

## 線爆発による平面爆轟波の生成とその応用

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\*, 赤沢輝幸\*

爆薬面に複数本の鋼細線を平行、等間隔に設置し、これに衝撃大電流を加え一斉爆発させると爆薬中に強力な平面爆轟波を生成させることができる。本研究ではストリークカメラで爆轟波を観測することにより細線の長さや本数の組み合わせや爆薬構成等の適性について調べた。その結果、径 $100\mu\text{m}\phi$ 、長さ $120\text{mmL}$ の鋼細線16本を等間隔に配置することで最終的に爆薬中(PETN)  $100\text{mm}\phi$ の面積に $\pm 100\text{ns}$ の平面性を有する爆轟波を生成することができた。

また応用としてこの装置を用いて飛翔板を $2.9\text{km/s}$ の速度で衝突させ、銅板中 $50\text{mm}\phi$ の面積に平面性 $\pm 50\text{ns}$ の強い平面衝撃波(80GPa)を発生させることができた。さらに回収実験によりダイヤモンドの生成を確認した。

## 1. 緒 論

爆薬レンズやマウストラップ等の平面爆轟波発生装置は主爆薬や飛翔板を調整することで比較的簡便に固体、粉体中に制御された平面衝撃波を発生させることができる。このため特に平面性の良い爆薬レンズ<sup>1)</sup>は1960年代以降、軽ガス銃と共に大型化、高精度化<sup>2)</sup>され、基本的な動的超高圧試験装置として衝撃材料合成や高压下の物性計測に広く用いられるようになった。一方、爆薬を平面起爆させる他の手段として衝撃大電流を利用して金属の箔<sup>3)</sup>やメッシュ<sup>4)</sup>を一斉爆発させる方法も試みられている。これらの方法は爆薬レンズに代わる方法としての実用化はなされていないが平面以外の面起爆も可能である。球状の爆薬殻を面起爆させる他の方法としては点起爆からの発散爆轟波を利用する方法<sup>5)</sup>やレーザー光の直射による方法<sup>7)</sup>もある。また松尾ら<sup>8)-11)</sup>は衝撃大電流によって金属細線を一斉爆発させ円筒面上に装填した爆薬殻( $200\text{mm}\phi \times 10\text{mmL}$ )を瞬時起爆させることにより大気中に安定な収束衝撃波を生成させることに成功している。

本研究はFig. 1に示すように上に述べた細線爆発技術を利用して爆薬レンズに代わる平面爆轟波発生装置の開発を試み、その実用性を検証したものである。本方法によればキャパシタバンクは必要とするが、正確に爆速調整した2種類の爆薬を複雑な形状に組み合わせる爆薬レンズ等と比べ、製作が容易で薬量も少なく極めて経済的な平面爆轟波発生装置になると考えられる。本研究ではこれまでの円筒状爆薬殻での実績を基に、等間隔で平行に設置した鋼細線列の一斉爆発でペンスリット爆薬(PETN)を面起爆させることとし爆轟波の平面性に与える細線の長さや本数の影響について調べた。また開発した平面爆轟波発生装置が実際の衝撃材料合成や物性計測に適用できる能力を有することを確認するためにPETNに加速爆薬、主爆薬を組み合わせた飛翔板の衝突実験も実施し、固体中に十分な平面性、面積及び強さを有する平面衝撃波が生成することを確かめた。更に材料合成への応用の一例としてダイヤモンドの衝撃回収実験を試みた。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験装置

実験に用いた衝撃大電流発生装置、測定機器及び平面爆轟波発生試験装置の全体系統図をFig. 2に示す。用いた低インダクタンスキャパシタバンクは容量 $12.5\mu\text{F}$ 、最大 $40\text{kV}$ ( $10\text{kJ}$ )で、放電電流波形はロゴスケープコイル及び積分器により計測した。このキャパシタバンクは円筒状爆薬殻の起爆に用いてきたものより低インダクタンス、高電圧であり電流の立ち上がりは10倍以上速くなった。金属細線には $100\mu\text{m}\phi$ の鋼細線

