

## 円筒状収束衝撃波の生成に関する研究

松尾日出男\*, 実松弘明\*, 宮田政信\*

超高温, 超高密度, 超高压力等の極限状態を実現するための手段として円筒状収束衝撃波の利用が示唆される。本研究はこのための新しい方法として円筒面上に装填した爆薬を, 導線爆発によって瞬時起爆させて, 安定な収束衝撃波を生成させる方法に着目し, 実験的研究を行ったものである。

この種の収束衝撃波は弱い不安定性を持つので, 安定で真円度の高い収束波を得るためには面起爆技術(導線爆発技術), 爆薬の装填法, 爆発容器の寸法, 形状等についての特別の配慮が必要である。数種の系統実験を行ない最適と思われる収束衝撃波発生技術を選定し, 実験によって所要の結果が得られることを確認した。

## 1. 序 論

円筒壁面上に装填した爆薬殻を起爆させると, 円筒軸に向かって円筒状収束衝撃波が生成, 伝播し, 最後に円筒軸において(理想的には)一点に集中し, そこに超高温, 超高密度, 超高压の極限状態が実現される。

この様な極限状態は, 超高速発射装置(hypervelocity launcher)<sup>1)</sup>, 超高速衝撃波管<sup>2)</sup>, 極限状態下の物性の研究, 新物質の合成<sup>3)</sup>, 超高温・超高密度プラズマの生成<sup>4)</sup>, 特に核融合への応用<sup>5)7)</sup>等, 多くの分野へ応用される可能性を有している。我々は, 熊本大学工学部衝撃エネルギー実験所の研究プロジェクトの一つとして, 1975年頃からこの種の爆薬を用いた極限状態発生装置の開発研究を, 理論・実験の両面に亘って行っており<sup>7)~11)</sup>, 1980年頃までには, 一応の成果を得ることができた。更に, その後この方法を熱核融合のための超高温・超高密度プラズマの加熱閉じ込めに応用する研究を続けている<sup>7)</sup>。これらの研究を通して, 特にその実験的研究の分野において最も重要かつ困難であったことは, 円筒面上に装填した爆薬を一様に面起爆し, できるだけ真円度の高い円筒状衝撃波を生成させ, それを安定に収束させることであった。(円筒状収束衝撃波は, 一般に弱い不安定状態にある。)

数年に亘る改良の積み重ねによって現在一応満足すべき成果が得られたが, それらについてはこれまで, 極限状態の熱気体力学的特性の解明という点にのみ焦点を絞った報告しか行っていない<sup>7)9)10)</sup>。しかし爆薬の

面起爆による収束衝撃波の生成技術自体爆薬応用技術の面で, それなりの意味を持つものと考えられるし, またこれまでの改良の諸過程を総括し報告することは, 爆薬技術の実用面において些かなりとも, 益するものがあるのではないかと考えられるので, 本報において従来公表していない細部を含めて報告することにしたい。

我々が用いた方法は, 次節で詳述する様に円筒面上に装填したPETN爆薬を衝撃大電流による導線爆発によって起爆させ, 強力な円筒収束衝撃波を生成するものであるが, これに関しては, 爆発容器の寸法形状, 爆薬の装填法, 面起爆法が重要な因子となる。特に一様な面起爆法は, 生成された衝撃波の収束に至るまでの安定性を支配し, 最も重要な要素である。

この意味で, 先ず爆薬を装填せずに導線爆発による円筒状収束衝撃波の生成状況をレーザシャドウグラフ法により観察し, 比較検討し最適と思われる面起爆法を選定した。その後この方法でPETN殻の起爆を行ない, 実用上ほほ満足すべき収束状況が実現されることを確めた。

なお, 従来収束衝撃波の生成方法としては, 衝撃大電流による金属箔の面起爆による方法<sup>12)</sup>, 衝撃波管で生成された平面衝撃波, または爆轟波を収束流路に導いて収束波を得る方法<sup>13)14)</sup>, 円筒容器に封入した爆轟性気体を軸上で点火し発散爆轟波を生成し, それを収束流路に導いて円筒状収束波を得る方法<sup>15)16)</sup>, 半球状容器に封入した爆轟性気体を球中心において点火して発散爆轟波を生成させ, それを球面壁で反射させて中心に向う収束波を生成する方法<sup>17)18)</sup>, 等が提案されているが, 我々の様に, 爆薬殻を面起爆させて, 直接

昭和58年12月12日受理

\*熊本大学工学部資源開発工学科  
〒860 熊本市黒髪 2-39-1  
TEL 096-344-2111 内線 3689

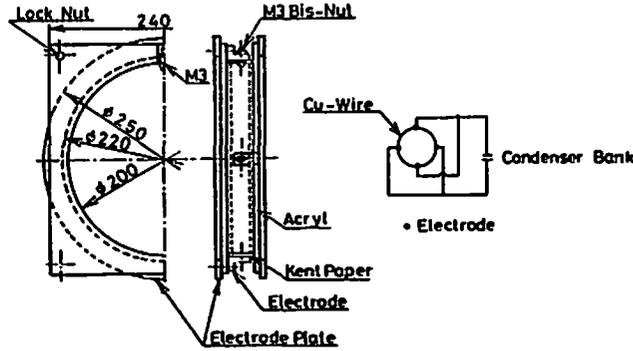


Fig. 1 Explosion chamber for wire explosions ( $n=4$ ,  $m=3$ ,  $N=12$ ).

