

電気雷管の齊発性

鈴木 輝彦・山本 一元*・鷺尾 泰俊**

1. 緒 論

発破作業の合理化が進められ近年多数齊発々破が広く用いられるようになり電気雷管についても点火機構の基礎的な研究や齊発性に関する統計的な研究がなされている。

B. Drekopf¹⁾ が点火力積の理論を確立して以来わが国においても岡崎氏²⁾、日野氏³⁾ などによって点火力積の測定及び理論式の検討修正がなされて来た。火葉の熱爆発理論に基づいた系統的な実験は、H. P. Stout⁴⁾ や E. Jones⁵⁾ によってなされているが E. Jones は電橋による電気雷管の発火条件式の基礎を固めた。

更に E. Jones, H. P. Stout⁶⁾ は電気雷管の齊発理論にはじめて統計的な手法を適用し齊発々破に於ける臨界条件式を導いて居り木下氏⁷⁾ は E. Jones, H. P. Stout の実験をもとにして点火統計理論に兩数関係を見出している。

然しこれらの齊発理論は点火感度の異なる電気雷管に普遍的に適用することが出来ずまた研究の解析方法にも多少納得されない点がある。

本報文では点火時間の測定方法について考察し点火時間と電橋切断時間の測定値をもとにしてモンテカルロ法によって不発残留の確率を計算し齊発々破の一指針とした。

今仮りに点火時間 X が $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ 、電橋切断時間 Y が $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ に従う場合には n 本の電気雷管を直列齊発するさいに不発残留が発生するという事は

$$\left\{ \max_{1 \leq k \leq n} x_k > \min_{1 \leq k \leq n} y_k \right\}$$

であるので不発残留の確率 α は

$$\begin{aligned} \alpha &= Pr \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\} \\ &= Pr \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k - \min_{1 \leq k \leq n} Y_k > 0 \right\} \end{aligned}$$

であたえられる。

即ち不発残留の確率は電流と齊発個数の函数となり齊発個数 n が増すにつれて完全齊発するに必要な電流値も大きくなって来る。

2. 点火, 点爆時間と電流値の関係

電気雷管の電流感度は電橋の物理的な条件や点火葉の熱感度によって異なるが実験に使用した電気雷管は、0.03mm ϕ の $Pt-Ir$ 合金線を電橋に用い脚線には半田でとりつけ電橋抵抗を $0.58 \pm 0.1 \Omega$ に規制した。点火葉にはロダゲン鉛一塩素酸カリ系を用い少量のバインダーで電橋周辺に約 8mg 塗布し表面をラッカー被膜して点火玉としこれを雷管にとりつけたものである。

電気雷管に流電してから爆発する迄の機構については種々な測定、解析がなされているがほぼ次のような過程をたどる。

- (1) 通電しはじめると電橋が漸次加熱されて電橋近傍の点火葉にまず点火する。
- (2) 電橋近傍に点火すると点火葉は逐次燃焼伝播し点火玉の皮膜を破つて熱粒子、火焰を生成する。
- (3) 熱粒子、火焰が起爆薬層に達すると起爆薬は爆発し次に添装薬に爆轟が転移し雷管全体が爆発する。
- (4) 電橋の切断は低電流の場合には雷管の爆発によって行なわれるが高電流域では雷管の爆発以前に熔断される。

前記項目のうち(1)を除いてはいずれも実測可能であり(2)は所謂点火時間でこれは光電管もしくは点火玉の発火時のパルスを利用してシンクロスコープによって測定出来る。(3)は爆発時間でこれも爆発時のパルスか又は回路切断方式により測定され(4)についても低電流域では(5)と同時に熔断の場合には直接シンクロスコープで測定出来る。

齊発性を解析する際に最も重要な点火時間の測定には種々な方法が提唱されているが現段階では、統計的に推定するにすぎず真の値を正確に実測することは不可能である。

Fig. 1 に点火時間、点火玉の発火時間、電橋の切断時間、雷管の爆発時間と電流値の関係を示す。此の値は夫々独立に測定した平均値であつて同一試料についてこれらを同時に測定したものではない。