1992年4月24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, 3689

\*\*熊本大学自然科学研究科  
〒860 熊本市黒髪 2-39-1  
TEL 096-344-2111 内線3692

\*\*\*化学技術研究所  
〒305 つくば市東 1 1  
TEL 0928-54-4789

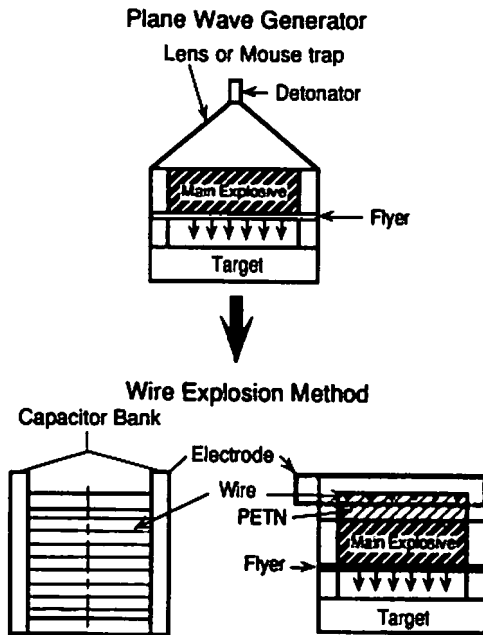
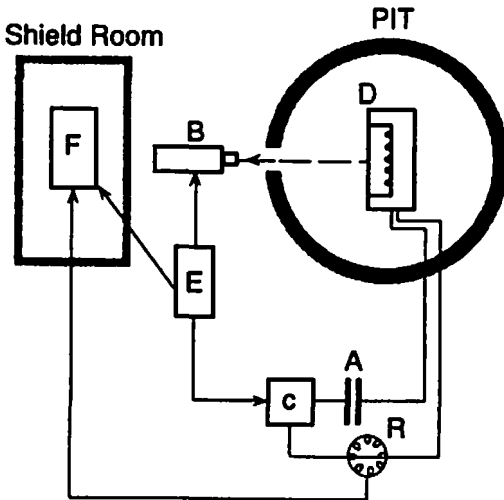


Fig. 1 Development of a plane wave generator by wire-array explosion



- A: Capacitor Bank    B: Streak Camera  
 C: Control Box      D: Experimental Set-up  
 E: Delay Pulse Generator  
 F: Transient Recorder    R: Rogowski Coil

Fig. 2 Block diagram of experimental system

を使用し、平行線列は5mmまたは6.5mmの等間隔とした。これまでの経験<sup>9)~11)</sup>からPETNも10mmの一定薬厚で実験した。PETNは特に圧搾せずに装填し装填密度は約0.6g/cm<sup>3</sup>であった。生成された爆轟波面の