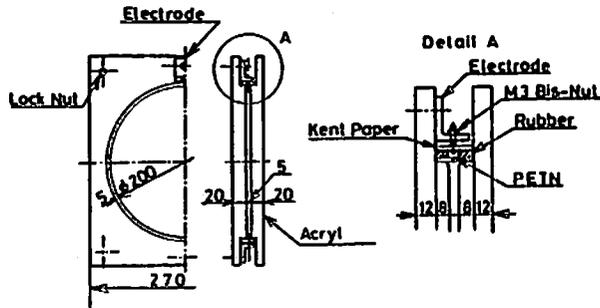


Fig. 2 Explosion chamber for cylindrical explosive shells ( $n=2$ ,  $m=3$ ,  $N=6$ ).

強力な収束波を得る方法は、筆者らの知る限りでは、公表されていない様である。

## 2. 実験

円筒状爆発収束衝撃波を発生させるための爆発容器を Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 1 は、両端面がアクリルからなり、円筒状のケント紙からなる線爆面をもつ爆発容器である。円筒状のケント紙の内側に  $\phi 0.18$  mm の銅線がはられている。また一様な起爆を行うために導線を円周方向に亘って等分割し、それぞれの分割点を電極につないでいる。(分割数  $n=2, 4, 6, 8$  導線列数  $m=2, 3$  とした。従って導線総本数  $N=4, 6, 8, 12, 16, 18, 24$  となる。) Fig. 1 には、 $n=4$ ,  $m=3$ ,  $N=12$  の場合を示している。Fig. 2 は、両端面がアクリルからなり、環状の PETN 爆薬室をもつ爆発容器である。この爆薬室は二枚の同軸のケント紙からなっており、同軸の外側のケント紙の内側に銅線がはられている。爆薬室の両端は、ラバーのスペーサーで栓をしており、この二枚の同軸のケント紙からなる環状空間内に PETN 爆薬 16g (化学エネルギー 98KJ) が装填される。爆薬は均一に装填されるが、特別の圧縮機を

使用してはいない。(爆薬密度は、 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  に保たれている。)

コンデンサーバンク ( $40\mu\text{F}$ ,  $15\text{kV}$ ) に蓄えられた電荷を瞬間的に放電させて線爆を行ない、それによって PETN 爆薬の起爆を行なう。この起爆に必要な最小電気エネルギーは、 $15\text{kV}$  充電時、 $30\text{kA}$ 、即ち約  $4.5$  kJ であることがわかっている<sup>17)</sup>。

線爆によって生成された収束衝撃波、および PETN 爆薬殻を起爆し生成された収束衝撃波の波面の観察、求心性の観察には、Q-スイッチルビーレーザー(出力 40 MW, 放射時間 15 nsec) を光源とするシャドウグラフ法を使用した。Fig. 3 にその実験配置図を示す。爆発容器は、爆発実験室 ( $8\text{m} \times 8\text{m} \times 6\text{m}$ ) 中央に設置される。衝撃大電流による線爆が起った後、任意の設定時刻(現象を観察したい時刻)に、Q-スイッチルビーレーザー (B) からレーザー光 (波長 6943 Å) が発振される様に遅延回路が用いられている。レーザー光は光学系によって平行光線となり爆発容器を通過する。この時に得られた爆発現象のシャドウグラフを (E) で撮影する。従って、以下に示されるシャドウグラフは、写

