

銅メッシュ爆発を利用した広域面起爆装置の開発とその応用

安部尊之*, 吉田正典**, 廣江哲幸***, 藤原和人***, 松尾日出男***

筆者らは高性能爆薬 plastic bonded explosive (PBX) による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に周囲から斉時性の良い衝撃波を入射させて一斉起爆する必要がある。そこで銅メッシュ爆発による pentaerythritol tetranitrate (PETN) の面起爆を利用してPBXを起爆することとし、本論では銅メッシュによるPETNの起爆条件について検討した。銅メッシュによる起爆とはエッチング加工によって銅箔上に爆発細線部をメッシュ状に点在させた銅メッシュをコンデンサーの放電電流で線爆発させてPETNを起爆することである。まず再結晶法によって粒径の異なるPETNを製造し、銅メッシュによる平面起爆実験を行い粒径の細かいものほど起爆精度が良いことを確認した。次に、試作した5種類の銅メッシュパターンと平行銅細線列の比較を行い、銅メッシュで平行銅細線列と同等以上の起爆精度が得られることを確認した。次に、銅メッシュによるPETN円筒殻の起爆実験を行い円筒面起爆に適用できることを確認した。また、銅メッシュによる平面爆轟波発生装置で飛翔板加速実験を行い、polyethylene terephthalate (PET) 飛翔板をPBXの一斉起爆に十分な2.8km/s程度まで加速できることを確認した。

1. 緒言

任意曲面の爆薬面を同時起爆できれば爆轟の巨大パルスエネルギーを有効利用する適用範囲が広がると考えられ、筆者らはその可能性追求の一つとして銅細線爆発による pentaerythritol tetranitrate (PETN) 起爆を応用した強い円筒状収束衝撃波の発生実験^{1,2)}を行っている。すなわち、円筒状に成型した高性能爆薬 plastic bonded explosive (PBX) を周囲から起爆させることでその中心軸上に超高压を発生させるというものである。本実験によって核爆発や微小範囲に限定されるレーザーショック³⁾を除けば最高レベルであるテラバスカル域の超高压の発生を目標としており、それにより極限状態下での試料の回収や超高压領域での相

変化の検出を含む状態式の研究等が期待できる。

このような精度の良い収束衝撃波を発生させるためにはPBXをその全外周面で一斉に起爆する必要がある。しかしPBXを直接起爆させるのは容易ではなく⁴⁾、現在は平行銅細線列またはエッチング加工した銅メッシュの線爆発によるPETNの面爆轟波発生を利用している。すなわち、PETN爆薬の表面に設置した銅メッシュまたは平行銅細線列にキャパシターバンクからの放電電流を流して銅細線を一斉爆発させ、その爆発でPETNを起爆すると爆轟波は細線間隔、薬厚、電流値が適正条件内に設定されていればPETN中で干渉して平面爆轟波となるという方法である。本法は従来の爆薬レンズ⁵⁾やマウストラップでの平面波生成法に比べ構造が簡単で少量の爆薬でよく、また円筒面や円錐面など任意形状の曲面起爆が可能であるという特徴がある。

このような手法で、PBXを精度良く起爆するためには入射させる衝撃波はできるだけ到達時間誤差の小さいものにする必要がある。しかし、過去の円筒爆縮実験において平行銅細線列を用いた場合、起爆面積が大きいため線一本当たりの爆発エネルギーが減少して爆轟波到達時間誤差が大きくなるという問題があり、また、装置製作の上でも円筒面への平行線列の設置が困難であり製作精度にばらつきが発生することなどの欠点がある。

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

指摘⁶⁾されてきた。

そこで爆発細線部を銅箔シート上にメッシュ状に点在させた銅メッシュをプリント基板製作と同様の方法で製作し、これをPETN爆薬面上で爆発・面起爆させる手法を試みている。本法では銅メッシュパターンの爆発細線部分を制約なく自由に配置・設計するため最適面起爆のメッシュパターンを追求でき、また機械的量产化も容易である。

本報では上記の面起爆技術の開発過程に於ける銅メッシュパターンの設計・製作、平面爆轟波発生に適するPETN粒子の製造と爆轟波平面性の評価、各種銅メッシュパターンを用いた爆轟波の評価及び平行銅細線列との比較検討等について得られた知見を報告する。