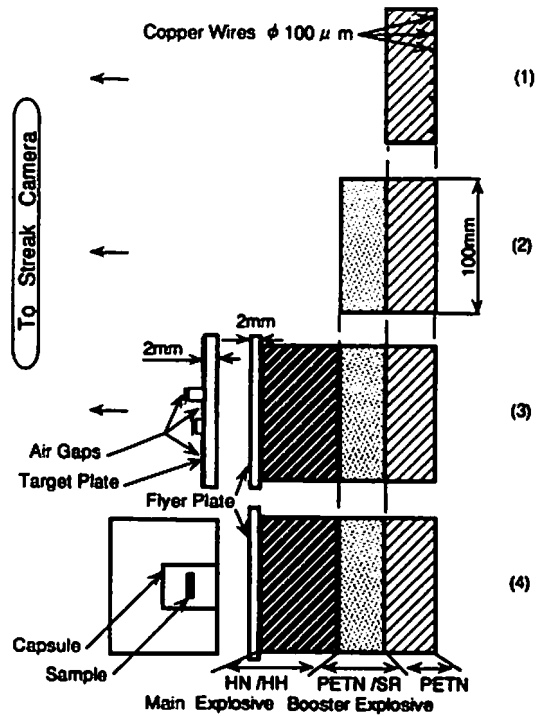


Fig. 3 Schematic of explosives set-up

計測には波面進行側に設置した流しカメラ(Cordin Model 116)を用い、細線に平行または直交する方向に設けたスリットを通過した自発光を記録した。この写真から爆轟波の爆薬表面への到達時間のバラツキが求められるため平面性の評価ができる。

## 2.2 実験条件

本研究は衝撃材料合成等に適用できる平面爆轟波発生装置の開発を目的としており、Fig. 3に示すように起爆用低密度爆薬、加速爆薬、主爆薬、飛翔板、回収装置等を順次組み合わせながら実験を実施し、各段階で適性な細線の組み合わせや平面性の検証を行った。図中(1)は爆薬が10mm厚のPETNのみの場合における爆轟波の計測であり、細線1本の長さを40mmから300mmの範囲、本数を5mm等間隔で1本から16本の間で変化させて実験を行い、平面性の良好な細線の長さ本数の範囲を求めた。なおストリーク写真のスリットはここでは細線方向と平行とし、次の(2)、(3)では細線に直交する方向に設定し波面の平面性の確認を行っている。図中(2)では主爆薬を均等に起爆させる加速爆薬(booster explosive)としてPETNに続いて20mm厚のPETN/シリコンゴム(装填密度1.37g/cm<sup>3</sup>)を装填させて実験を行った。この層構造で実用性のある平面爆轟波の生成が確認されれば平面爆轟発生装置としての見通しが得られることになる。図中(3)は更に主爆薬を起爆させ、2mm厚の銅飛翔板を、背面に2mm

厚と3mm厚の鋼角片を張り付けた2mm厚の銅板に衝突させる実験である。銅板背面には空気ギャップが形成されており、銅板中を透過した衝撃波到達時の空気の自発光を流しカメラで測定することにより衝撃波の平面性や衝突速度、衝撃圧等の検討ができる。主爆薬としては硝酸ヒドラジン/抱水ヒドラジン(75/25)溶液30mm厚を用いた。図中(4)では最終的な実用性の確認としてダイヤモンドの回収実験を行った。出発物質は高純度で比較的結晶性の良いグラファイト(東洋カーボンSS15k, 初期密度:2.05g/cm<sup>3</sup>)を用い、冷却媒体としての金属粉等は混入させなかった。

### 3. 実験結果とその検討

#### 3.1 平面爆轟波の生成

銅細線1本で長さを変えた場合の爆轟波面のストリーク写真をFig.4に示す。写真中の細線の振れが爆轟波の到達時間のバラツキ幅を表している。この斉時性は端の影響を無視すれば長さ80mm, 150mm, 300mmの場合で各々±50ns, ±100ns, ±5μs以上であり、

これから150mm程度の長さが限界であらうと思われる。この試験のロゴスキーコイルからの最大電流値は11.3-14.0kAの範囲である。またプラズマ柱の不安定性のために線長の増大により斉時性が著しく低下している。

次に長さ150mmで本数を増加した場合のストリーク写真をFig.5に示す。爆轟波到達の斉時性は、端の影響を無視すれば本数1本の場合±100nsであるが本数3本, 8本では±30nsに減少し16本で再び±100nsに増加していることが分かる。これからこの範囲の本数での斉時性はいずれも良好と言える。ただし16本で到達時間のバラツキの若干の増加があることから150mmにおける適性本数はこの範囲内としたほうが安全である。ところで細線の本数を増加した場合、1本当たりの電流値は減少する。Fig.6はロゴスキーコイルによる電流波形の最大値から算出した1本当たりの電流値とストリーク写真から求めた到達時間(平均値)とを細線の本数に対してプロットしたものである。(この到

