

線爆発を利用した固体中収束衝撃波発生装置の開発

廣江哲幸*, 松尾日出男*, 藤原和人*, 吉田正典**

藤原修三**, 宮田正信*, 田之上辰朗***

爆薬表面に平行・等間隔に設置した銅細線を一齐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。本研究ではこの技術を応用して固体中に一次元の円筒状収束波を発生させる装置を開発した。まず長胴の爆薬円筒殻 (PETN爆薬, 外径: 100mm, 有効軸長: 132mm) 中に±170 ns以内の時間精度を有する収束爆轟波を発生させる諸条件 (線間隔, 本数等) を把握した。次に透明固体であるPMMA円柱体 (外径: 42-50mm) を爆薬殻 (PETN, PETN/SR) の中心部に設置し, その中を衝撃波が収束する挙動 (シャドウグラフ) をストリーク及びフレミングカメラを用いて計測した。その結果, 衝撃波は中心点付近まで対称性を保って収束しており, 収束点近傍では加速効果もあることが分かった。またPETN殻の場合, 収束波軌跡の計測結果と一次元数値シミュレーション結果とが良く一致した。

1. 緒 論

円筒状収束衝撃波の発生は固体・粉体等の凝縮媒体に対しては, 例えば工業用ダイヤモンドの衝撃合成のように, 主として大容量試料の衝撃圧縮処理技術として行われてきた。しかしこれらの方法はいずれも試料中に軸方向に移動する収束波を発生させるものであり, 中心部でマッハディスクが生成される場合は一軸平面圧縮状態となる。このような2次元収束波の発生でなく完全に一次元性を保った収束波を発生させることは凝縮媒体中の収束点近傍で高圧・高温の極限状態を生成させることになり極めて興味深いテーマである。しかしその発生方法および生成された衝撃波の計測は容易ではなく, 多くの研究がなされている気体^{1) - 4)}に比べて固体中に一次元の収束波を発生させた報告は少ない。球状収束波の場合, レーザビーム

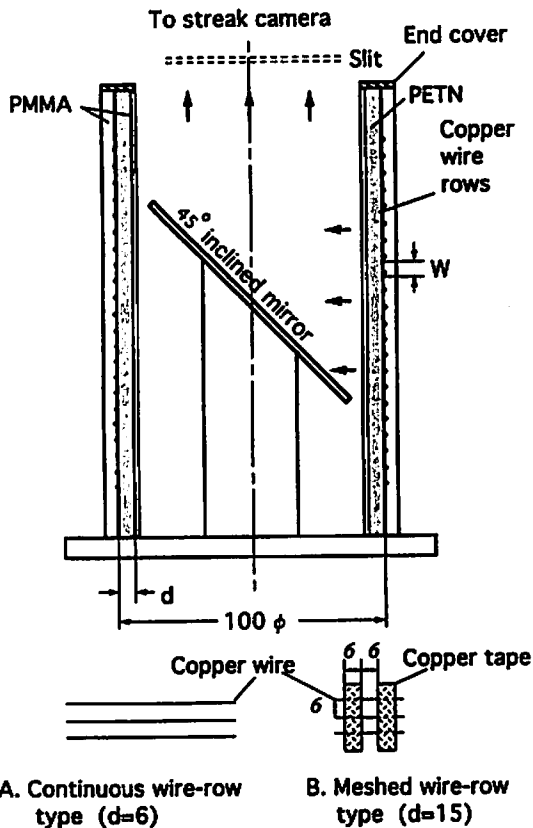


Fig. 1 Detonation test setup of PETN cylindrical shells (unit: mm)