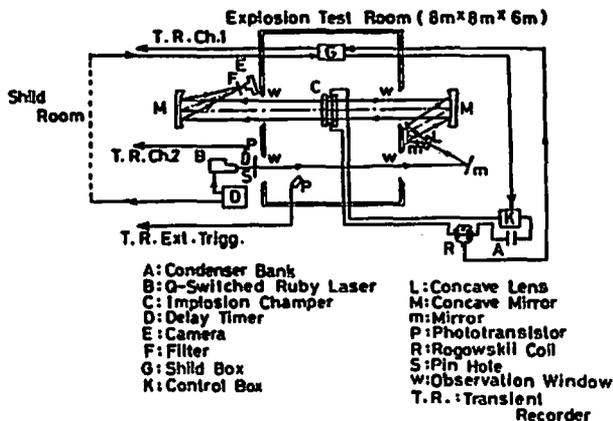


Fig. 3 A schematic of laser shadowgraphy

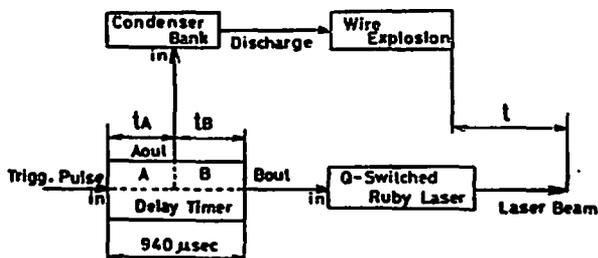


Fig. 4 Time sequence diagram for laser irradiation

真一枚が、一つの爆発現象を撮影したものであり、一連の連続写真ではない。また、実験では、衝撃波の自己発光等の光を除去し、レーザー光のみを通過させるために、干渉フィルター (F) をカメラ前面に使用した。

起爆後の時間 ( $t$ ) としては、線爆の起きた時間を基準点とし、レーザーが発振した時刻までの時間を用いる (Fig. 4)

### 3. 実験結果

#### 3.1 線爆による収束衝撃波の生成

##### 3.1.1 導線分割数および列数の影響

予備実験として水平にはった導線列の線爆実験を行ったので、その結果を参考までに Fig. 5 に示す。図より導線が起爆する時刻は導線上の各点で異なり、線爆は同時に起ってはいないことがわかる。このことから判断すると導線の長さは短い方が、より一様に、同時に起爆するものと考えられる。一方実験に使用した  $\phi 0.18\text{mm}$  の銅線を起爆させ、この線爆により PETN 爆薬を面起爆させるのに最低  $3\text{kA}$  程度の電流が導線一本当たり必要である。また、本実験の場合、コンデンサーバンクは、 $15\text{kV}$  充電時に約  $30\text{kA}$  の電流を放電させることも確認されている<sup>17)</sup>、従って、導線総本数  $N$  は、無制限に多くすることはできない。そこで導線

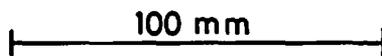
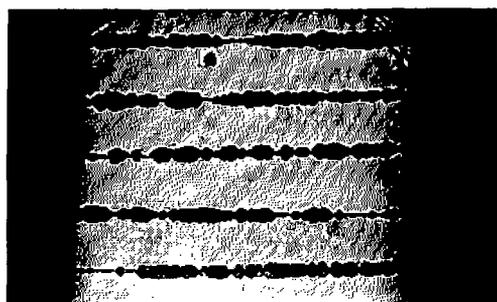


Fig. 5 Laser shadowgraph of wire explosions

分割数  $n = 2, 4, 6, 8$  とし導線列数  $m$  の影響を見るために同じ分割数に対して、 $m = 2, 3$  の場合を比較実験した。

Fig. 6 には、分割数 ( $n$ ) の影響を示したものである。(a) から (d) には、 $n = 2$  から  $n = 8$  までのシャドウグラフで、収束が初期の段階と半分程進んだ段階の二枚を示している。写真に見られる様にそれぞれの分割数に応じた多角形の収束衝撃波が生成されている。これ

