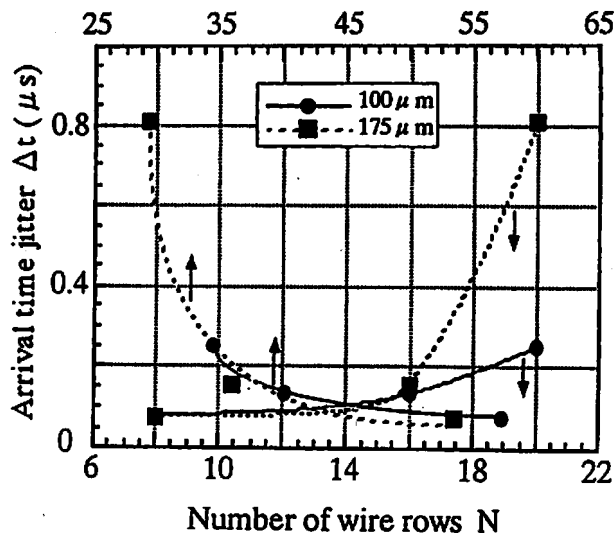


Fig. 2 Relations of Δt , N and I_M/S (Type A, $W = 5\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$)

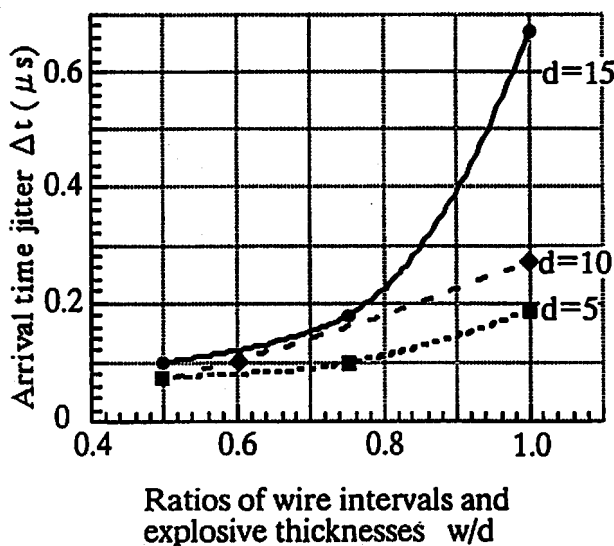


Fig. 3 Relations of Δt and w/d (Type A, $\phi = 100\mu\text{m}$, $N = 8$)

与える W と d の影響を調べた。Fig. 3に実験結果を示す。平面は形成過程から予測されることであるが、 Δt を小さくするためには W/d 値を少なくする必要がある、薬厚 d が大きい程この傾向が強いことが分かる。Fig. 2とFig. 3を用いると線爆発を利用する平面爆轟波生成装置の基本設計を行うことができる。本研究では密度の小さいPETNを用いた類似の実験も行ったが平面性改善の効果は認められなかった。

2.3 薬厚と爆轟波形成

爆薬装填部に段差 (Type B,C) を設けてPETN薬厚と定常爆轟あるいは平面状爆轟への移行との関係把握を試みた。線間隔、線長、線径は各々5mm, 100mm, 175 μm