1993年10月1日受理

*熊本大学工学部材料開発工学科

〒860 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-344-2111 内線3690

FAX 096-345-1585

**物質工学工業技術研究所

〒305 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4789

FAX 0298-54-4783

***石川島播磨重工業

〒135 東京都江東区豊州3-2-16

TEL 03-3534-4354

FAX 03-3534-4460

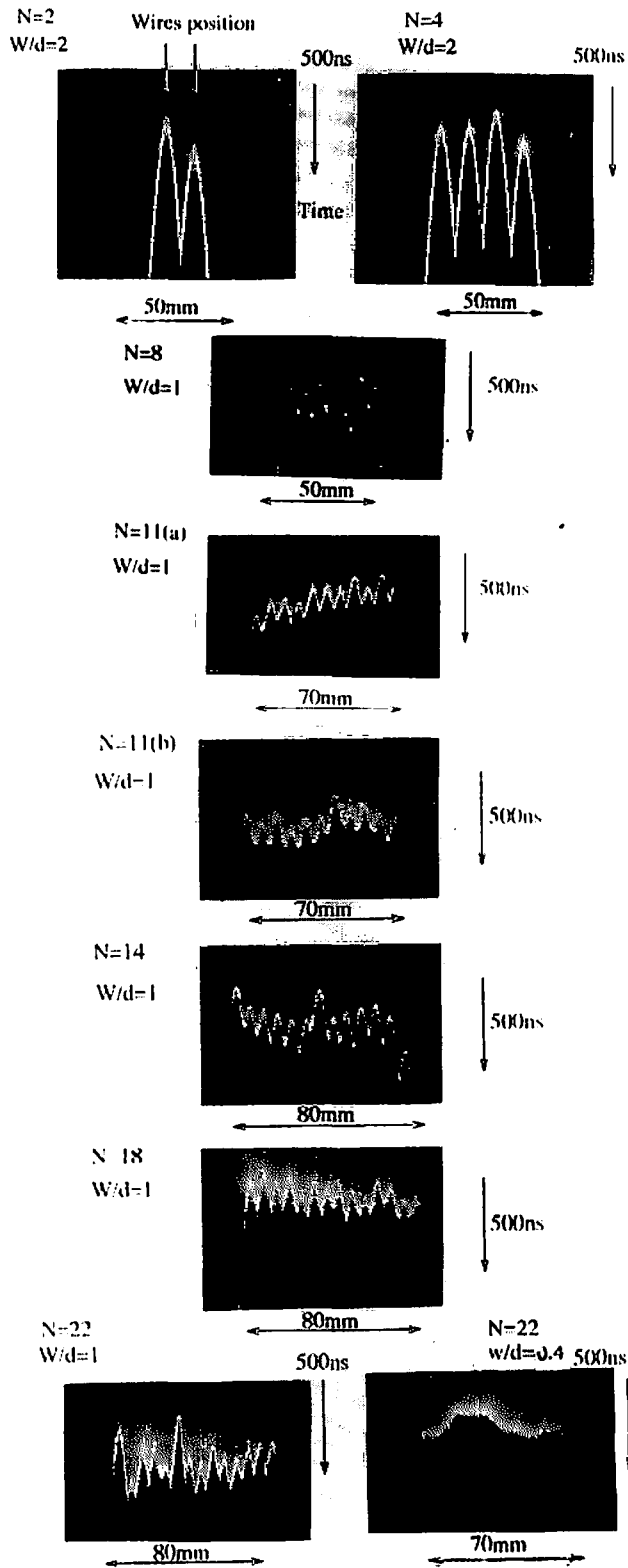


Fig. 2 Streak camera records for detonation test of PETN shells

照射によって球殻状爆薬の外表面を一齐起爆させ、中の球状の凝縮体に一次元収束波を発生させた例⁵⁾がある。また固体中に一次元の円筒状収束衝撃波を生成させるには、側面からの膨張波が到達しないほど軸方向に十分長い円柱状固体を半径方向に一齐に圧縮する必要がある。これまで円筒状の爆薬レンズを構成した方法⁶⁾があり、金属の箔⁷⁾やメッシュ⁸⁾、⁹⁾の爆発を適用することも有効と考えられる。本研究ではベンスリット爆薬 (PETN) 面上に設置した銅細線を衝撃大電流によって爆発させる方法を用いた。この方法は既に報告した平面爆轟波発生装置¹⁰⁾や大気中での収束衝撃波発生法³⁾、⁴⁾を応用したものである。