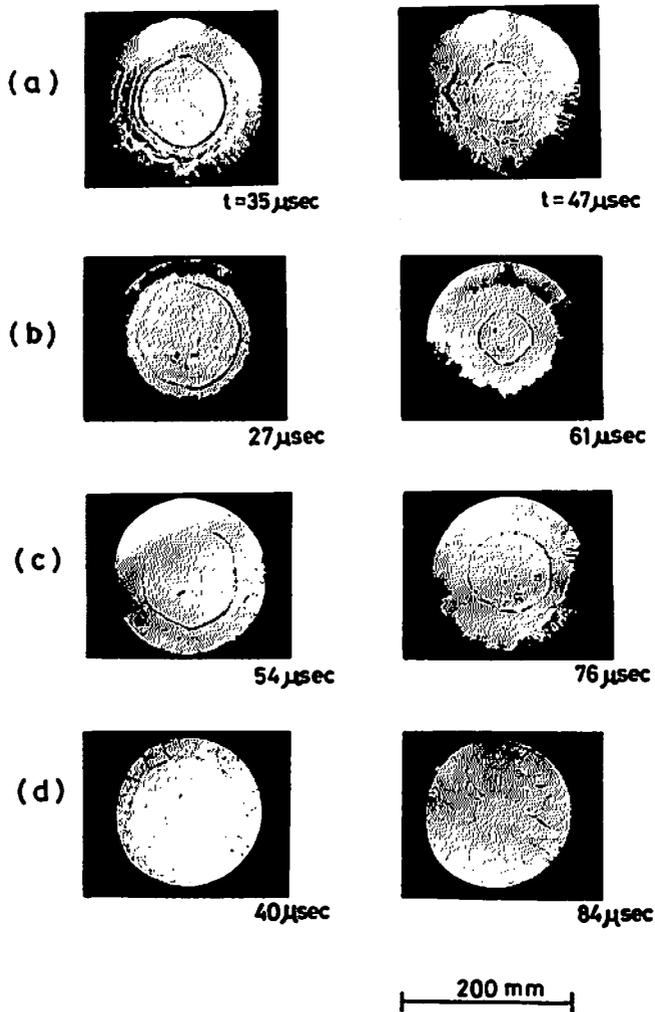


Fig. 6 Effect of number of division ( $n$ ) of exploding wires along the circumference: (a)  $n=2$ ,  $m=3$ ,  $N=6$  (b)  $n=4$ ,  $m=3$ ,  $N=12$  (c)  $n=6$ ,  $m=3$ ,  $N=18$  (d)  $n=8$ ,  $m=3$ ,  $N=24$ .

は、のちに Fig. 8 の (b) に示すように線燃面の銅線の一部を平ワッシャで覆ってしまったためにこの部分の銅線が完全に起爆しなかったためである。この電極部分に生じた局所的な歪の影響が、衝撃波の収束過程の遅れとして現われたためにそれぞれの分割数に応じた多角形の収束衝撃波が生成されている。結局、分割数を増すと、電極数が増すため、それに伴う局所的歪が生じて不利になることがわかる。ところで、Fig. 6 の (d) の 8 分割の場合は他の場合と様子が異なっている。これは導線総本数 ( $N$ ) が多く、24 本もあるために導線一本当たりについて線爆を完全に行なえるだけの電流が流れず、導線全体の線爆に大きなばらつきが生じたためである。これらのことから、分割数をできるだけ小さくした、 $n=2$  (2 分割) を採用することに決定し

た。

Fig. 7 は、導線列数 ( $n$ ) の影響を示したものである。(a) は  $m=2$  の場合、(b) は  $m=3$  の場合で、共に分割数 ( $n$ ) は 2 分割である。ほぼ同じ収束段階のシャドウグラフを示しているが、導線列数 ( $m$ ) が収束段階に及ぼす影響は、殆ど認められない。このことから、 $m=3$  を採用することにした。

### 3. 1. 2 電極の影響

3. 1. 1 の前節で述べた様に電極部分の歪の影響が、収束衝撃波の真円性、求心性に大きな影響を与えている。そこで、電極部分の改良を行ない真円性、求心性に優れた電極を決定するために、Fig. 8 に示す様な、(a) から (e) までの五種類の電極を製作した。ただし、導線分割数 ( $n$ ) は 2 分割、導線列数 ( $m$ ) は 3 列で

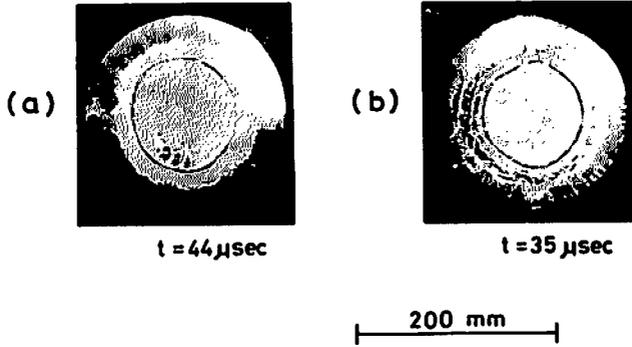


Fig. 7 Effect of number of rows ( $m$ ) of exploding wires:  
 (a)  $n=2, m=2, N=4$  (b)  $n=2, m=3, N=6$ .

行なった。

(1) 初期の電極による線爆

Fig. 8の(a)に示す様な電極を使用した。この電極部は、ケント紙の分割点に針穴を開け、この穴から銅線をケント紙の裏側に引き出し、この引き出された銅線を二枚の銅板の間にはさみ込み締結する構造になっている。この電極を使用して得られた線爆のシャドウグラフが、Fig. 9の(a)である。収束の初期の段階から真円性、求心性が失われている。この理由としては、Fig. 8の(a)に示される電極部分のA部の接触抵抗、B部の銅線の急激な曲がりによる抵抗の影響が現われることその他に、ケント紙の裏側に引き出された銅線部分が、局部的に速く起爆すること等が考えられる。その結果、局部的な歪が生じ、Fig. 9の(a)に見られる様に上下の電極方向の収束が速くなったものと考えられる。