点火時間の測定は一定の電流を $50 \mu\text{.sec}$ 刻みで所定時間通電できる「定電流一定時間装置」を新たに

昭和36年11月13日受理

*旭化成雷管工場 **技術部 宮崎県延岡市長浜町

製作して実験を行った。

Fig. 1 にプロットした点火時間はこの装置を用いて測定した値で或る電流値に於いて或る時間通電すればその後電流を断つても電気雷管が爆発を起す時間、換言すれば点火薬に点火し電気雷管の爆発する条件を決定する時間と定義することができる。

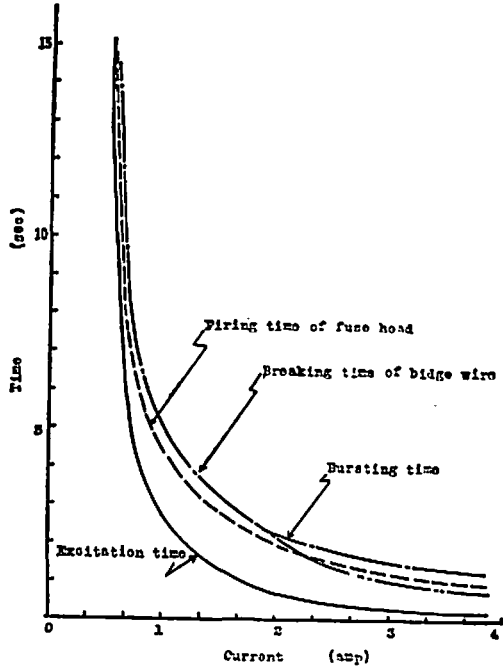


Fig. 1

3. 点火エネルギーと電橋温度

電気雷管の点火エネルギーについては理論的にも実験的にも種々な角度から研究されているが普遍的に適用できる理論式はないようである。

電気雷管の点火をエネルギー的に考察すると、今熱容量 C の電橋に dt 時間通電したときの全熱量を dE とし時間 t に於ける電橋の温度を T とし、点火薬、脚線への熱移動の熱伝導率を K_1, K_2 とすると dE は次式で与えられる。

$$dE = K_1 T dt + K_2 T dt + C dt T \quad (1)$$

実験的に (1) 式の第一項、第二項を別々に求めることは非常に困難である。又電橋の温度が点火薬の発火点以上の温度になったら直ちに発火し燃焼が伝播するものではなく所定温度に於ける発火待ち時間が存在する。電気雷管では電橋の温度が点火薬の発火点以上になつても点火薬の発火を誘動するだけの期間電橋の温度が維持されないならば電気雷管は発火しない。

点火の条件が決定されたときの電橋温度を $Pt - It$ 線

の温度抵抗係数を利用して測定した。

今電橋の初期の抵抗を R_0 、直列抵抗を R_c とすると i の電流を通じた時にはこの回路の電圧 V_0 は

$$V_0 = i (R_0 + R_c) \quad (2)$$

となり点火の条件が定まつた時の電圧を V_i とすると回路の全抵抗が電橋の抵抗増加に比較して充分大きい場合には電橋抵抗増加に伴う電流の減少は無視できるので

$$V_i = i (R_0 + \Delta R + R_c) = V_0 + i \Delta R \quad (3)$$

但し、 ΔR は通電加熱による電橋の抵抗上昇となり (3) 式より

$$\Delta R = (V_i - V_0) / i \quad (4)$$

となる。

R_0, R_c は既知であり、 V_i, V_0 はシンクロスコープによつて直接測定できるので ΔR は求められる。

又電橋の温度-抵抗係数を α (Ω/C°) とすると

$$\Delta R = \alpha R_0 (T_i - T_0) \quad (5)$$

但し、 T_i は点火の条件が定まつたときの電橋温度 T_0 は電橋の初期温度 (室温)