2. 実験方法

平面爆轟波発生、評価実験装置の概念図をFig. 1に示す。板状に装填した薬厚10mmのPETN粉体の片面に銅メッシュまたは平行銅細線列を設置し、キャパシターバンク(40kV, 12.5 μ F, 10kJ)からの放電電流を通じ一斉爆発(線爆発)させる。それにより起爆されたPETNの爆轟波面が自由面に到達するときの自発光を細線に平行または直行する方向に設けたスリットを通してストリークカメラ(Cordin model 116)で撮影し、爆轟波面の到達時間誤差を計測した。ストリーク写真の一例をFig. 2に示す。写真の輝線の時間方向のふれ幅が爆轟波の到達時間誤差をあらわしている。写真では約12mm周期で爆轟波の到達時間の早い点と遅い点が表れ、ぎざぎざの波状になっている。この爆轟波の到達時間の早い点が銅メッシュの線部分であり遅い点が線の間である。爆轟波の爆薬層中での干渉効果が不完全な場合このように線部分に対し線の間が遅れる傾

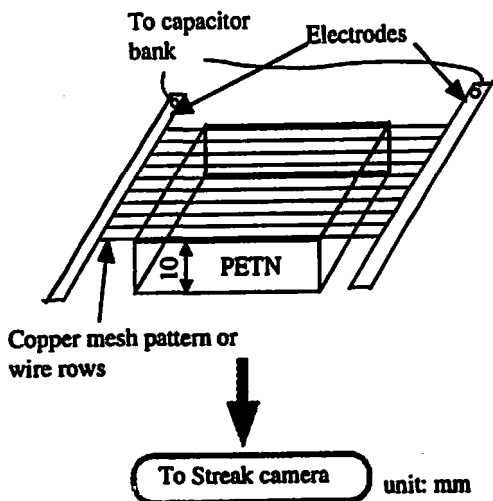
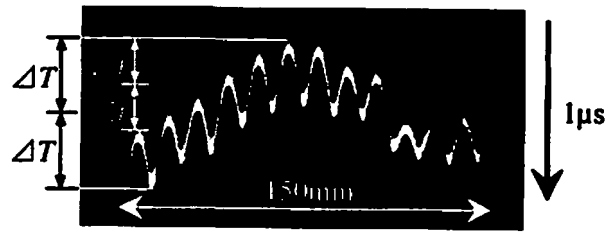


Fig. 1 Experimental set-up for generation of plane detonation wave



ΔT : Arrival time jitter (Planarity)
 Δt : Arrival time jitter (Simultaneity)

Fig. 2 A typical streak camera record of detonation wave (Mesh type : Mesh1, PETN area : 47100mm²)

向があり、薬厚を大きくするか線間隔を小さくすることでこの遅れを小さくすることができる。本論では面起爆の斉時性を線の間遅れを含めない時間誤差 Δt によって評価することとする。また、キャパシターバンクの放電電流波形はログスキーコイル及び積分器により計測した。実験で得られた電流波形の一例をFig. 3に示す。図中のB点が線爆発の起きた点⁷⁾である。起爆したPETNの面積は250mm²~31400mm²の範囲である。

実験に用いた試作銅メッシュはMesh1を基本に、ブリッジワイヤーを細くしたMesh1b、長さを短くしたMesh1c、ブリッジワイヤーの間隔をせばめ線本数を多くしたMesh2a、Mesh2aの線を太くしたMesh2bの5タイプである。詳細についてFig. 4に示す。比較のための平行銅細線は ϕ 100 μ m ~ ϕ 200 μ mである。

3. PETN粒径の影響

PETNの衝撃起爆特性はPETN密度⁸⁾および粒径によって大きく異なり、線爆発からPETNの定常爆轟に要する時間は結晶粒が大きいほど遅れが大きくなる⁹⁾ことが知られている。そこでPETNの粒径による平面