(2) ビスーナット型電極による線爆

(1)に示される電極部分の接触抵抗、銅線の急激な曲がり、ケント紙—電極間の銅線の早期起爆という悪影響を除去するために、Fig. 8の(b)に示す様なM3ビスーナット、平ワッシャを利用した電極を使用した。この電極は前節に使用した電極と同じである。Fig. 9の(b)に示すビスーナット型電極を使用して得られたシャドウグラフを見ると、(1)の電極に比べ幾分、上下の電極方向の歪の影響が取り除かれた様に思える。しかし、平ワッシャに覆われた銅線部分が線爆していないために収束過程で、電極方向が遅れる結果となっている。

(3) 放電型電極による線爆

(1), (2)に示した電極では、どうしても電極部分の影響が収束衝撃波に現われてくる。そこでFig. 8の(c)に示す様に、銅線をはられたケント紙の裏側に電極を接触させ、ケント紙をはさんで電極と銅線の間に放電を起させ、電極から銅線に電流を流す方法を用いた。

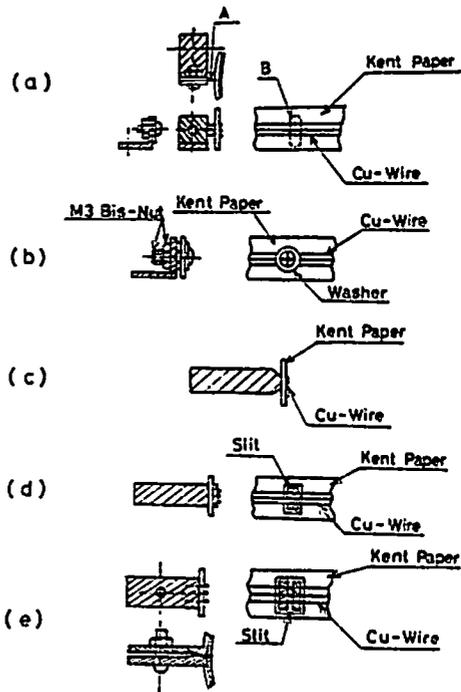


Fig. 8 Various types of electrodes

この型の電極では、電極はそれに隣接する銅線の線爆に対して障害とはならず、局部的な歪が取り除かれるのではないかと予想されたが、実際にはFig. 9の(c)に見られる様に、上下の電極方向の収束が極端に速くなっている。これは、電極と銅線が、直接接触していないので抵抗が大きく、ケント紙を通して銅線へ電流が流れる以前に、直接上下の電極間での気体放電が起ったためである。

(4) スリット—接触型電極による線爆

(3)の放電型電極では期待に反して収束衝撃波の真円性、求心性は良くなかった。そこでFig. 8の(d)に示す

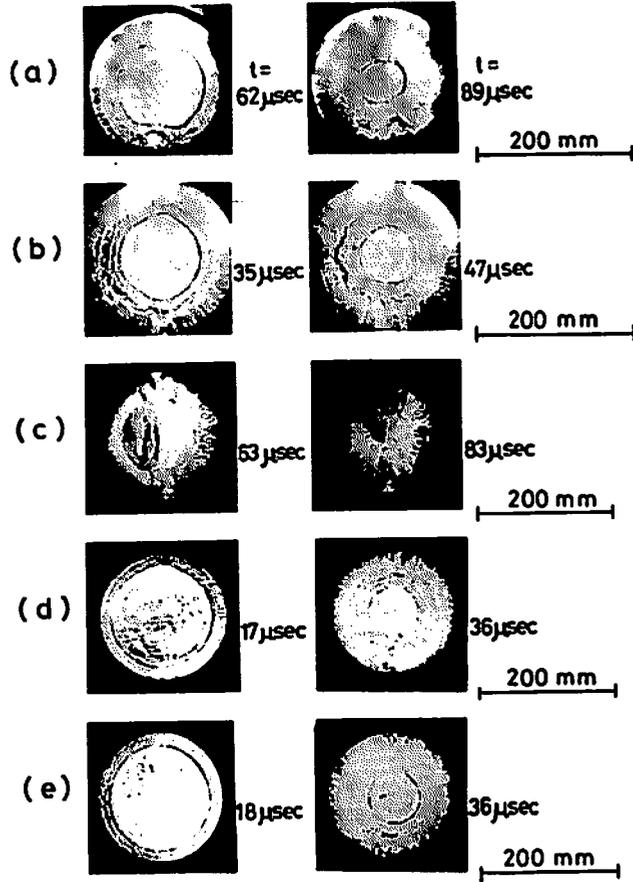


Fig. 9 Shadowgraphs for various types of electrodes

様に、ケント紙に長方形のスリットを開けこのスリットに電極を押し込んで銅線と接触させる方法を試みた。これによって、放電型電極に見られた様な電極間の放電の影響が取り除かれた。Fig. 9の(d)に、この電極を使用して得られた線爆のシャドウグラフを示す。Fig. 9の(c)に比べ、上下の電極方向の極端な歪が取り除かれ、真円性、求心性の良い収束衝撃波が生成された。しかしFig. 9の(d)の二枚の写真を見ると、上下の電極部分の収束が速い場合と遅い場合が見られる。この原因として、電極と銅線の接触が完全でないため、接触抵抗が大きくなる場合があり、更に電極と導線の間に隙間が存在したり、また電極を押し込み過ぎて銅線が線爆面から浮き上って線爆面の一様性が損なわれたことが考えられる。しかしこれらの欠点は、注意深い作業により取り除き得るものであり、本法は実用的に使用可能であると思われる。