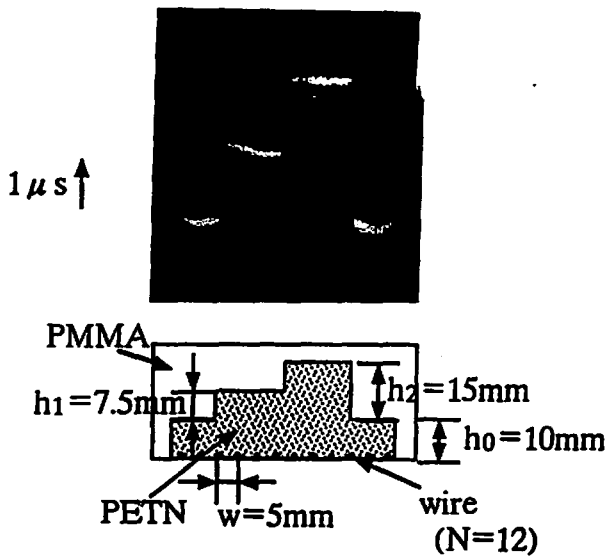


Fig. 4 A streak record for Type B

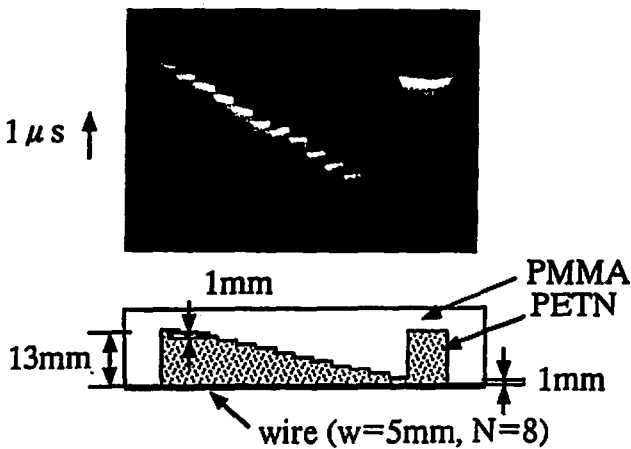


Fig. 5 A streak record for Type C

である。Fig. 4にType Bのストリーク写真例を示す。ベース薬厚 h_0 に更に段差を設けて爆轟速度の計測を行っており、PETN定常速度5 km/sにはほぼ達している。ただし $h_0 = 5$ mmでは爆轟波のベース薬厚通過時に未だ細線間の到達遅れが認められた。またType CではFig. 5に示すように線爆面から多数の細かい段差を設けた。Fig. 5ではストリークのスリット方向を細線方向と一致させている。これらの結果から薬厚2-4 mm程度ではほぼ定常爆轟速度に移行していると思われる。また細線方向をFig. 5の直角方向(紙面垂直)に設置した結果からは、ほぼ6-7 mmの薬厚で細線間での干渉が完遂され平面波が形成されると推測された。

3. 高性能爆薬を用いた円筒状収束衝撃波の生成

3.1 実験方法および予備実験

本節の実験は物質研の爆発衝撃関連設備を用いて実施され、基本的な使用装置は既報^{1), 2)}と同じであり、使用したPETN装填密度と銅細線径は各々0.6 g/cc

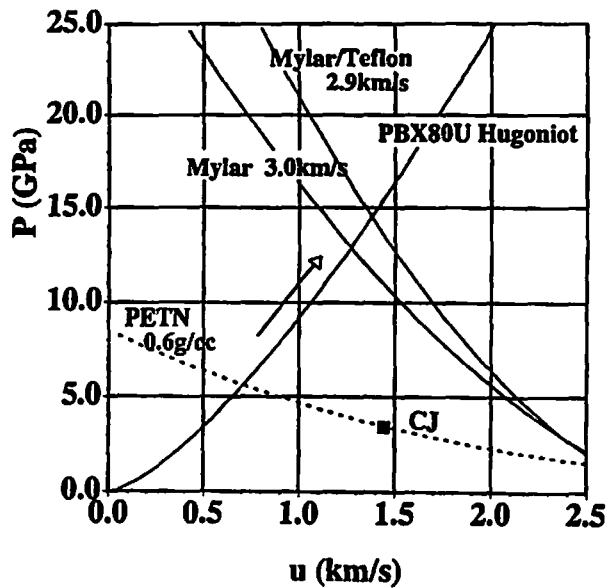
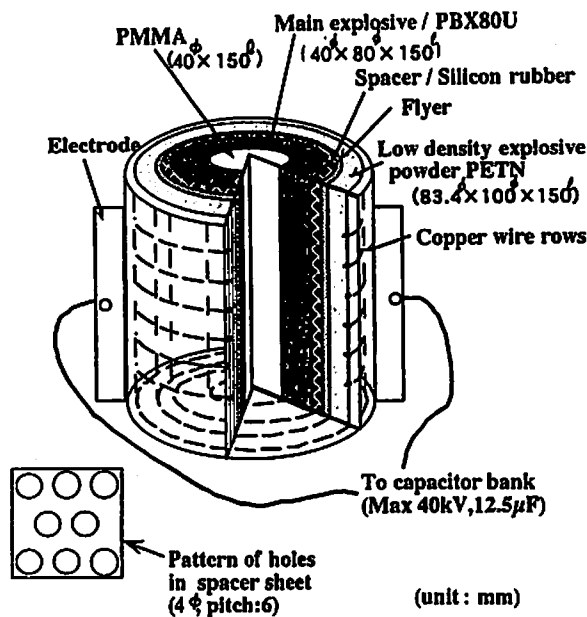