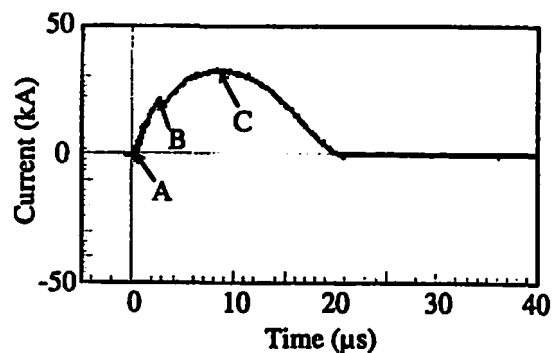


Fig. 3 A typical discharge current wave measured by Rogowskii coil (Mesh type: Mesh1 Detonated area : 5200mm²)

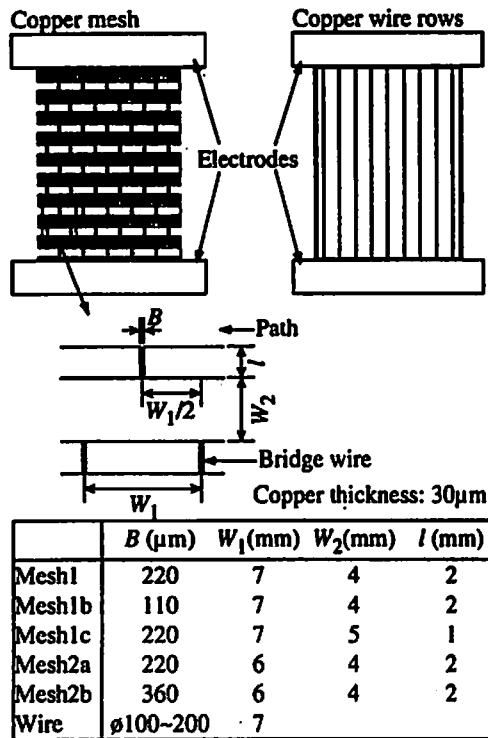


Fig. 4 Tested copper mesh patterns and wire rows

爆轟波生成への影響を調べるため様々な粒径のPETNを製造し平面起爆実験を行った。

粒径の異なるPETNの製造方法について説明する。PETNをアセトンに溶かし、それを脱イオン水に滴下して再結晶させる。そのとき滴下速度が遅く攪拌速度が速いほど再結晶するPETN粒子は細かいものが出る。脱イオン水は温度を10℃～11℃程度に保ち電動スターラーで攪拌し、溶液の滴下速度は分液漏斗等によって調節した。この方法で得られたPETNの粒径は3～90 µmであった。粒子写真の一例をFig. 5に示す。



Fig. 5 Photomicrograph of typical PETN (Particle size (Average value of ellipsoidal length) : 2.96 µm)

銅メッシュはMesh1を使用し、大きさは104mm(電極間方向)×50mm(幅)とした。またPETNは50mm×50mm×10mmの空間にタッピング装填した。装填密度は $0.44 \times 10^3 \sim 0.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で大きな差はなかった。また起爆電流の条件は充電電圧20kV、起爆電流値約19.5kAおよび充電電圧11kV、起爆電流値約14.2kAとした。実験で得られた爆轟波の平面性とPETN粒径の関係をFig. 6にまとめた。グラフから分かるとおり、粒子が細かい物ほど爆轟波平面性が良いことが明らかになった。従って高精度面起爆が必要な円筒爆縮実験では本法の製造範囲で極力粒径の小さいPETN(3 µm程度)を製造して用いることとした。

4. メッシュパターンの影響

まず、銅メッシュの線爆発の過程を調べるために線爆発の初期段階で発する自発光を高速度撮影した。即ちキャパシターバンクにMesh1(50×56mm、線本数7本)および平行銅細線列(φ100 µm、線間隔7mm、長さ56mm、線本数7本)を接続し線爆発させ、その全量をイメージコンバーターカメラ(Imacon790)を用いてコマ間隔100nsで撮影した。なお、この実験のみ熊本大学工学部付属衝撃エネルギー実験所の設備を用いて実験しておりキャパシターバンクは前述の物質研のものより低電圧高容量(40 µF, 8kJ, 20kV)で衝撃電流のピーク値までの平均立ち上がり速度は約1桁遅い1GA/s程度⁶⁾である。コマ撮り写真をFig. 7に示す。写真から分かるとおり、平行銅細線列の場合起爆開始にむらが見られるが銅メッシュでは起爆面全面の各細線ではほぼ一斉に起爆していることが分かる。このこと