となり (5) 式より

$$T_i = (\Delta R + \alpha R_0 T_0) / \alpha R_0 = \Delta R / \alpha R_0 + T_0 \quad (6)$$

又は

$$T_i = (V_i - V_0) / \alpha i R_0 + T_0 \quad (6')$$

となり T_i が求められる。

この方法を利用して点火玉の発火点を測定しようとする試み⁶⁾ がなされているが、これは電橋の抵抗が急激に変化する時の電橋温度を計算するものであるが、電橋に急激な抵抗変化のあらわれる時間は我々の実験では点火時間にも点火玉の発火時間にも一致しなかつた。

即ち点火薬に着火してこれが或る程度分解燃焼して熱を生成しこの熱生成速度が電橋に発生する熱よりも相対的に大きくなつた時と見做すことができ電気雷管では通電々流によつて異つて来る。

Table 1 に「定電流一定時間装置」から求めた点火時間と電橋が急激な抵抗変化を示した時間を示す。このような理由で電橋の抵抗変化からは点火時間を求めることは出来ない。

Table 2 には「定電流一定時間装置」から求めた点火時間とこのときの電橋温度を示したもので電流値が高くなるにつれて、換言すれば点火時間が短くなるにつれて電橋温度は高くなる。

(1) 式を積分し点火時間迄に点火薬、脚線等に移動したエネルギーを E_c 、電橋の加熱に費されたエネルギーを E_b とすれば点火時間迄に電気雷管に与えられたエネルギー E は

$$E = E_c + E_b \quad (7)$$

Table 1

current (amp)	excitation time (m sec)	time of resistance change in bridge wire (m sec)
0.62	14.84	13.89
0.70	6.35	7.29
0.93	3.12	4.48
1.58	1.07	—
1.99	0.65	1.92
2.34	0.45	—
3.10	0.29	0.83

となる。全エネルギー E は電橋に発生する全熱量であり E_b は電橋温度を測定すれば計算出来るので E_c も求められる。Table 2 には E_c , E_b の値を示したが E_c は電流値が大きくなるにつれて小さくなる。E. Jones⁵⁾ はこの項を熱損失として取り扱っているが E_c と点火時間の間にはほぼ直線関係が見通せ所謂熱損失項は時間の一次函数とみて良い。

Table 2

current (amp)	temp. of bridge wire (°C)	E_b (m joule)	E_c (m joule)
0.62	298	0.94	2.38
0.70	296	0.84	0.98
0.93	347	1.05	0.52
1.27	364	1.10	0.62
1.58	368	1.11	0.43
1.99	378	1.17	0.30
2.34	393	1.20	0.26
3.10	428	1.33	0.24

4 不発残留の確率計算の基礎式

不発残留の確率を調べるには点火時間、電橋切断時間を知れば良い。これらの時間は個々の雷管につき一定でなくどうしてもいくらかのパラッキをもつものである。前述したように点火時間はそれ自身の値を測定することは不可能であり新たに製作した「定電流一定時間装置」によつても点火時間がある値より長いか短いかわかり得るに過ぎない。

このような試験は感度試験と呼ばれておりこうした量の推定には昇降試験法が用いられている。然しここではこのような方法は用いながつた。と云うのは特定の通電時間で電気雷管が爆発をおこすかおこさないかを試験しても、もしもその雷管が爆発を起さないならば通電前とこのような試験を行なう範囲内では同じ状態と見做せるからである。

従つて通電時間のある時間々隔で順次長くして行き各通電時間で爆発を起すか否かを観察する。この操作

を雷管が爆発をおこす迄続け爆発をおこしたときの通電時間を点火時間とした。

電橋切断時間は点火時間には別にシンクロスコープによつて測定した。と云うのは点火時間と電橋切断時間との間には明瞭な相関々係があると云う実証が得られず点火の条件が定まつた後直ちに電流を断つた場合には点火下の発火時間がそのまま通電を続けた場合に比較して相対的に長くなる傾向を示す。