最初に長胴の円筒状爆薬殻を一齐起爆させる細線条件を実験的に把握した。生成された爆轟波が内表面に到達する時間精度を計測して爆轟精度を評価している。次にこの爆薬殻を用いた爆薬直接法によってアクリル (PMMA) 中に円筒状収束衝撃波を発生させた。収束する衝撃波のシャドウグラフをコマ撮りおよびストリークカメラによって計測している。最後にランダムチョイス法による一次元波動解析コード¹¹⁾、¹²⁾を用いて固体中収束波生成実験の数値シミュレーションを行ない、衝撃波面軌跡の計測結果と解析結果を比較した。

2. 円筒状爆薬殻の起爆実験

本研究の実験は工科院物質工学工業技術研究所の爆発衝撃関連設備を用いて実施された。線爆用キャパシターバンク (12.5μF, Max. 40kV)、銅細線径 (100μm)、PETN密度、細線本数、線列方式 (メッシュタイプを含む) 等がこれまで熊大で行われてきた大気中衝撃波を対象とした実験³⁾、⁴⁾と異なっており、放電電流の立上がり速度は10倍以上である。Fig. 1に円筒状爆薬殻の起爆実験装置を示す。細線列爆発で生成した爆轟波の斉時性は先に平面波の実験¹⁰⁾で行ったように爆轟波が自由表面へ到達する時間のバラツキで評価できる。本研究では爆薬円筒中心部に45度の傾斜鏡を設置し、爆轟波の内面到達をストリークカメラで計測した。スリットは円筒軸方向 (細線列直角方向) に設定している。衝撃電流はキャパシターバンクから、中心軸に対称位置の爆薬円筒外面の軸方向に設置した一对の電極を通じ、爆薬外側容器内表面上に周方向、等間隔、平行に貼付けた銅細線列に流れ込み一齐爆発させる。大部分の実験はこの連続線列タイプで行ったが、一部は平行線列の直角方向に銅テープのブリッジを設けたメッシュ状線列タイプも試みた。後者は爆発させる細線長さを半分に行うため本数を増やした場合、エネルギー的に有利になることを期待した。低密度PETN爆薬 (装填密度: 0.58-0.60g/cc) はタッピングしながら装填し、機械的圧縮は行っていない。実験