Fig. 6 The estimation of the incident pressure from the Hugoniot curves of the PBX, PETN and the flyer materials

と100 μ mである。本研究の目的である高性能爆薬PBXを用いた円筒状収束衝撃波発生装置の開発のために幾つかの予備実験を実施している。まず最外円筒となるPETN円筒殻について外径100mm、薬厚6 mmの供試体を準備し、外表面に銅細線を周方向・平行(間隔: 6, 12mm)に設置し、コンデンサー(Max.40kV, 12.5 μ F)からの衝撃電流で一斉起爆させ、円筒殻内面への爆轟波の到達時間差 Δt (間隔12mmでは線間の時間遅れは無視)をストリーク写真で計測²⁾している。その結果、電極間の線本数を44本まで増加させても Δt を175ns以下にでき、本数を減少させれば一本当りの電流値も増加し、時間差も小さくなることを確認している。また高性能爆薬としてHMX80%, 活性バインダー20%からなる日本油脂製PBX 80U(密度: 1.75 g/cc, 爆速: 8.3km/s)を用いることとし、模型試験により起爆誘導距離と入射圧との関係およびウゴニオ関係式³⁾を求めた。この結果、PETN爆薬で直接PBXを起爆させた場合、起爆誘導距離は6 mm以上となり精度のよい収束波の生成が難しいことが分かった。そこでPETNで加速した飛翔板をPBXに衝突させて強い入射圧を発生させることを考えた予備実験³⁾を行っている。この結果、線爆発によるPETN(6 mm厚)の平面爆轟ガスがMylar, Teflonの薄板(0.1-0.3 mm厚)を約3 km/sに加速させることを計測(Arガス中の衝突実験)により確認した。この結果、PBXへの入射圧が増加し、起爆誘導距離は2-3 mm程度に小さくなることが分かった。Fig. 6は飛翔板法によるPBX入



Case	Number of wire rows N	Flyer (mm)
A	8	Mylar (0.1) + Teflon (0.1)
B	12	ditto
C	22	Mylar (0.2)

Fig. 7 Experimental set-up for generation of cylindrical imploding shocks and test conditions

射圧の増加をPETN直接法の場合と比較して示している。またPETN-飛翔板-PBXの組合せ実験により精度の良い平面爆轟波の生成も確認した。

3.2 収束波発生装置

PETNとPBXの起爆特性実験結果に基づいてFig. 7に示す円筒状収束波発生装置を開発した。軸長150mmのこの装置の構成は外側から銅細線列(間隔:6mm), PETN円筒殻(8.3mm), 飛翔円筒(MylarまたはTeflonとの組合せ:0.2mm厚), スペース(1.5mm厚), PBX円筒(20mm厚), PMMA円柱(径:40mm)より構成されている。スペースには多数の円孔を設けたシリコンラバーシートを用いた。実験は細線本数(電極間本数はこの2倍)と飛翔体材料を図中に示すように変化させたCase A, B, Cの3ケースについて実施した。線本数の少ない供試体では円筒軸方向中央断面での一次元性が損なわれる可能性があるが, 供試体軸方向長さを十分大きくしているので端部からの膨張波の影響は少ないとし, むしろ少ない本数で時間精度の良い収束波を発生させることに主眼を置いた。PMMAの軸方向にはアルゴンフラッシュを照射させ, 収束する衝撃波のシャドウグラフをストリークおよびコマ撮り写真によって計測した。計器はCordin Model 116, IM-ACON 790およびULTRANAC FS501である。

