

PETNを使用した線爆発型雷管の性能

角館洋三*, 薄葉 州*, 吉田正典*, 青木勝敏*
 藤原修三*, 坂元 緑**, 市川 清**

PETN微粉末を使用した線起爆型雷管を通常の雷管組立行程とほぼ同じ方法で製作し、単発動作時の起爆遅れとブリッジ電流波形との関係、および多数の雷管直列結線し斉発動作させたときの起爆遅れ時間のばらつきを調べた。起爆遅れは電流の立ち上がり勾配の逆数に対してほぼ直線的に変化し、起爆遅れのばらつきは $\pm 0.1\mu\text{s}$ 以内であった。プラグ固定の寸法精度、PETNの装填方法などの改良によりさらにばらつきを小さくすることが可能であると思われる。

1. はじめに

爆薬のもつエネルギーを有効に利用し、動的超高圧、パルス超強磁場などを発生するには、爆ごう波面を空間的および時間的に制御する技術が不可欠であり、そのためには時間的に高精度に爆薬を起爆できなければならない。また爆発現象の電気的計測や高速度カメラを利用した光学的計測においても、現象を測定系に同期させるためにしばしば高時間精度の起爆が要求される。以前に著者らはC型電気雷管を大電流起爆することにより、ジッタ $0.8\mu\text{s}$ 起爆精度が得られることを報告した¹⁾。しかし、爆ごう波面の制御にはこの値では不十分である。通常理化学実験に使用される爆薬の寸法精度は容易に 1mm 以下にでき、機械加工を行えばさらに精度を1桁上げることできる。高性能爆薬の爆速は $10\text{mm}/\mu\text{s}$ 程度であるから、爆ごう波面を爆薬の寸法精度に相当する精度で制御するには、起爆の時間の誤差は大きいても $0.1\mu\text{s}$ 以内でなければならない。とくに多点起爆の爆縮法で超強磁場を発生させる²⁾場合、収縮するライナーの形状が円筒対称から乱れると高い最終到達磁場は得られないので、極力起爆時間のばらつきの小さい雷管を使用する必要がある。

Herlach³⁾はブリッジの大電流線爆発でPETN(ペンタエリスリトールテトラナイトレート)を直接起爆する方式の雷管(線爆発型雷管)⁴⁾⁻⁶⁾を実験室で精密製作し、起爆時間のばらつき $\pm 20\text{ns}$ を得ている。また

この型の雷管はDDNP(ジアゾジニトロフェノール)などの起爆薬(Primary explosive)を含んでいないので、機械的衝撃や誘導電流でも誤爆を起こしくく、大電流を扱うような電磁ノイズの多い環境下での実験に使用するときでも安全性が高く、取り扱い易い。

しかし、爆縮実験等では一回の実験で数十本の大量の雷管を消費するので、起爆精度の高い精密製作した雷管を実験室で用意するのは困難である。ここでは中川ら⁸⁾の試作した線爆発型雷管の実験結果をもとに、それに改良を加えて通常の雷管組立行程とほぼ同じ方法で線爆発型雷管を製作し、単発動作時の起爆条件(ブリッジ電流波形)と起爆遅れとの関係、および多数の雷管の斉発動作させて起爆遅れ時間のばらつきを調べた。

2. 雷管の構造

線爆発型雷管の構造をFig. 1に示す。ブリッジには同じ電流に対してジュール加熱を大きくするため電気抵抗の大きい白金- $10\text{wt.}\%$ リチウム合金線(室温での電気抵抗率 $26\mu\Omega\text{cm}$)を用いた。直径 $100\mu\text{m}$ の細線を銅のリード線(直径 0.6mm)に超音波溶接し、ハンダ付けで補強して固定し、ブリッジ位置の不確定さを小さくするためにプラグの底面に接触するようにリード線を折り曲げた。ブリッジの長さは 2mm である。

爆薬にはPETNを使用し、図に示すように二層構造になっており、上部は起爆薬(initiator)に、下部は添装薬に相当する。下部にはアセトン溶液から再結晶させた粉末 0.4g を、密度が均一になるように2回に分けて $250\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力で圧搾して装填した。ところでブリッジの線爆発からPETNの定常爆ごうに要する時間は、その結晶粒の大きさに依存し、結晶粒が大きいほど時間遅れが大きくなることが知られている³⁾。また装填密度も起爆感度に大きく影響する⁴⁾。したが