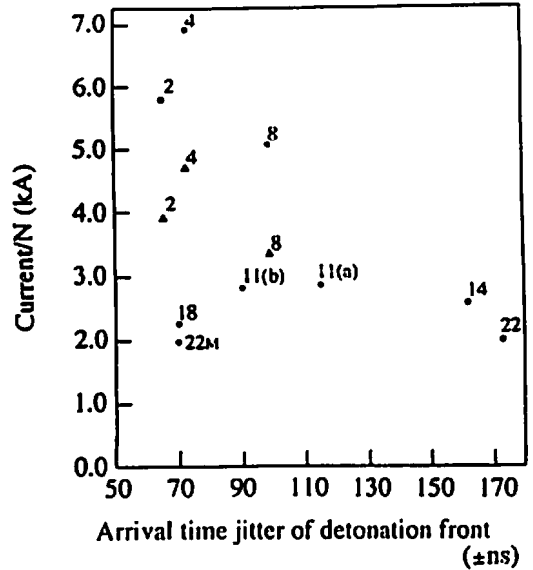


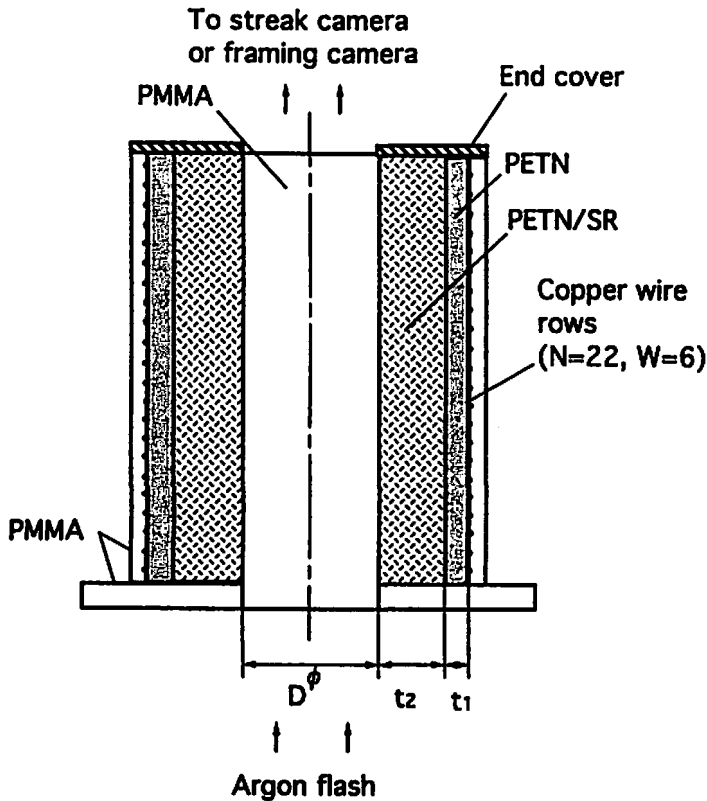
Fig. 3 Peak values of current per wire vs. arrival time jitter of detonation front. The numbers beside dots indicate the number of rows

は爆薬外径100mmを一定とし細線本数 $N(=2-22)$ 、薬厚 $d(=6, 15\text{mm})$ 、線間隔 $W(=6, 12\text{mm})$ 、線列タイプを変化させた細線列条件で実施し、爆轟波の到達時間精度を流れ速度 $8\text{mm}/\mu\text{s}$ のストリークカメラで計測した。

Fig. 2に実験の実施順序に従って流れ写真を示す。まず線間隔と薬厚の比 $W/d=2$ の場合、細線中間部の爆轟波の到達が大きく遅れている。しかしこの時間遅れは $W/d=1$ (間隔を狭めた場合) では著しく改善されることが分かる。これから隣り合う細線爆発による初期の爆轟波間の干渉が爆轟波面の平滑化に重要な役割をしていると考えられる。細線本数を増加させると全般的には到達時間差は増加の傾向にはあるが、一次元収束波の生成に十分 (有効軸長: 132mm) であると推定される本数の22本まで増加させても時間差は $\pm 170\text{ns}$ 以内であった。またメッシュ状タイプ線列 ($N=22$) についても実用できることが分かった。キャパシターバンクからの放電電流波形はロゴスキーコイルを用いて計測している。Fig. 3は細線一本当りの最大電流値とストリーク計測による到達時間差の関係をプロットしている。時間差のバラツキが大きいが、全般に電流値が大きいほど時間差が小さく、本実験では2kAがほぼ限界となっている。

3. 固体中一次元円筒状収束衝撃波の生成

前節で得られた爆薬円筒の起爆実験結果を基に Fig. 4に示す固体中一次元収束衝撃波発生装置を開発した。今回、中心部には透明固体であるPMMAを設置



Case	Type of Wire Rows	Thickness of Expl.(mm)		Dia. of PMMA D(mm)	Measurement of Shocks
		PETN	PETN/SR		
A	Meshed	25	0	50	Streak
B	Continuous	8	21	42	Framing
C	Continuous	8	21	42	Streak

Fig. 4 Generator of the one-dimensional cylindrical imploding shocks in solids (PMMA) and test conditions