実験の結果を整理し点火時間と電橋切断時間の分布を調べると両者共に Fig. 2 のような正規分布に従うと見て良いことが判つた。

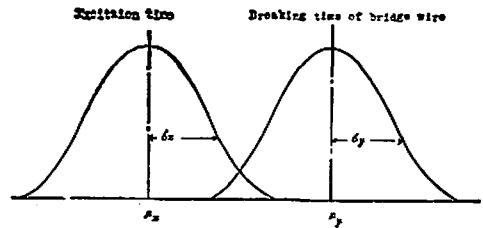


Fig 2

従つてある電流を流したとき点火時間 X は $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ に従い、電橋切断時間 Y は $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ に従うと仮定出来る。 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ は電流値によつて異なるものである。

個数 n の斉発を考える場合には n 個の雷管はこのよ様な点火時間、電橋切断時間をもつ雷管の集団からのランダム・サンプルと見做せる。即ち各雷管の点火時間、電橋切断時間をそれぞれ $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ とすると x_1, x_2, \dots, x_n は $N(\sigma_x^2, \mu_x)$ からの n 個のサンプル、 y_1, y_2, \dots, y_n は $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ からの n 個のサンプルと見做せる。直列斉発に於いて不発が起ると云うことは

$$\left\{ \max_{1 \leq k \leq n} x_k > \min_{1 \leq k \leq n} y_k \right\} \quad (8)$$

である。故に不発残留の確率 α は

$$\begin{aligned} \alpha &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\} \\ &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k > 0 \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

で与えられる。 α は電気雷管が同一ロットのものであれば

(1) 斉発個数 n の函数

(2) $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ の函数、即ち電流の函数

となる。従つて n を固定して電流 i をいろいろ変えた場合の不発残留の確率 α をいろいろの n について計算すれば良い。

α を求めるには2つの正規母集団からの夫々 n 個のサ

サンプルをとったとき一方の最大値と一方の最小値との差の分布が必要である。この分布についての数表はまだ作成されていないようであるのでモンテカルロ法により α を求めることにした。

5 モンテカルロ法による不発残留の確率の推定

特定の電流に対する点火時間、電橋切断時間を測定した結果は Fig. 2 のようにほぼ正規分布に従うとみなされ、平均値、標準偏差は Table 3 のようになる。

Table 3

current (amp)	excitation time (m sec)		breaking time of bridge wire (m sec)	
	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation
0.62	14.84	4.02	15.79	3.00
0.70	6.35	0.98	8.54	0.71
0.93	3.12	0.60	5.85	0.71
1.58	1.02	0.10	3.09	0.28
1.99	0.65	0.07	2.15	0.08
2.34	0.45	0.06	1.56	0.12
3.10	0.29	0.04	0.93	0.02