昭和63年11月21日受理

*化学技術研究所

〒305 つくば市東 1-1

TEL 0298-54-4789

**旭化成工業株式会社化学研究所

〒882 延岡市長浜町 4-5003-1

TEL 0982-21-6305

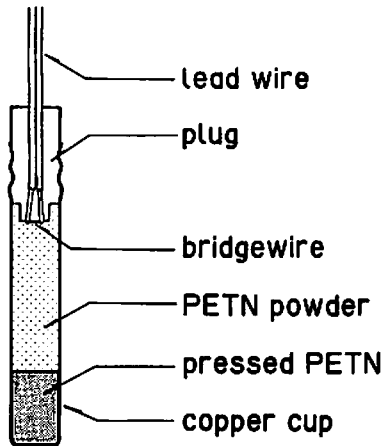


Fig. 1 Crosssectional view of an exploding bridgewire detonator.

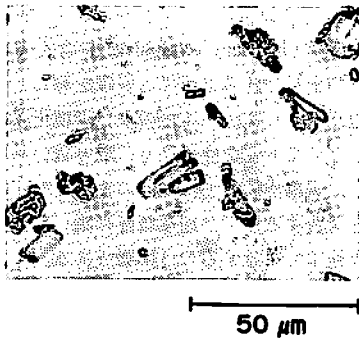


Fig. 2 Photomicrograph of fine PETN powder.

ってブリッジに接触する上部は、さらにもう一度再結晶させた微粉末0.4gを圧搾せずに装填した。再結晶PETNは70~80 μm の針状結晶であるが、再々結晶させたものはFig. 2の光学顕微鏡写真に示すように、10 μm ほどの粒状結晶である。質量と銅管体の形状(内径は6.2mm)から求めた装填密度は圧搾、無圧搾粉末に対して、それぞれ1.33g/cm³、0.70g/cm³であった。

プラグは管体にかしめて固定されている。なお、通常の電気雷管は管体底部を円錐形にすることによってノイマン効果を利用して威力を高めているが、ここでは起爆遅れのばらつき小さくするために底部を平面にしたものを用いた。

3. 実験方法

3.1 単発実験

起爆用電源として容量4.0 μF 、最大充電電圧は5kVのコンデンサ(ニチコン(株)製)を用いた。スイッチは電界歪型3点ギャップ方式で、出力電流は爆発室内にある端子箱まで約10mのRG-8A/u同軸ケーブルで導か

れ、さらに約2mの補助ケーブル(同軸ケーブルまたはツイスト線)で雷管に供給される。雷管の接続部を短絡したときの放電電流波形からインダクタンスを求めると約8 μH であった。また立ち上がりの速い電流が必要なときは以下に述べる斉発実験で使用したコンデンサも利用した。

雷管を個別に起爆したときに、爆ごう波が雷管底部に到達する時間は雷管の底面に直径60 μm のホルマル被爆銅燃り線をおき、イオン・ギャップ法で測定した。また同時にブリッジ電流も時間分解能20nsのデジタル記録装置で記録した。

ブリッジの線爆発から無圧搾PETNへの伝爆の過程を高速度ストリーク・カメラ法で光学的に観察するために、Fig. 1の雷管のブリッジ部と無圧搾PETN部と同じ寸法、構造のものを透明なアクリル容器に製作した(Fig. 4)。底部に爆ごう波が到達した時間は銅箔とアクリル板間の空気間隙が衝撃圧縮によって発光する時間で測定できる。またこの銅箔とアクリル板に埋め込まれた銅線は接触スイッチを構成しているので、電気的導通を検出して電気的測定と光学的測定の時間原点の校正に利用した。ストリーク・カメラ法では2枚の鏡を用いて頭部、側面、底部の発光を同時にフィルムに記録した。

3.2 斉発実験

著者らは爆縮法により超強磁場を発生する実験で、収束爆ごう波を得るために円環状爆薬の外周に24本の雷管を配置し起爆しており、それと全く同じ条件で斉発実験を行った。

使用した電源は容量6.25 μF 、最大充電電圧40kVのコンデンサ(ニチコン(株)製)で、電界歪型3点ギャップ・スイッチを使用している。24本の電気雷管を直接接続し、コンデンサを24kVに充電したときの放電電流で起爆した。雷管底部に爆ごう波が到達する時間はFig. 3に示す配置のアルゴン・ギャップ法で測定した。アルゴン・ガスが雷管底面に到達した衝撃波で圧縮されて発光し、高速度ストリーク・カメラで記録される。また発光の一部は光ファイバーでフォトダイオードに導かれ、光強度を電気的に記録することができるので、単発実験と同様に電気的計測との時間原点の校正に利用した。