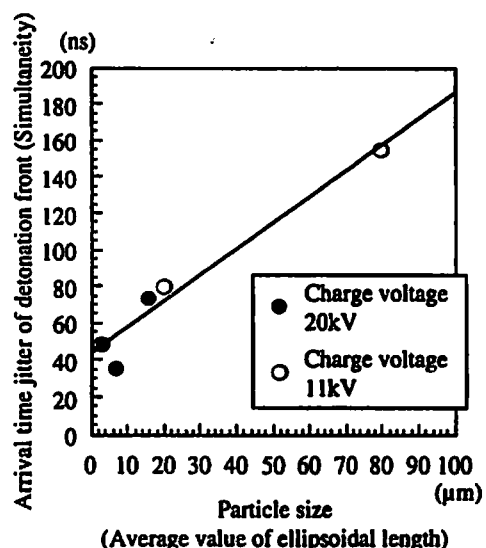


Fig. 6 Arrival time jitter of detonation front (Simultaneity) vs. particle size of PETN (Average value of ellipsoidal length)

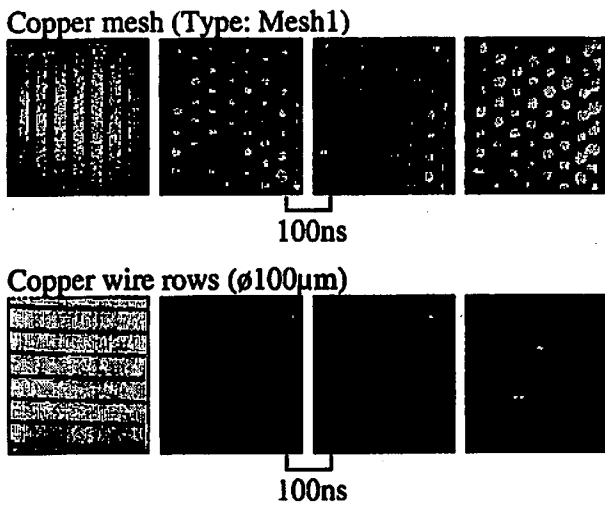


Fig. 7 Framing camera records of wire explosions for the copper mesh (type Mesh1) and wire rows

から銅メッシュは広い面積の起爆に有利であるといえる。

次に、5種類の銅メッシュおよび銅細線列 ($\phi 100 \mu\text{m}$) を用い、起爆面積を変化させて Fig. 1 の装置による PETN の平面起爆実験を行った。爆轟波のストリーク写真から得られた起爆面積と爆轟波到達時間誤差の関係を Fig. 8 にプロットした。グラフから Mesh1, 銅細線 ($\phi 100 \mu\text{m}$), Mesh2a, Mesh2b の順で起爆精度が良いことが分かった。

線爆発のメカニズムは複雑であり、各銅メッシュパターンの優劣を決める要因を探るのは困難であるがログスキークoilで計測した起爆電流値は線爆発エネルギーの一つの目安となる。そこで、各銅メッシュの線部分及び、各種平行銅細線列の単位断面積当たりの電流値と爆轟波到達時間誤差について Fig. 9 にプロット