(5) スリットー改良型電極による線爆

(4)のスリットー接触型電極と銅線の接続を完全にするために、Fig. 8の(e)に示す様な電極を使用した。図

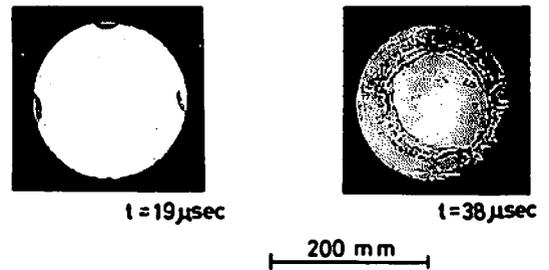


Fig. 10 Effect of number of division ( $n$ ) for type (e) electrode ( $n = 4$ ,  $m = 3$ ,  $N = 12$ ).

に示す様に、二枚の電極板の間に銅線をはさみ込んで締結して、電極と銅線の接続を完全に行なった。その結果、(4)に示された様な電極部の不完全な接触による歪の影響は除かれると考えられる。スリットー改良型電極を使用して得られた線爆のシャドウグラフをFig. 9の(e)に示す。写真を見る限り、電極部分の歪の影響は、ほぼ取り除かれ、真円性、求心性の優れた収束衝撃波が生成された。

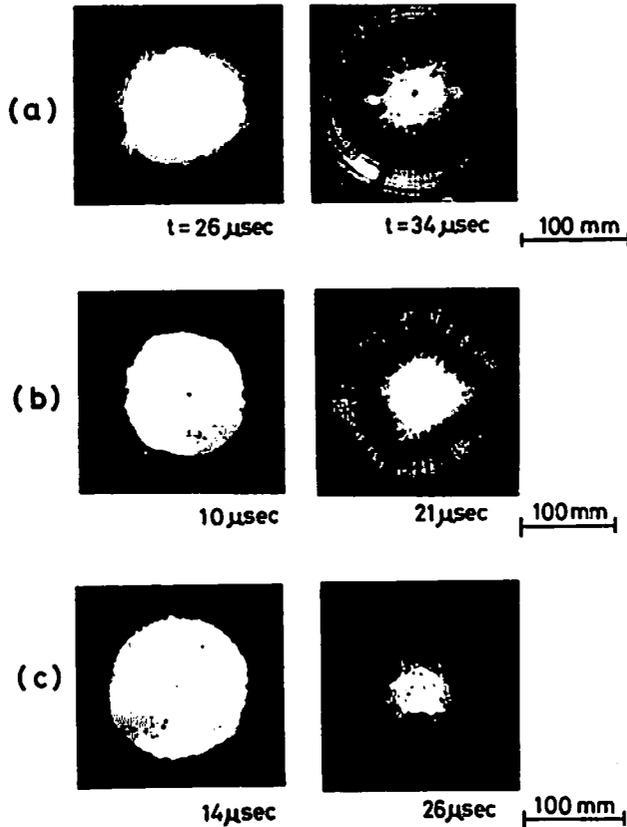


Fig. 11 Shadowgraphs of cylindrically converging blast waves generated: type of electrodes (a), (b) and (c) ( $n=2$ ,  $m=3$ ,  $N=6$ ).

#### 16) スリット改良型電極に対する分割数の影響

3. 1. 1の前節の結果から、改良型電極においても、 $n=2$ が良いであろうことが予想されるが、これを確認するために、 $n=4$ の実験を行なった。Fig. 10に示す様に、電極部分の改良により、局所歪の影響は小さくなったものの、皆無とは言い難く、この場合も $n=2$ の方が優れていることがわかる。以上のことから、本爆実験においては、 $n=2$ ,  $m=3$ を用いることにした。

ここで、線爆によって生成した円筒状収束衝撃波のマッハ数は、収束点付近で $M=4$ 程度であり、波面後方の圧力、温度は、 $1.9 \times 10^6$  Pa,  $1200^\circ$  K, 程度に達していると推定される。

#### 3. 1. 3 放電電流の影響

線爆の一様性に及ぼす放電電流の大きさの影響を調べるため、コンデンサー充電電圧を変化させた予備実験を行なった。充電電圧、8 kV から 30 kV の間で実験を行なったところ、その結果導線一本当り、約 2.7 kA 以上流れれば、線爆の均一性に及ぼす電流の影響