3.3 実験結果およびその検討

爆発実験で計測されたPMMA中を収束する衝撃波

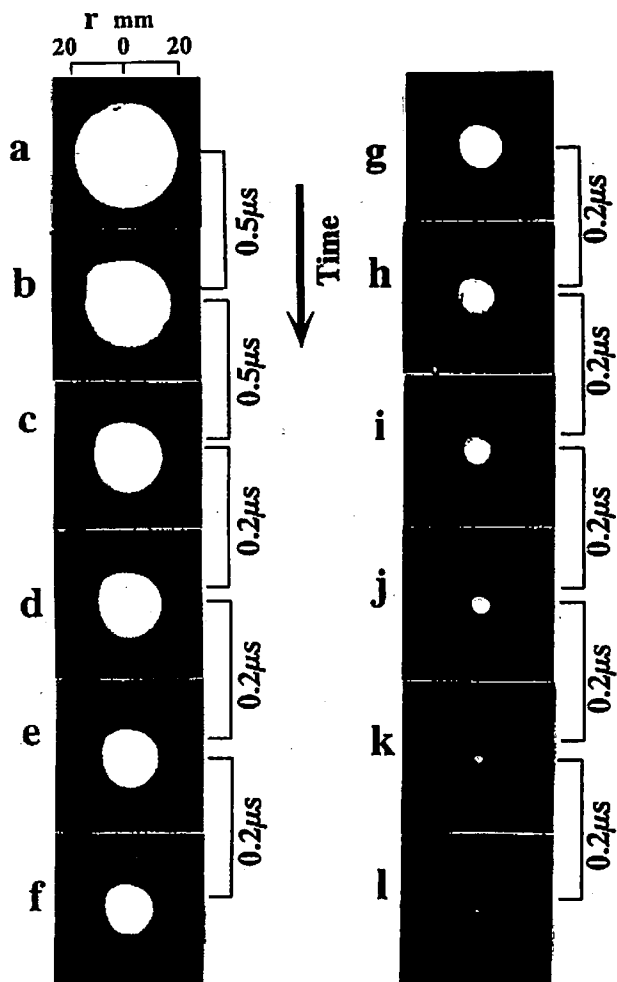


Fig. 8 Typical series of sequential framing camera shadowgraphs for Case B

(シャドウグラフ)を示す。Fig. 8はCase Bのコマ撮り写真を示す。初期に若干の非対称部分が認められるが, 以後はほぼ一定の形状を保って中心近傍まで収束していることが分かる。これから固体中の衝撃波は比較的安定であるといえる。Fig. 9はCase Aのストリーク写真を示す。対称的な衝撃波軌跡が観測され, 中心軸近傍では収束効果による加速が認められる。この軌跡から中心部の衝撃圧は200-300GPaと推測されたが正確には圧力計測が必要である。収束後は中心軸でイオン化による発光現象が見られる。またCase A, B, Cの軌跡に大差はなく, PMMA軸中央断面での一次元性は保持されていると思われる。そこで一次元ランダムチョイス法^{4), 5)}による数値解析を行った。ただしPBXの爆轟については直ちに定常爆轟に達すると仮定し, 既報²⁾と同じくC-J Volume Burn法によって別途差分解析を行った。Fig. 10に衝撃波軌跡についての計測結果と解析結果を比較した。解析ではPBX爆轟ガスの比熱比 γ を3.0と4.5の2ケースで行っている。一般にPBXの γ 値は2.7-3.0程度と考え