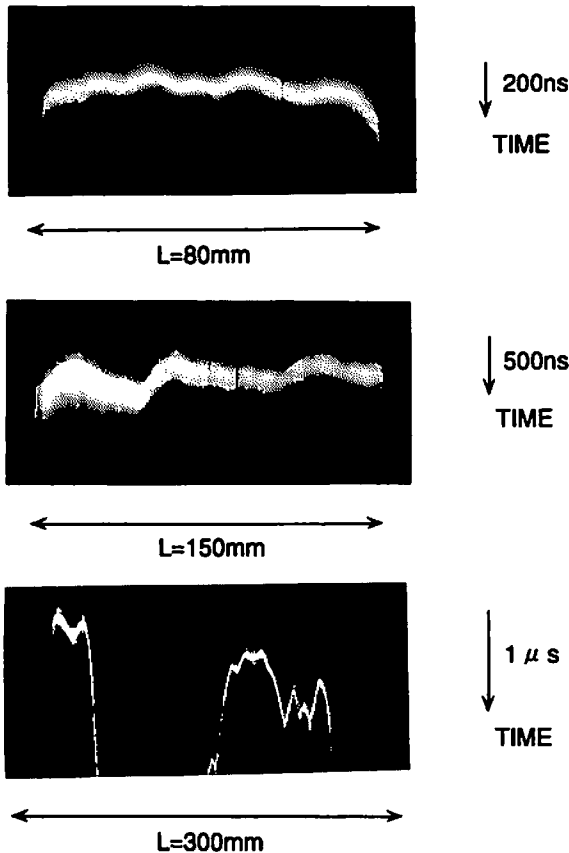


Fig. 4 Streak camera records of detonation front for single wire explosions (influence of wire length L)

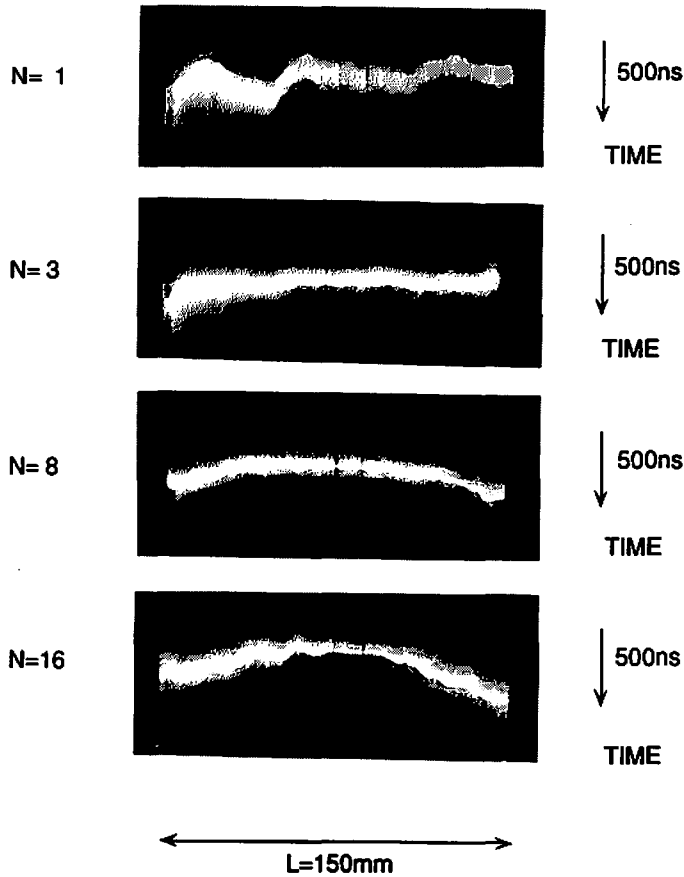


Fig. 5 Streak camera records of detonation front for wire-array explosions (influence of the number of wires N)