を考慮する必要がないことがわかった。ただし導線線爆によって PETN 爆薬を起爆させるには、3. 1. 1で述べた様に、導線一本当り約 3 kA が必要である。これは、 $n=2$ ,  $m=3$ の時の 9 kV に相当する。なお上に述べた様に、充電電圧をこれ以上増しても、線爆の均一性には殆ど影響を与えない。極端に電圧を上げると、相対する 2 個の電極間での放電が起り不都合である。以上の事を考慮して  $n=2$ ,  $m=3$  の場合、15 kV (導線一本当り、約 5 kA) を採用することにした。

#### 3. 2 円筒状爆薬殻の起爆による収束衝撃波の生成

##### 3. 2. 1 円筒状爆薬収束衝撃波の観察

円筒状爆薬収束衝撃波を利用して、収束点に極限状態を生成させるためには、収束衝撃波の真円性、求心性の向上が不可欠である。そのために 3. 1 では、PETN 爆薬殻の起爆源となる線爆の真円性、求心性を追求した。本節では、3. 2. 1 で使用した、真円性、求心性の劣る (1) の初期の電極と、優れた真円性、求心性を与える (2) のビスナット型電極、及び、(5) のスリット改良型電極を使用して、本爆実験を行ない、期待さ

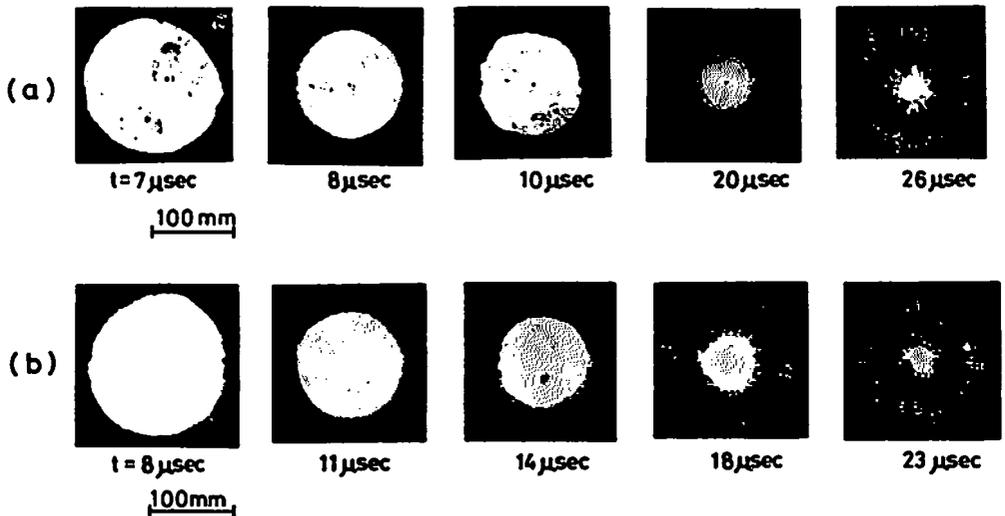


Fig. 12 Shadowgraphs of cylindrically converging blast waves generated by the detonation of cylindrical exploding shells: (a) in 1 atm air (b) in 1 atm  $O_2$  ( $n=2$ ,  $m=3$ ,  $N=6$ ).

れる成果が得られるか否かについて、調べる。

Fig. 11 は、円筒状爆発収束衝撃波のシャドウグラフである。(a)は初期の電極を使用した場合、(b)はビスナット型電極を使用した場合、(c)はスリット改良型電極を使用した場合である。(a)の写真では、電極部分の歪の影響が現われ、上下の電極方向の収束が進められていることがわかる。(b)の写真では、起爆初期の段階に(a)に見られた電極部分の歪の影響は取り除かれているが、収束が進むにつれて全体的に真円性が失われている。(c)の写真は、線爆において最も優れた真円性、求心性を示したスリット改良型電極を示したものであるが、線爆において見られた程の真円性の差異は本爆には見られない。この理由として次の事が考えられる。即ち、PETN 爆薬中を伝播する円筒状爆発波は、その曲率半径が大きいため平面波に近い振舞いをするものと考えられるが、平面波は安定であるから、爆薬が伝わるにつれて線爆時に生じた起爆むら、それが初期の電極の様に著しく大きくない限りならされて真円性を回復するものと考えられる。このことについては、文献 10) において既に報告している。この他の原因としては、爆薬装填密度のむら、爆薬容器の真円性等の差が、改良型電極間の実円性の違いを目立たなくしていることも考えられる。