4. 実験結果と考察

Fig. 4はアクリル容器で製作した雷管を、4 μF のコンデンサを5kVに充電して起爆したときのブリッジ電流波形とそれから計算された微分波形、およびストリーク写真である。時間の原点はコンデンサの放電用トリガー信号を与えた時間である。電流波形はトリガーから3.4 μs 後に増加率に不連続がみられ、屈曲し

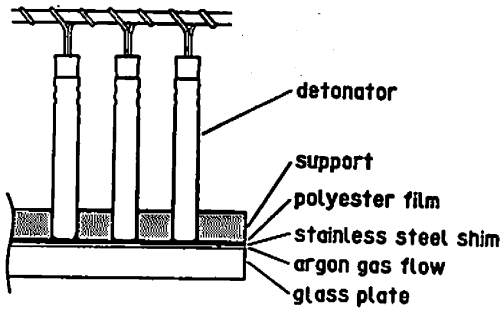


Fig. 3 Experimental assembly to measure a time jitter of detonators by argon gap method.

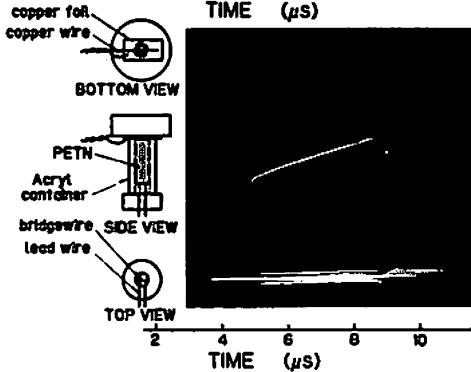
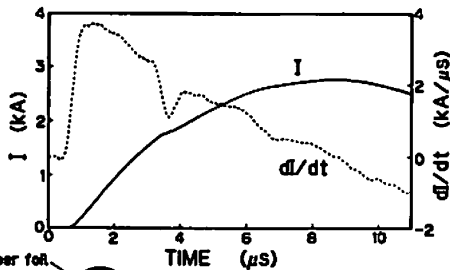


Fig. 4 Bridge current waveform and its derivative (upper) and streak camera record of the top, side and bottom of PETN powder initiated by an exploding bridgewire in a transparent container (lower).

ているのが認められる。これはジュール加熱されたブリッジが蒸発、膨張(爆発)し、電気抵抗が急激に大きくなってほとんど絶縁体となった時に対応している。このあとの電流はブリッジを取り付けているリード線間のアークとなって流れていると思われる。ストリーク写真でもこの時からブリッジの位置で発光が見えはじめ、また電流波形の変曲点で発光強度が強くなっているのが分かる。

ストリーク写真中央の軌跡はアクリル管の内側面に到達した爆ごう波面なのでこれから爆ごう速度を求め

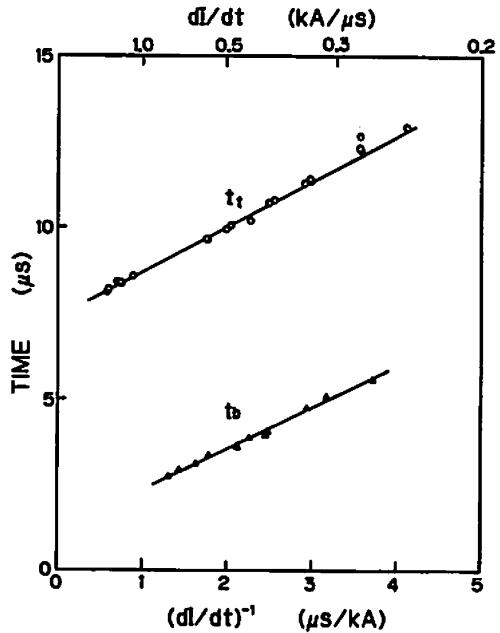


Fig. 5 Dependences of transmission time of detonators (t_t) and burst time of bridgewires (t_b) on the rate of bridge current rise.