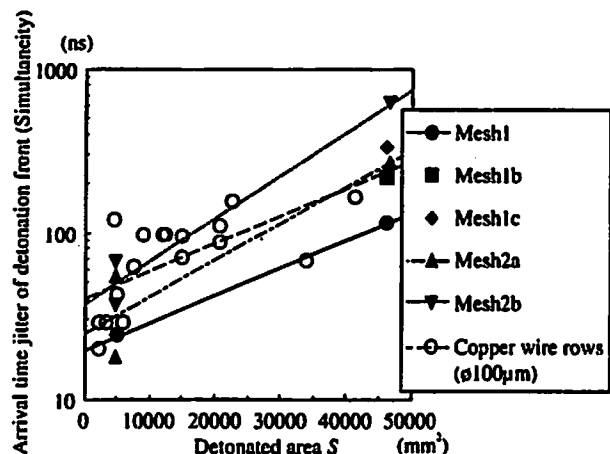


Fig. 8 Arrival time jitter of detonation front (Simultaneity) vs. detonated area

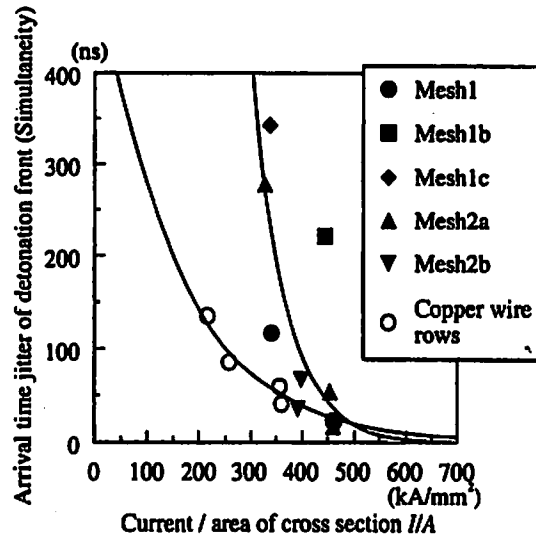


Fig. 9 Arrival time jitter of detonation front (Simultaneity) vs. current / area of cross section

した。ここで、断面積とは電流の流れる爆発細線部分の断面積の総計であり、銅メッシュの場合2つのパス部分に挟まれたブリッジワイヤーの本数にブリッジワイヤーの断面積を掛けたものである。Fig. 9 より、各種銅メッシュと平行銅細線とで単位断面積当たりの電流値と爆轟波到達時間誤差との間に一定の関係があり、銅メッシュの場合単位断面積当たりの電流値が 400 kA/mm^2 以上であれば爆轟波到達時間誤差は $\pm 200 \text{ ns}$ となり実用上十分な平面性が得られているといえる。

5. 円筒状収束衝撃波発生装置開発への応用

円筒状収束衝撃波発生実験で衝撃波を中心軸近傍で精度良く収束させるには主爆薬 PBX を非常に高い精度で起爆する必要がある。前節までの実験結果から細粒 PETN と Mesh1 の銅メッシュを用いれば高精度の面起爆が可能となることが明らかになったので、本節では PBX 円筒の収束爆轟波生成への応用について述べる。

まず Fig. 10 (a) に示すような円筒面起爆実験を行った。PETN 円筒殻外面に銅メッシュ (Mesh1) を設置し周囲から一斉起爆する。円筒の起爆面積は 47100 mm^2 である。爆轟波が PETN 円筒殻内表面に達する時間誤差を円筒殻内の鏡を介してストリーク撮影して計測した。ストリーク写真を Fig. 10 (b) に示す。実験の結果 $\pm 38 \text{ ns}$ という非常によい平面性を示した。

次に PBX の起爆方法について検討した。本法で用いる PETN は装填密度 $0.4 \times 10^3 \sim 0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の低密度なものであるため爆轟圧は低く、比較的低感度な PBX の一斉起爆に用いると入射圧力は低く起爆誘導距離は長くなるため安定で精度の良い爆轟を得るのが困

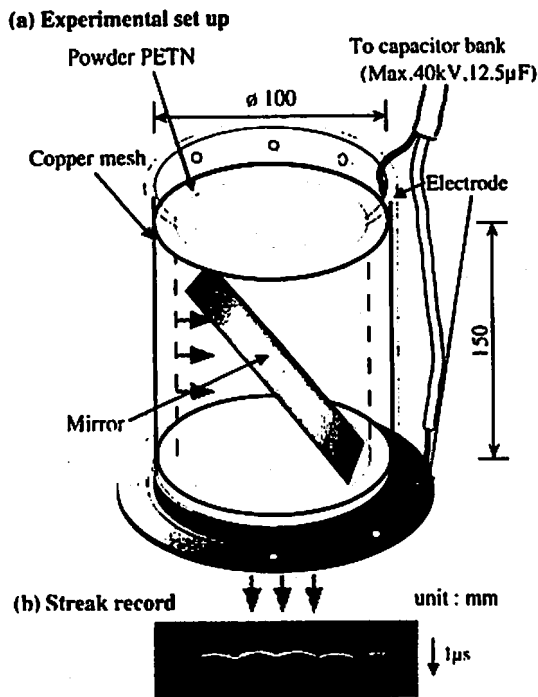


Fig. 10 (a) Experimental set-up for generation of PETN shell (b) a streak camera record