し、アルゴンフラッシュによりPMMA中を収束する衝撃波を高速コマ撮りまたはストリーク撮影した。細線列は $N=22, W=6\text{mm}$ とし連続線列とメッシュ状線列の両タイプを用いた。また爆薬はPETN(装填密度: 0.54g/cc)のみの場合またはPETNの内側に更にPETN70 wt.%, シリコンゴム (SR)30wt. %のPETN/SR(装填密度: 1.32g/cc)を設置した場合について実施した。Fig. 4中の表にA-Cの3ケースについての実験条件を示している。

Fig. 5 (a), (b)はケースA, Bの実験においてPMMA中を収束する円筒状衝撃波のシャドウグラフを時間間隔 $1\mu\text{s}$ でコマ撮り撮影したものである。(a)はPETNのみによって駆動された場合で、写真gとhの間で収束点に到達しており、またPETN/SRを用いた(b)では(a)に比べ約25%速く伝播し写真eとfの間で収束したと推定される。衝撃波面の外側には若干の

散乱光があるが衝撃波は収束点近傍まで対称性の良い円形を保って収束していることが分かる。衝撃波収束後は後方あるいは側面からの膨張波の干渉でPMMA中には引張り力が作用し破壊に至るが(b)ではこの過程にあると思われる円形波も認められた。Fig. 6はケースCの実験におけるPMMA中円筒状収束衝撃波の流れ写真を示す。収束点まで上下対称形の衝撃波面軌跡が計測できる。ケースBとCとは同一条件の実験でありFig. 5 (b)(平均半径の変化)とFig. 6(上下2本の軌跡)とからFig. 7に示すような収束衝撃波軌跡の計測データが得られた。各データは良く合致しており、また約 5.5km/s で入射した衝撃波は収束点近くでかなり加速していることが認められる。この収束段階の定量的速度評価は今後の課題である。