ることができる。ブリッジ側端面のごく近傍では、爆ごう波の進行方向が軸方向ではないので光の軌跡の速度は波面より見かけ上速くなるが、初期に爆ごうへの成長過程ははっきり認められ、光が見えてから $1 \mu\text{s}$ 後にはほぼ定常になっている。定常状態での爆ごう速度は $4.15 \text{ mm}/\mu\text{s}$ であるが、圧填密度を変えて測定された爆ごう速度を密度 $0.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ に内挿した値 $4.36 \sim 4.40 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ⁹⁾¹⁰⁾ より小さい。この理由として PETN の密度が均一でないことが考えられ、とくに組立時に PETN を容器に入れた後、ブリッジのついたプラグを押し込んでいるので、ブリッジ側のみ密度が高くなっている可能性がある。雷管製造時の組立方も同じである。PETN の限界薬径は 1 mm 以下であると推定される¹¹⁾ ので、薬径が爆速に与える影響は少ないであろう。

Fig. 1 の電気雷管を 1 本ずつ、コンデンサの充電電圧を変えて起爆した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 4 の電流波形からわかるように、ここで使用した電源系では、ブリッジの線爆発は 4 分の 1 周期以内に完了しているので、電流の立ち上がり勾配 (dI/dt) がブリッジに投入されるエネルギーを決める主要な因子となるであろう。そこで Fig. 5 では dI/dt の関数として起爆遅れ(ブリッジ電流立ち上がりから雷管底部に爆ごう波が到達するまでの時間(t_t))をプロットした。またブリッジ

の線爆発に要する時間(t_b)は電流の立ち上がりから電流波形の変曲点までの時間と仮定し、電磁ノイズで明瞭な変曲点を見い出せない場合もあったので、ブリッジのみで測定したデータも加えて同様に示してある。なお、LCR回路の減衰振動解を展開して得られる式、

$$I(t) = (V/L) t \{1 - (1/2) R t/L\},$$

が示すように、ここで使用した電源系では、雷管のリード線を含めた抵抗($\sim 0.1\Omega$)は電流の立ち上がりの振舞にはほとんど影響を与えない。しだかつて例えば雷管結線時にリード線を短縮したりしても dI/dt は充電電圧 V のみで決ってしまう。

dI/dt が $0.24 \sim 0.29 \text{ kA}/\mu\text{s}$ の範囲では 8 本中 4 本の不発が生じ、 t_b のばらつき (Δt_b) も大きい。しかし $0.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 以上では $\pm 0.1 \mu\text{s}$ ほどになった。また $0.3 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 以上では t_b も (dI/dt)⁻¹ に対しほぼ直線的に変化しており、 $dI/dt \rightarrow \infty$ の極限では $t_b \rightarrow 7.5 \mu\text{s}$ に近づく傾向がみられる。また線爆発から雷管底面に爆ごう波が到達する時間 ($t_r - t_b$) は $0.3 \text{ kA}/\mu\text{s} < dI/dt < 1.0 \text{ kA}/\mu\text{s}$ の範囲で、 $0.4 \mu\text{s}$ しか変化していないが、 t_b の変化は $2.5 \mu\text{s}$ であり、 t_b の電流波形に対する依存性はおもに t_b が担っている。

Fig. 6 は 24 本の雷管の斉発実験のストリーク写真である。高速度カメラの視野が狭いので、フィルム上には 10 本の雷管のアルゴン・ギャップからの光が記録されている。雷管は直列に結線されているのでブリッジを流れる電流は全ての雷管で同一である。この条件で Δt_b はすべて $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 以内に入っている。

しかしこの Δt_b は Herlach が得た値よりかなり大きい。この原因を個々の要素に分けて検討してみる。ブリッジから雷管底部までの距離のばらつきは直接測定することができないので、雷管の全長(プラグ上端から管体底部まで)を測定してその推測をした。90 本の雷管の全長はすべて $45.15 \pm 0.20 \text{ mm}$ の中にあり、このばらつきがブリッジ位置にもっとも影響をうけると思われる無圧搾 PETN にすべて反映していると仮定すると、その爆速から誤差は最大 $\pm 0.05 \mu\text{s}$ になる。この値は無視できない大きさであり、プラグの固定方法などの改善が必要であろう。PETN ま圧填に関しては、薬長 l のばらつきと薬量 m の計測誤差による定常爆ごうの伝ばん時間のばらつきは、

$$\pm \{ (1/v_d + \rho b/v_d^2) |\Delta l| + \rho b l / (m v_d^2) |\Delta m| \}$$

と与えられる。ここで V_d は爆速、 ρ は密度、また v_d の ρ 依存性を $v_d = a + b\rho$ と表したとき、 $a = 0.161 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 $b = 0.3931 \text{ cm}^2/\text{g}\mu\text{s}$ である¹⁰⁾。圧搾 PETN の場合、 l の実測値は $9.90 \sim 9.95 \text{ mm}$ であり、また m の



Fig. 6 Streak camera record of light emission from the argon gap at the bottom of detonators indicated in Fig. 3. Ten of twenty-four detonators were within the field of view of a camera.