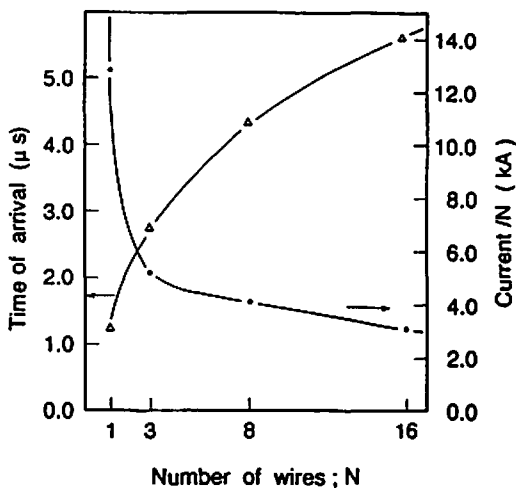


Fig. 6 Peak values of current per wire vs. the number of wires

達時間は起爆遅れなどから原点の設定にある程度の誤差を含んでいる。)これから本数の増加に伴って1本当たりの電流値が大きく低下し、爆轟波の到達も遅れることが分かる。しかしFig. 5はこの範囲内の電流低下は爆轟波の斉時性に殆ど影響を与えないことを示している。ただし1本の長さが増加すると各細線に流れる電流値がそれほど変わらなくても斉時性は著しく悪化した。例えば150mmと300mmで各々3本の組合せで比較すると電流値は各々5.4kA/本と4.9kA/本であるが斉時性は±30nsと±4.4μsであった。従って爆轟波の平面性を規定するには細線の電流値だけでなく細線への電気エネルギー流入速度等も関連していると考えられ、また線が長くなった場合はプラズマ柱の安定性も考慮する必要がある。またFig. 5で細線1本は複数本(3本、8本)に比べ斉時性が劣っている。これは各線爆で生じた爆轟波間の干渉が平面爆轟生成に効果的に作用していたためと考えられる。

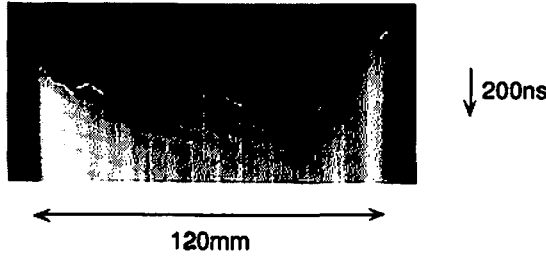


Fig. 7 Streak camera record of detonation front in booster explosive for a plane wave generator with a slit perpendicular to the wire direction