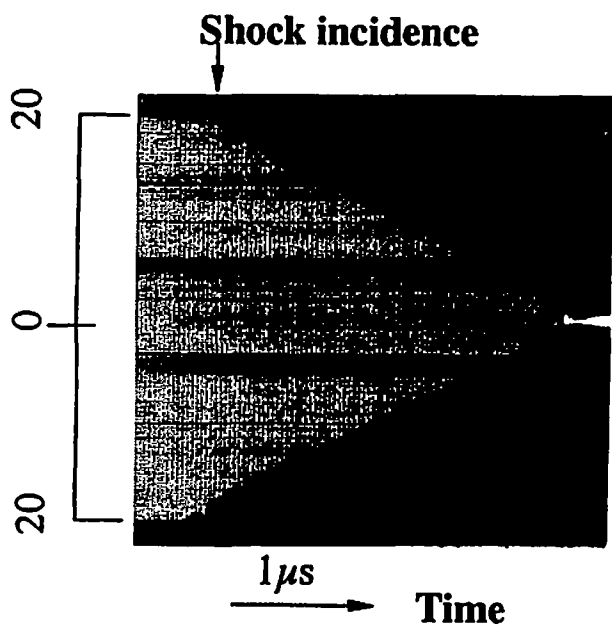


Fig. 9 Streak camera record of shadowgraph for case A

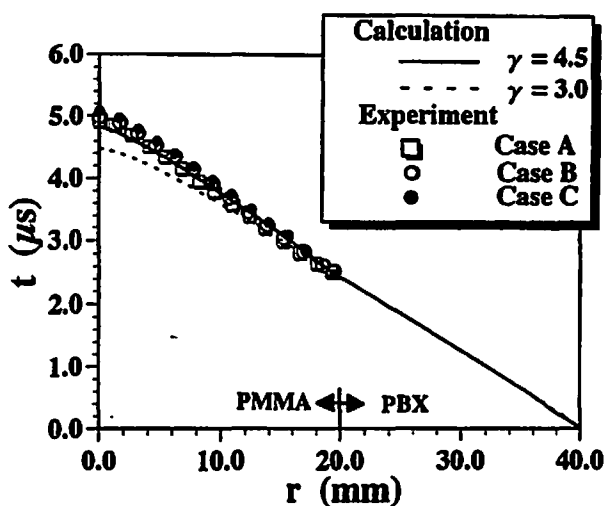
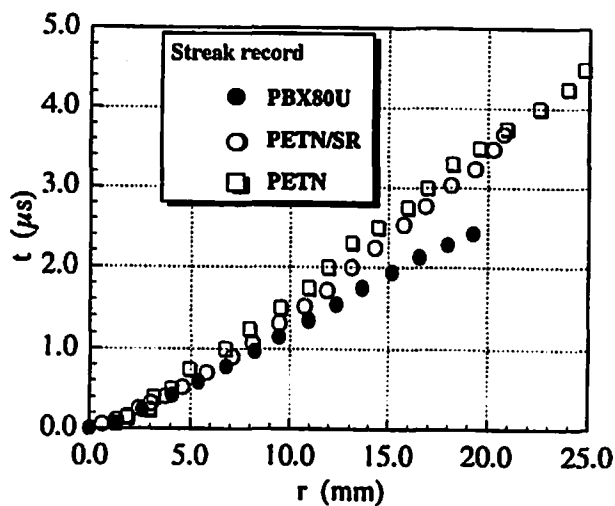


Fig. 10 Comparison of experimental and numerical results for shock trajectories in PBX and PMMA

られるが実験結果は $\gamma=4.5$ の解析結果に近い。このことから本研究ではPBXの爆速はC-J速度に達しているが定常圧に未だ到達していない⁶⁾ものと推測される。しかし、PMMAの変形の影響や爆轟ガスの非理想性の問題もあり、何らかの実証を行うことが今後の課題である。またFig.11は既報²⁾の結果を含め3種類の爆薬によるPMMA中円筒状収束衝撃波軌跡を比較している。これからも本研究で高性能爆薬PBXを用いたことで強い収束衝撃波が生成されたことが分かる。