難である。たとえば密度 $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の PETN による爆轟波で PBX80RU (RDX 80%, active binder 20%) を直接起爆した場合 PBX 中の入射圧力は約 5.7 GPa, 起爆誘導距離は 2.3 mm と推測⁴⁾ され, 十分な精度の爆轟が得られない可能性がある。そこでより高い入射圧力が得られると期待される飛翔板衝突法を用いることとし, Fig. 11 (a) に示すような実験装置を用いた飛翔板加速実験を行った。銅メッシュ Mesh1 による平面爆轟波発生装置にフライヤー (polyethylene terephthalate; PET: 0.26 mm) と, その下に polymethyl methacrylate (PMMA) のステップを設置しアルゴンガスを封入し, 0.5~3.0 mm の距離の飛翔速度を計測した。飛翔板の厚さ及び飛翔距離は円筒爆縮実験へ応用する際の条件を考慮して決定している。まず PETN の平面爆轟波から伝播した衝撃波がアルゴンガス中を進行し, ステップに到達すると発光する。次に飛翔板がアルゴンガス中を飛翔しステップに衝突すると消光する。その時間差をストリーク撮影によって計測し飛翔板の飛翔速度を求めることが出来る。実験で得られたストリーク写真を Fig. 11 (b) に示す。計測の結果約 2.8 km/s の飛翔速度が達成されていることが分かった。この装置による飛翔板衝突法で PBX を起爆する場合入射圧力は約 10.8 GPa, 起爆誘導距離は 1.4 mm と推測⁴⁾ された。銅メッシュを用いた PBX 起爆の概念図を Fig. 12 に示す。これを PBX 円筒殻に適用すれば円筒状収束衝撃波発生装置となる。

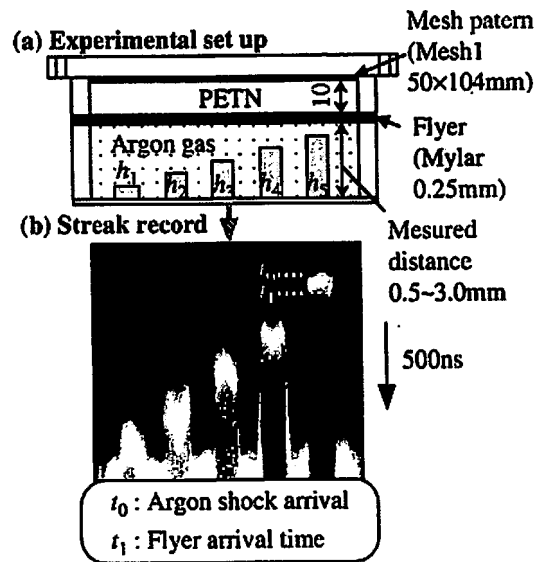


Fig. 11 (a) Experimental set-up for flyer acceleration system (b) a streak camera record

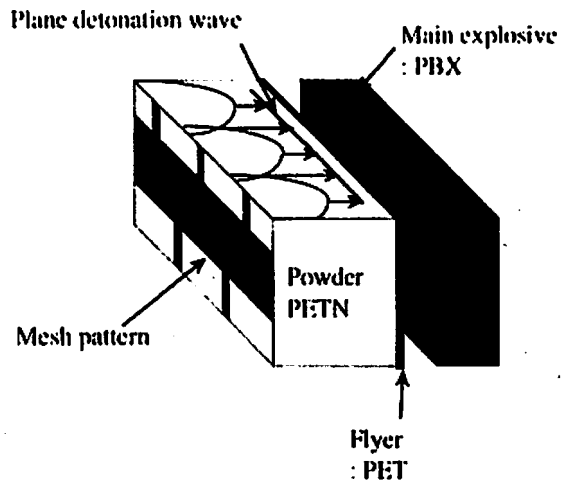


Fig. 12 Experimental set-up for generation of cylindrical imploding shocks

6. 結 論

銅メッシュパターンの設計・製作, 平面爆轟波発生装置での使用に最適な PETN の製造と評価, 銅メッシュパターンの評価及び平行銅細線列との比較検討実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 平行銅細線列に替わる銅メッシュを設計試作した。
- (2) 再結晶法によって粒径の異なる PETN を製造し, 各粒径の異なる PETN を用いて平面起爆実験を行った結果, 粒径の細かいものほど起爆精度がよいことを確認した。
- (3) 銅メッシュパターン及び平行銅細線列をそれぞれ