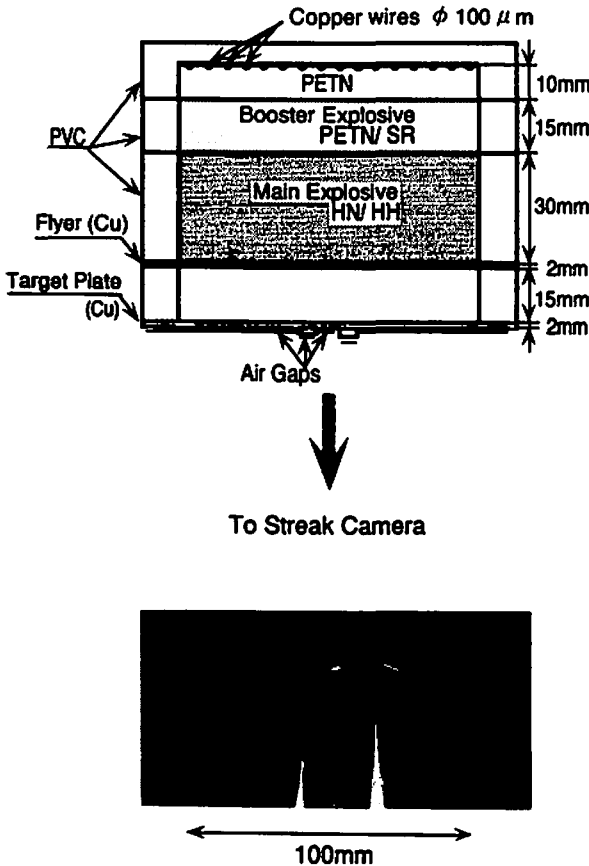


Fig. 8 A cross-sectional viewing of an experimental set-up for measurement of effective plane shock area and the shock velocity in the target plate (upper), and a streak camera record

次に強い平面爆轟波を発生させるためには更に主爆薬に正常な爆轟波を発生させるための加速爆薬が必要であり、これを設けたときのストリーク写真をFig. 7に示す。ここでは長さ120mm、本数16の細線を6.5mm等間隔に配置した。またこれまでのストリーク写真のスリットはすべて細線と平行であったがここでは爆轟波の垂直方向の平面性を確認するためにスリットを細線

に直角方向に入れた。この写真から中心付近約80mmの時間精度は±100nsであることが分かる。両端部において到達時間が速いのはPETN装填密度のバラッキや装填アセンブリーと爆轟波との干渉効果等が関係しているものと思われる。しかしながら実用上この80mmφの面積あれば問題はない。

### 3.2 平面衝撃波の生成と回収実験

前項で開発された平面爆轟波発生装置の性能検証のため、主爆薬の起爆で飛翔板を衝突させることによりターゲット板中に生成される平面衝撃波を空閃閃光法 (flash-gap method) により計測した。試験装置の構成図と空隙での空気の自己発光を記録したストリーク写真 (スリットは細線と直交) を Fig. 8 に示す。これから平面衝撃波の有効面積径は約 50mm であり、その平面性は  $\pm 50$  ns であることが分かる。また板厚の異なる標準物質 (銅) の表面への到達時間の差から衝撃波速度 (6.1 km/s) が得られ、粒子速度 (1.45 km/s)、衝撃圧 (80 GPa) が導出される。更にインピーダンスマッチング法を適用すると飛翔板の衝突速度は 2.9 km/s となる。これらの値はいずれも本装置が衝撃材料合成に適用可能な性能を有することを示している。そこで本装置の応用としてダイヤモンドの衝撃合成とその回収実験を行った。用いた回収実験装置を Fig. 9 に示す。回収試料は酸処理後、低温酸素プラズマでグラファイトを除去し X 線回折を行った。Fig. 10 に X 線回折結果を示す。得られた回折線のピークは立方晶ダイヤモンドの (111), (220), (311), (400), (331) に相当し、ダイヤモンドの生成・回収が確認されている。

#### 4. 結 論

線爆発による平面爆轟波の生成方法を検討するため

に容量 12.5  $\mu$ F 最大 40 kV (10 kJ) のキャパシタートバンクを用いた 100  $\mu$ m  $\phi$  の銅細線を等間隔 (5mm, 6.5mm) で並列配置させ一斉爆発させることにより PETN 爆薬中に平面爆轟波を発生させることを試み以下の結論を得た。

- (1) 銅細線の長さを長くすると電流値があまり変わらなくても爆轟波の斉時性が低下する。また複数本にすると 1 本当たりの電流値は減少するが斉時性は良くなる傾向があった。
- (2) 細線の長さを 150mm 以下、本数を 16 本以下にすれば平面性の良い爆轟波が得られることが分かり、中心部約 80mm  $\phi$  の面積で波面の到達時間精度が  $\pm 100$  ns 程度の平面爆轟波発生装置を開発した。
- (3) これを用いて主爆薬を起爆し、飛翔板を 2.9 km/s の速度で衝突させ、ターゲット板中心部 50mm  $\phi$  に  $\pm 50$  ns の時間精度を有する強い平面衝撃波 (衝撃圧: 80 GPa) を発生させることができた。
- (4) 衝撃材料合成への応用としてダイヤモンドの生成・回収が確認された。