4. 数値シミュレーションおよび考察

収束衝撃波のように急激な立上がりを示す衝撃波の

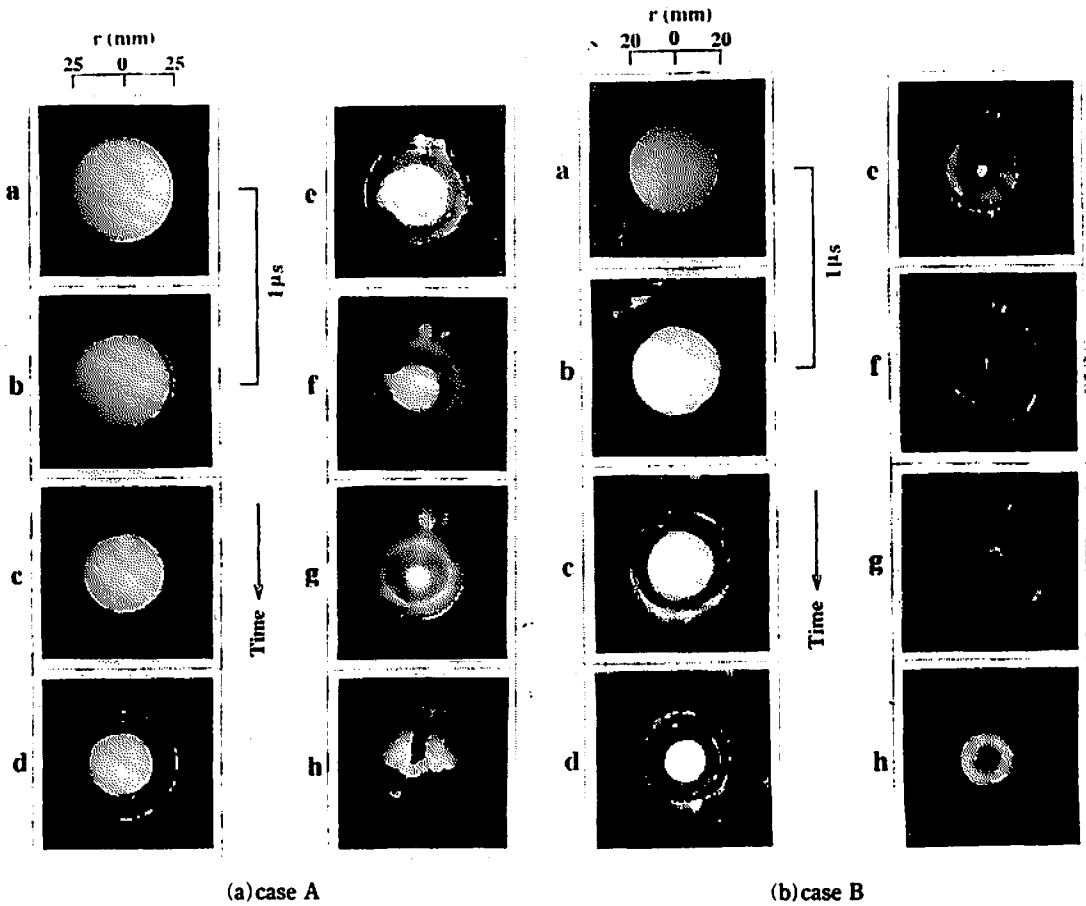


Fig. 5 Framing camera shadowgraphs of imploding shocks in PMMA taken at intervals of $1 \mu s$ (case A, B)

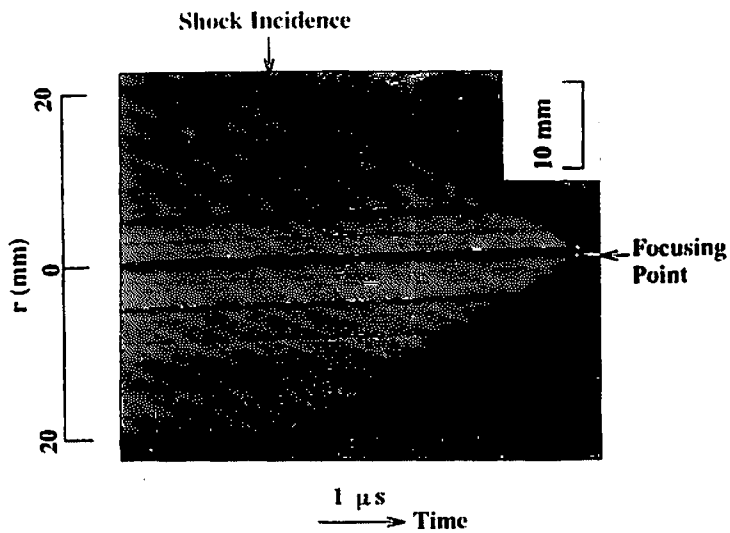


Fig. 6 Streak camera shadowgraphs of the imploding shock in PMMA (case C)

解析においては不連続性を保持する特性を有するランダムチョイス法 (RCM) が適している。最近、次元

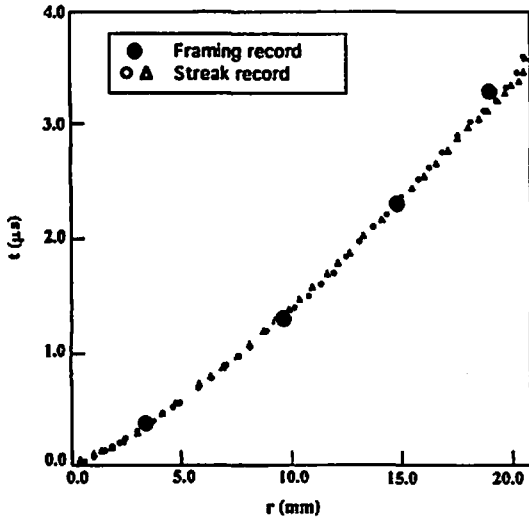


Fig. 7 Observed shock trajectories in PMMA (case B,C)