4. 結論

線爆発を利用した平面および収束爆轟波生成技術の



Measured shock trajectories

Fig. 11 Comparison of experimental shock trajectories in PMMA using PBX, PETN/SR and PETN

開発を行い、以下の結果を得た。

- (1) 装填密度 1.0 g/cc の粉末PETNを比較的低電圧大容量のコンデンサーを用いて起爆し、平面爆轟波を生成させるための条件、特に電流値、爆轟波到達時間精度、線本数、線間隔、薬厚等基本パラメータ間の関係を把握した。
- (2) 階段状に設置した爆薬の爆轟波計測から(1)の平面爆轟波が形成されるのに要する薬厚について知見が得られた。
- (3) 高性能爆薬PBX 80Uの衝撃起爆特性、PETN起爆の細線条件、PETNによる飛翔板加速等に関する予備実験結果に基づいてPBXを用いる円筒状収束波発生装置を開発した。
- (4) 爆発実験により対称性の良い強い収束衝撃波が計測できた。しかし数値解析結果との比較から、本実験ではPBXは未だ定常爆轟圧には達していないと判断された。

今後は、中心部での圧力計測や試料回収法等について引続き検討を進める予定である。

謝 辞

本研究の一部は(財)火薬工業技術奨励会の助成を受けて実施されました。PBX爆薬は日本油脂(株)村田健司氏、高橋勝彦氏、加藤幸夫氏によって製作提供されました。また平面波に関する実験・解析で西島製作所(株)矢津田恵子氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 廣江哲幸, 松尾日出男, 藤原和人, 吉田正典, 藤

- 原修三, 宮田政信, 赤沢輝行, 工業火薬, 53, 219 (1992)
- 2) 廣江哲幸, 松尾日出男, 藤原和人, 吉田正典, 藤原修三, 宮田政信, 田之上辰朗, 火薬学会誌, 55, 24 (1994)
- 3) 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, 平成6年度火薬学会秋季研究発表会要旨集, 41 (1994)
- 4) T.Hiroe, H.Matsuo and K.Fujiwara, J.Appl. Phys. 72, 2605 (1992)
- 5) T.Hiroe, H.Matsuo and K.Fujiwara, Proc. of 19th ISSW-1993, Marseille, III, 267 (1995)
- 6) C.C.Maider, "Numerical Modeling of Detonation", (1979) University of California press

A study on generation of plane detonation and strong imploding shocks by wire-row explosion

by Tetsuyuki HIROE*, Hideo MATSUO*, Kazuhito FUJIWARA*
 Masatake YOSHIDA**, Shuzo FUJIWARA**, Masanobu MIYATA*
 Shinji SAKAI***, Tsuyoshi FUKANO* and Takayuki ABE*

The wire-row explosion technique can be applied to generate plane and cylindrical detonation waves in the low-density powder PETN. In this study, conditions of wire-rows have been investigated for the detonation with sufficient planarity, using the 1 g / cc PETN packed in the flat or stair-shape box-type container and a condenser bank of 20kV and 40 μ F. The relation of wire-row number, peak current per wire-surface area, time jitter of detonation arrival, intervals of wire-rows and thickness of PETN are obtained, including interference process of initial detonation between neighboring wires. Next, an advanced wave generator for the strong cylindrical imploding shocks has been developed, using the preliminary test results with the shock initiation of the high explosives PBX 80U. Observed shadowgraphs of imploding shocks in PMMA cylinder shows that the strong cylindrical shocks are focusing with a fairly good axisymmetry, but the comparison with the numerical results indicates that the actual steady state C-J pressure of the PBX seems to be on the way of build-up in this study.

(*Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan

**National Institute of Materials and Chemical Research, Ibaraki 305, Japan

***Babcock-Hitachi K.K., Isogo, Yokohama 235, Japan)