細線爆発から平面爆轟波生成へのメカニズムは複雑であり今後さらに検討が必要であるが本研究で実用性についての検証ができた。また本方法を用いて固体中取東波の生成も実現できると考えられ引き続き研究を

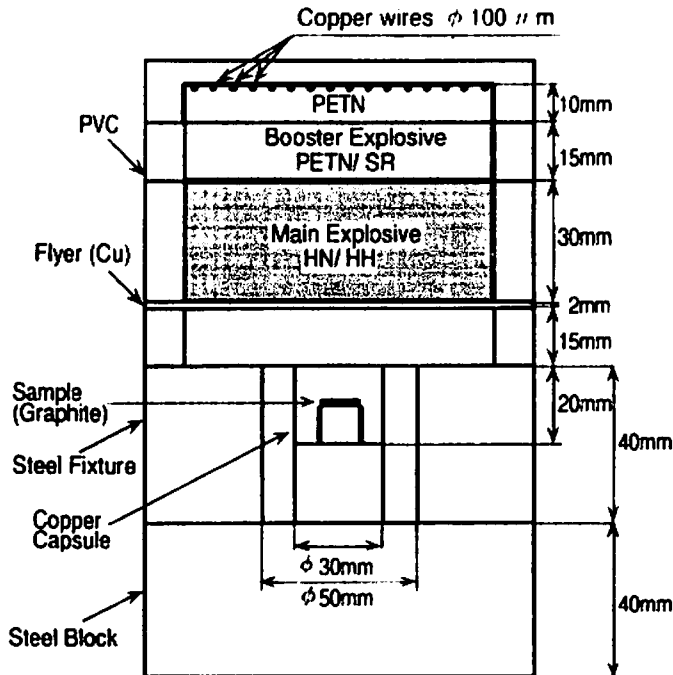


Fig. 9 Schematic of a set-up for recovery experiment using the developed plane wave generator