RCMが固体・気体系にも応用されるようになった^{11) 12)}のでこの一次元解析コードの適用を試みた。ただしPETNの爆轟については起爆後直ちに定常爆轟(後方は理想気体)に達すると仮定してC-J volume burn法¹³⁾を適用し、別途差分解析を行った。従ってRCM解析は爆轟波がPMMAに到達した時点で開始している。Fig. 8に数値シミュレーションにおける境界条件, PETNのC-J値, PMMAのGruneisen状態式定数およびPETN生成ガスの気体定数等を示す。なおPETN/SRについては定常爆轟に至るまでの過程が無視できないと判断されたのでここではケースAについてのみ数値計算結果を報告する。Fig. 9は起爆時点から衝撃波が収束点に至るまでの軌跡について数値解析結果とコマ撮り写真からの計測結果を比較しており、両者はほぼ一致している。ただし計測結果は衝撃波のPMMAへの入射を基準にプロットした。またRCM解析の各計算ステップにおいて自由面からの膨張波侵入

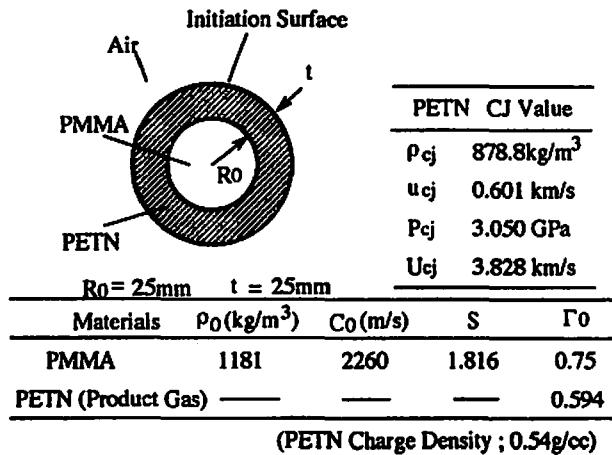


Fig. 8 Conditions for the numerical simulation of test case A

角度¹⁴⁾を毎回計算しその軌跡を計算したところ本ケースにおいてPMMAは軸長80mm以上あればその中央部で一次元性が保持できることが分かった。以上から本研究で開発した装置によって固体中に一次元の円筒状収束衝撃波が発生できたことを数値解析によって確認した。

5. 結論

爆薬 (PETN) 面上に設置した銅細線列をキャパシターバンク (12.5μF, Max. 40kV) からの衝撃大電流で爆発させることを利用して以下の結論を得た。

- (1) 外径100mm, 軸長132mmの円筒状爆薬殻中に±170ns以内の時間精度を有する収束爆轟波を発生させる線列条件を把握した。

- (2) この技術を活用してPMMA中に円筒状収束衝撃波を発生させ計測により真円性の良いことを確認した。

- (3) 一次元の数値解析によりPETN駆動による衝撃波軌跡の計測結果が良好にシミュレートできた。

本研究によって固体中に円筒状の一次元収束波が発生できることが確認できたので今後は更に強力な爆薬を用いてより強大な高圧・高温の極限状態を生成させたい。また中心部での圧力・温度計測および試料の回収法等についても検討を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は助火薬工業技術奨励会の助成により行いました。ここに記して謝意を表します。