### 3. 2. 2 円筒状爆発収束衝撃波の波面の観察

Fig. 12 にビスナット型電極を使用して得られた爆発収束衝撃波の一連のシャドウグラフを示す。(a)は大気で行なった場合であるが、衝撃波波面が完全に

後方の気体と分離されていない。これは PETN 爆薬の起爆で大量のススが発生するためであろう。(PETN 爆薬の酸素バランスは  $-10.1$  である。) そこでススを減少させるために爆発容器内に大気圧下の酸素を封入した。その結果得られた円筒状爆発収束衝撃波のシャドウグラフが、Fig. 12 の (b) である。(a) に比べ (b) では波面のはっきりと観察できる。また、(a)、(b) ともに、波面後方にレーザ光を通過する部分が現われているが、これは、収束過程の進行と共に燃焼ガス (高速で中心に向かって運動している。) が、波面後方に集中しその後方に希薄部分が生じたためである。

ここで得られた衝撃波の伝播マッハ数は、収束点付近で  $M=20$  であり、波面後方の圧力、温度は、 $4.7 \times 10^7$  Pa,  $23,000^\circ\text{K}$ 、程度に達していると推定される。

### 4. 結 論

- (1) 線爆用導線の分割数を増すと線爆の一様性は向上する傾向にはあるものの、電極の数が増えるためにそこに生じる局所的歪によって収束波の真円性は損なわれる。また、導線列数の影響は小さい。これらのことを総合して、実用上 2 分割、導線列数 3 列のものを採用した。
- (2) 線爆用電極の改良によって、電極部分に生じる衝撃波波面の局所的歪を著しく減少させることができた。
- (3) 数種の電極を用いて爆薬の起爆を行なった結果、著しく線爆の真円性の乏しい初期の電極を除けば、改良型電極の間では線爆時に見られた程の真円性

の優劣は現われなかった。これは、爆薬中を伝播する爆轟波の安定性に起因するものと考えられる。爆発収束衝撃波の真円性に影響をもつ要因としては、導線爆発用電極、爆薬装填密度のむら、爆薬容器の真円性が、上げられる。

#### 5. 謝 辞

本研究の実験を行なうにあたって、多大の援助をいただいた熊本大学大学院生、坂本輝誠、新垣淑陸、富安秀樹、内海弘、学部学生、工藤秀俊、深沢貢、吉田伸之の各氏に感謝する。また、爆薬の装填、その他取扱い一般を指導していただいた熊本大学衝撃エネルギー実験所月俣昇氏に深く感謝する。

#### 文 献

- 1) R. F. Flagg and I. I. Glass, *Phys. Fluids*, **11**, 2282 (1968)
- 2) I. I. Glass, S. K. Chan and H. L. Brode, *AIAA J.*, **12**, 367 (1974)
- 3) I. I. Glass and S. P. Sharma, *AIAA J.*, **14**, 402 (1976)
- 4) D. E. Roberts and I. I. Glass, *Phys. Fluids*, **14**, 1662 (1971)
- 5) R. A. Roig and I. I. Glass, *Phys. Fluids*, **20**, 1651 (1977)
- 6) I. I. Glass and D. Sagie, *Phys. Fluids*, **25**, 269 (1982)
- 7) H. Matsuo, K. Ebihara and K. Nagayama, *J. Appl. Phys.*, **55**, 1 (1984)
- 8) H. Matsuo, *Phys. Fluids*, **22**, 1618 (1979)
- 9) H. Matsuo and Y. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, **51**, 3126 (1980)
- 10) H. Matsuo and Y. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, **52**, 4503 (1981)
- 11) H. Matsuo, *Phys. Fluids*, **26**, 1755 (1983)
- 12) R. S. Dennen and L. N. Wilson, "Exploding Wires", vol. 2, p. 145 (1962) Plenum
- 13) R. W. Perry and A. Kantrowitz, *J. Appl. Phys.*, **22**, 878 (1951)
- 14) R. Knystautas and J. H. Lee, *Phys. Fluids*, **18**, 61 (1971)
- 15) J. H. Lee and B. H. K. Lee, *Phys. Fluids*, **8**, 2148 (1965)
- 16) B. Ahlborn and J. P. Huni, *AIAA J.*, **7**, 1191 (1969)
- 17) 油木正幸, 内海弘, 北島正, "シャドウグラフ法による収束爆発波の光学的観察", 熊本大学工学部資源開発工学科卒業論文, 1981

---

### Production of Cylindrically Converging Blast Waves

by Hideo MATSUO\*, Hiroaki SANEMATSU\*  
and Masanobu MIYATA\*

This study aims at developing a new method of producing cylindrically converging shock waves. The detonation of cylindrical explosive shells (PETN) is initiated by the wire explosion. As the cylindrical converging shock wave is of weak instability, the initiation of the detonation, the loading of explosives and the geometrical details of the implosion chamber sensitively affect the symmetry of the shock wave to be generated. Series of tests have been performed to establish the method of generating stable cylindrical waves. The results have been examined using the shadowgraph technique.

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