計測誤差は $\pm 0.005 \text{ g}$ である。2 回にわけて圧搾しているのに密度は均一であるとすると上式から $\pm 0.02 \mu\text{s}$ と見積もられる。無圧搾の場合、 $l \sim 19 \text{ mm}$ なので因子 l/v_d によりばらつきは大きくなる。さらに爆速データに関して議論したように密度の不均一性の効果に加わっていると思われるので、ここでのばらつきはかなり大きいことが示唆される。

5. まとめ

PETN 微粉末を使用した線起爆型雷管を通常の雷管組立行程とはほぼ同じ方法で製作し、単発動作時のブリッジ電流波形と起爆遅れの関係、および多数の雷管を斉発動作させて起爆遅れ時間のばらつきを調べた。起爆遅れは電流の立ち上がり勾配の逆数に対してほぼ直線的に変化し、この変化は主にブリッジの線爆発に要する時間によるものである。直列接続の斉発実験の結果から、起爆遅れのばらつきは $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 以内であり、初期の目的は達せられたが、より精密な実験に使用するにはさらに小さくしなければならない。ばらつきの原因は特定できなかったが、製造時のプラグの固定の寸法精度を上げたり、PETN の装填方法の改良により解決できると思われる。

文 献

- 1) 青木勝敏, 角館洋三, 藤原修三, 日下部正夫: 工業火薬, 41, 111(1980)
- 2) Y. Kakudate, S. Fujiwara, M. Kusakabe, K. Aoki, K. Tanaka and M. Yoshida: "High Field Magnetism" ed. M. Date (North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, 1983) p. 327.
- 3) F. Herlach: Exploding Wires, ed. W. G. Chase and H. K. Moore (Plenum Press, New York, 1968) vol. 4, p. 281.
- 4) H. S. Leopold: *ibid.*, (1964) vol. 3, p. 125.
- 5) J. H. Blackburn and R. J. Reithel: *ibid.*, (1964) vol. 3, p. 153.
- 6) T. J. Tucker: *ibid.*, (1964) vol. 3, p. 175.

- 7) H. S. Leopold : *ibid.*, (1968) vol. 4, p. 319
- 8) 中川康昭, 庄野安彦, 後藤恒昭, 中井 淳, 木村道夫, 橋本淳二 : *工業火薬*, 36, 136(1975).
- 9) H. C. Hornig, E. L. Lee, M. Finger and J. E. Kurle : *Proc. 5th (Int.) Symp. Detonation*, Pasadena, 1970, p. 503.
- 10) "LASL Explosive Property Data", ed. T. R. Gibbs and A. Popolato (University of California, Berkeley, Los Angels, London, 1980)
- 11) B. M. Dobratz : "LLNL Explosives Handbook, Properties, of Chemical Explosives and Explosive Simulants" UCRL-52997 (1981).

Performance of The Exploding Bridgewire Detonator with PETN

by Yozo KAKUDATE*, Shu USUBA*, Masatake YOSHIDA*,
Katsutoshi AOKI*, Shyuzo FUJIWARA *, Midori SAKAMOTO**
and Kiyoshi ICHIKAWA *

Exploding bridgewire detonators with fine PETN powder were fabricated by the use of manufacturing techniques and parts for ordinary electric detonators. Transmission time, defined as the time interval from the application of current to the bridgewire until shock wave breaks out at the end of the detonator, was measured correlated with the current waveform in the experiment of the single detonator initiation, and its jitter was evaluated by simultaneous initiation of the detonators connected in series.

It was found that the transmission time varied inversely proportional to the rate of current rise and its jitter was $\pm 0.1 \mu\text{s}$. It should be feasible to reduce time jitter further by minimizing dimensional tolerances and controlling a loading process of PETN powder.

*National Chemical Laboratory for Industry, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305
(**Explosives Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., Nagahama
4-5003-1, Nobeoka, Miyazaki 882)