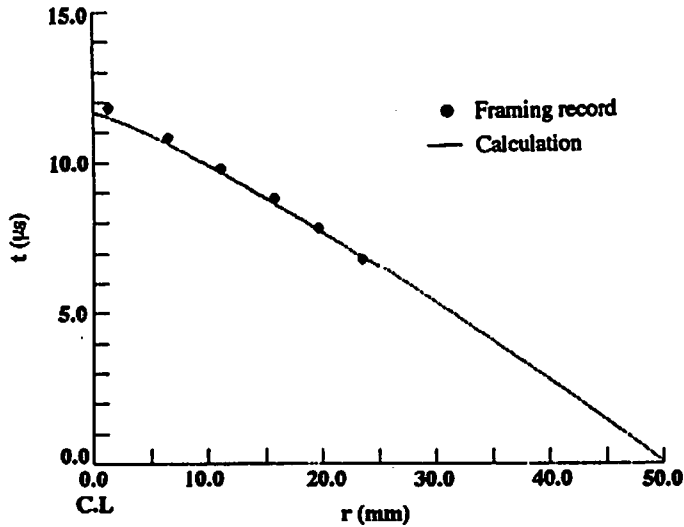


Fig. 9 Comparison of numerical and experimental results for shock trajectories in PETN and PMMA (case A)

文 献

- 1) D. E. Roberts and I. I. Glass, *Phys. Fluids* 14, 1662 (1971)
- 2) K. Takayama, O. Onodera and Y. Hoshizawa, *Theor. and Appl. Mech.* 32, 117 (1984)
- 3) H. Matsuo and Y. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, 51, 3126 (1980)
- 4) H. Matsuo and K. Fujiwara, *Phys. Fluids A* 2, 226 (1990)
- 5) M. R. Wixon, W. B. Fechner, R. L. Maynard, N. W. Schmerberg, and F. J. Mayer, *Proc. of shock Waves Condensed Matter 1987*, edited by S. C. Schmidt and N. C. Holmes, P. 403 (1988) Elsevier Science Publ
- 6) M. Yoshida, *Proc. of 2nd Workshop on Industrial Application Feasibility of Dynamic Compaction Technology*, 263 (1988)
- 7) R. S. Dennen and L. N. Wilson, *Proc. Explos. and Shock Waves*, 2, P.145 (1962) Plenum
- 8) R. I. Butler, M. Cowan, B. W. Duggin and F. M. Mathews, *Rev. Sci. Inst.* 47, 1261 (1976)
- 9) M. J. Forrestal, B. W. Duggin and R. I. Butler, *J. Appl. Mech.* 47, 17 (1980)
- 10) 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)
- 11) T. Hiroe, H. Matsuo and K. Fujiwara, *J. Appl. Phys.* 72, 2605 (1992)
- 12) T. Hiroe, H. Matsuo and K. Fujiwara, *Proc. of 19th ISSW, Marseille*(1993) in press
- 13) C. C. Maider, "Numerical Modeling of Detonation", (1979) University of California press
- 14) Y. B. Zel'dovich and Y. P. Raizer, "Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena", 2 P.747 (1966) Academic press

**Development of a wave generator for cylindrical imploding shocks in solids
by exploding wire-rows**

by Tetsuyuki HIROE*, Hideo MATSUO*, Kazuhito FUJIWARA*, Masatake YOSHIDA**
Shuzo FUJIWARA**, Masanobu MIYATA*, and Tatsuro TANOUE***

Plane detonation waves are instantaneously produced by exploding parallel copper wirerows covered over the surface of explosives, using a high voltage impulsive current. In this study, such wire explosion technique is applied to produce one-dimensional cylindrical imploding shock waves in solids. At first, the wirerow conditions are obtained to generate the imploding detonation waves within the longitudinal arrival-time jitter of ± 170 ns in long cylindrical PETN shells (outer dia.: 100mm, length: 132mm). Next, transparent PMMA cylinders (dia.: 4252mm) are set inside of the cylindrical charge assemblies (PETN, PETN/SR), and the shadowgraphs of imploding shocks in PMMA are taken, using high-speed framing camera and streak camera. The photos show that the axisymmetry of the imploding shocks has been maintained in the focusing stage and the shocks accelerate near the focusing point. The observed shock trajectories in use of PETN coincide with those reproduced by the one-dimensional numerical simulations.

(*Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860, Japan

**National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1 Higashi,
Tukuba, Ibaraki 305, Japan

***Ishikawajima-harima Heavy Industries, Ltd. 3-2-16 Toyosu, Koto-
ku, Tokyo 135, Japan)