用いて平面爆轟波発生実験を行い、Mesh1タイプの銅メッシュを用いれば従来の平行銅細線列と同等の高精度の平面起爆が達成されることを確認した。また、爆轟波到達時間誤差は単位断面積当たりの起爆電流値に依存し、 $400\text{kA}/\text{mm}^2$ 以上であればは実用上十分な平面起爆が可能であることが分かった。

次に、円筒状収束衝撃波発生装置開発のための応用実験を行い以下の結論を得た。

- (1) PETN円筒殻の銅メッシュによる一斉起爆実験を行い、円筒面起爆にも応用できることを確認した。
- (2) 銅メッシュを用いた平面爆轟波発生装置による飛翔板加速実験を行い、厚さ 0.26mm のPET飛翔板を 2mm 程度飛翔させて 2.8km/s 程度まで加速できることを確認した。これによって高性能爆薬であるPBXの一斉起爆に応用できると考えられる。

これらの結果から銅メッシュによる起爆はPBXを用いた円筒状収束衝撃波発生装置に利用でき、将来は平面、円筒面、円錐面などの任意面起爆に応用できると考えられる。

文 献

- 1) 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 (1996), American Institute of Physics.
- 2) T.Abe, M.Yoshida, T.Hiroe, K.Fujiwara and H. Matsuo, Proc. Int. Conf. on High Pressure Science and Technology, 7, 912 (1998)
- 3) S.D.Rothman, A.M.Evans. "Shock Compression of Condensed Matter-1997", eds. S.C. Schmidt, D.P. Dandekar, J.W. Forbes, P.79 (1998), American Institute of Physics.
- 4) 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, (1999, 火薬学会誌投稿中)
- 5) 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.
- 6) 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, 火薬学会誌 57, 2, 49, (1996)
- 7) William G. Chace, "Exploding Wires", eds. W.G. Chace, H.K. Moore, Vol.1, P.7, (1959), Plenum Press, New York
- 8) Dobratz, "LLNL EXPLOSIVE HANDBOOK-Properties of Chemical Explosives and Explosive simulants", JAN 85, P.9-51, (1985), U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Technical Information Service
- 9) Herlach, "Exploding Wires", eds. W.G. Chace, H.K. Moore, Vol.4, P.281, (1968), Plenum Press, New York

Development of large-area surface detonator using an etched copper mesh and its application

Takayuki ABE*, Masatake YOSHIDA**, Tetsuyuki HIROE***
Kazuhito FUJIWARA***, Hideo MATSUO***

A large-area surface detonator has been developed using an etched copper mesh and powder pentaerythritol tetranitrate (PETN). Five kinds of mesh patterns with zigzag bridge wires are etched from copper film sheets and the PETN powders with several particle sizes are prepared by recrystallization. The PETN charged into a shell or box with various area is initiated with electrically exploded copper mesh or parallel copper wire-rows, and the generated detonation wave has been evaluated by the arrival time jitter obtained from the streak camera record. The experimental results indicate that the flatter detonation front is generated in PETN with finer particle size, and the explosion of the selected mesh pattern has initiated the PETN surface simultaneously, almost the same as that of the wire-rows. Moreover, the mesh explosion technique has been applied to initiate a cylindrical PETN shell. The experimental results indicate that the mesh initiation technology is applicable to produce one-dimensional cylindrical imploding detonation by simultaneous surface initiation of cylindrical PETN shell with an axial length long enough. Finally, a flyer acceleration system has been examined. It becomes known that the PETN detonation initiated with the mesh explosion can accelerate a polyethylene terephthalate (PET) flyer up to 2.8km/s.

(*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)