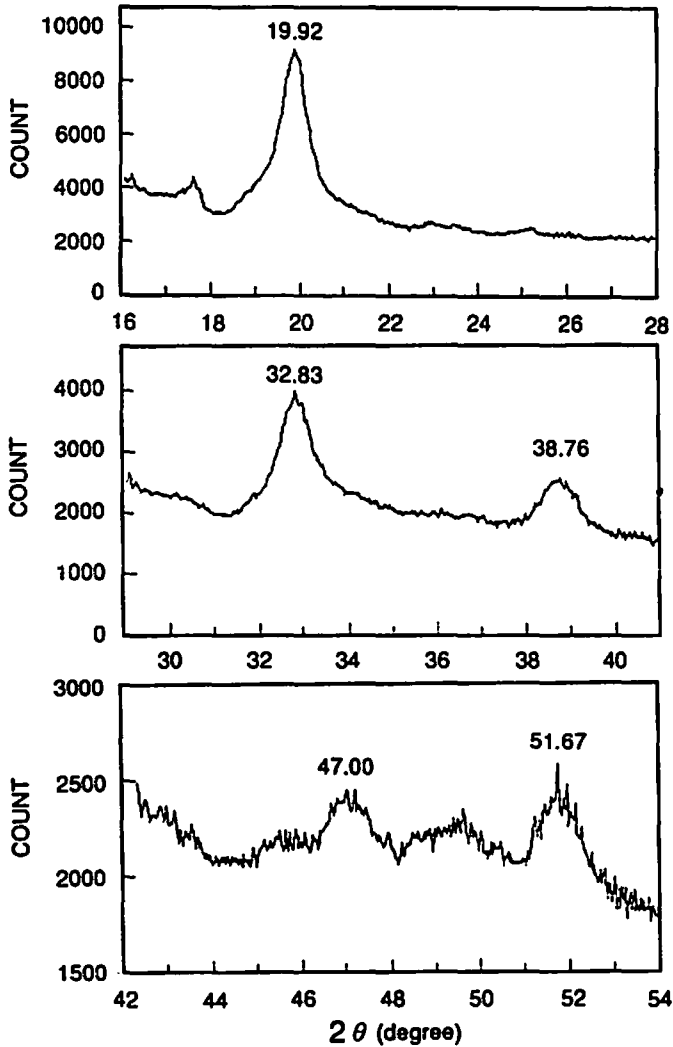


Fig. 10 X-ray diffraction pattern of recovered diamond

進める予定である。

文 献

- 1) L. E. Murr and F. I. Grace, *Expl. Mech.*, 5, 145 (1969).
- 2) 藤原修三ら, 日本公開特許公報, 特許番号 78-29673 (1978).
- 3) R. S. Dennen and L. N. Wilson, "Exploding Wires", 2, P.145 (1962) Plenum.
- 4) R. I. Butler, et al., *Rev. of Inst.* 47-10, 1261 (1976).
- 5) D. E. Robert and I. I. Glass, *Phys. Fluids*, 14, 1662 (1971).
- 6) R. A. Roig and I. I. Glass, *Phys. Fluids*, 20, 1651 (1977).
- 7) M. R. Wixom, et al., *Proc. Shock Waves in Condensed Matter 1987*, edited by S. C. Schmidt and N. C. Holmes, P. 391 (1988) Elsevier Science Publ.
- 8) H. Matsuo and Y. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, 51, 3126 (1980).
- 9) H. Matsuo and Y. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, 52, 4503 (1981).
- 10) H. Matsuo, K. Ebihara and K. Nakayama, *J. Appl. Phys.*, 55, 271 (1984).
- 11) 松尾, 実松, 宮田, *工業火薬*, 45, 157 (1984).

10/1

# A production of plane detonation waves by wire – array explosion and its application

by Tetsuyuki HIROE\*, Hideo MATSUO\*, Kazuhito FUJIWARA\*\*  
Masatake YOSHIDA\*\*\*, Shuzo FUJIWARA\*\*\*, Masanobu MIYATA\*  
and Teruyuki AKAZAWA\*

The wire – array explosion technique is applied to generate plane detonation waves. Effects of the length and the number of copper wires on the flatness of detonation waves in a powder explosive (PETN) are investigated using a streak camera. Plane detonation waves with the area of 100 mm $\phi$  and the flatness of  $\pm 100$ ns are generated by 16 rows of exploding wires with 100 $\mu$  m  $\phi$  x 120 mm L. It is shown that this plane wave generator accelerates a flyer plate to 2.9 km/s and generates strong shock waves within an area of 50 mm $\phi$  with the flatness of 50 ns and the pressure of 80 GPa in a target plate. Finally the developed wave generator is successfully applied to shock synthesis and recovery of deamond.

(\*Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan

\*\*Graduate School Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860 Japan

\*\*\*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1 Higashi, Tsukuba, 305, Japan)

## 工業火薬

第53巻 第4冊 通巻 266号

1992年8月25日印刷 (隔月刊)  
1992年8月31日発行

発行所 社団法人 工業火薬協会  
会長 福山 郁生

〒103 東京都中央区日本橋2-3-21  
(群馬ビル) 日本火薬工業会内  
電話 03(3271) 6715~7  
振替東京8- 146724

## 西部支部

〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1  
九州工業大学工学部物質工学科  
応用化学コース内  
電話 093(871)代表 1931 内線 446  
5831

編集兼発行人 福山 郁生  
編集部 東京大学工学部反応化学科

〒113 東京都文京区本郷7-3-1  
電話 03(3812) 2111 内線7291, 7383  
FAX 03(5800) 6871

印刷所 (有)石川印刷  
〒162 東京都新宿区河田町7番7号  
電話 03(3351) 3111 (代)  
FAX 03(3351) 3113