種々の i, n に対する不発残留の確率をモンテカルロ法によって推定する場合に $N(0, 1)$ からのサンプルを 1 万個のマハラノビスの表よりとり出した、

1 つの乱数に対して各電流値に対する点火時間を変換により計算して記録、又別のカードに各電流値に対する電橋切断時間を Fig. 3 のように記録した。

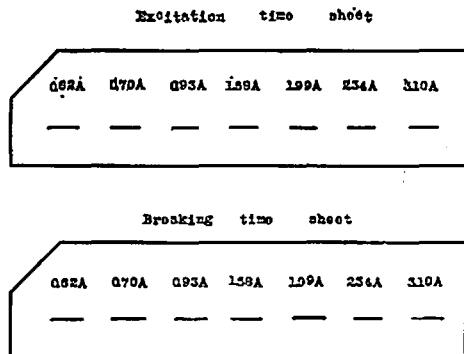


Fig. 3

この合計 2 万枚のカードを用いて

- $n = 5$ の場合は 1,000 回
- $n = 10$ 1,000
- $n = 20$ 500
- $n = 50$ 200

の実験を行なった。結果を Table 4 に示す。又これを

図示したものが Fig 4 である。

Table 4

current (amp)	probability of miss fire			
	$n = 5$	$n = 10$	$n = 20$	$n = 50$
.620	0.99	1.00	1.00	1.00
0.70	0.38	0.70	0.92	0.99
0.93	0.03	0.09	0.25	0.64
1.58	0.00	0.00	0.00	0.00
1.99	0.00	0.00	0.00	0.00
2.34	0.00	0.00	0.00	0.00
3.10	0.00	0.00	0.00	0.00

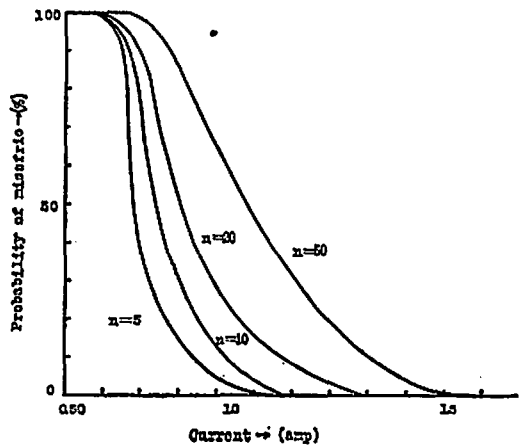


Fig. 4

このように電気雷管は電流値が小さくなるにつれ又斉発個数が多くなるにつれて不発残留の確率は増加し発破器の設計、実際発破の際の適正斉発個数を検討する資料とすることが出来た。

なお本文では点火時間 X と電橋切断時間 Y は互いに独立であると仮定したが、もし X と Y が独立でないすると次のように考えれば良い。

(X, Y) は $(\mu_x, \mu_y; \sigma_x^2, \sigma_y^2; \rho)$ の 2 次元正規分布に従う。故に $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ はこの 2 次元正規母集団からの n 個のサンプルであるとすれば同様に解析できる。

終りにのぞみ実験を指導していただいた旭化成事業部次長太原正氏、雷管工場長東島直氏、計器の設計、製作をお願いした計測管理室後藤次男氏、実験に協力いただいた当工場樋口隆一郎氏に対し厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) B. Drekopf: Sprengstoffe und Zündmittel
- 2) 岡崎一正: 工火協 Vol. 10, 11, 12

- 3) 日野 熊雄:同上 Vol.11
- 4) H. P. Stout: Nature Vol. 166
- 5) E. Jones: Proc. Roy. Soc., A 523
- 6) E. Jones, H. P. Stout: Coll. Eng., Oct. & Nov. ('48)
- 7) 木下 四郎: 工火協 Vol. 15, 16, 17

- 8) 加藤 清祝 同上 Vol. 20
- 他に W. Dixon, F. J. Massey Introduction to Statistical Analysis (Mc Graw-Hill)
- 第9回品質管理シンポジウム論文集に一部発表
- 1960年春期火薬協会研究発表会で発表した。

Series Firing of Electric Detonators

Teruhiko Suzuki, Kazumoto Yamamoto, Yasutosi Wasio

It is said that the excitation time and the breaking time of bridge wire of electric detonators are normally distributed at any given current.

Measuring these times, we confirmed through our experiments that each distributions are normal, then obtained mean excitation time and breaking time of bridge wire and their variances to compute the probability of miss fire at series firing of electric detonators by means of Monte Carlo method.

Now, if the excitation time X and the breaking time of bridge wire Y comply normal distribution $N(\mu_x, \sigma_x^2)$, $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ respectively, miss fire should occur at series firing of n electric detonators whenever following equation is given :

$$\left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\}$$

The probability of miss fire α is written as follow :

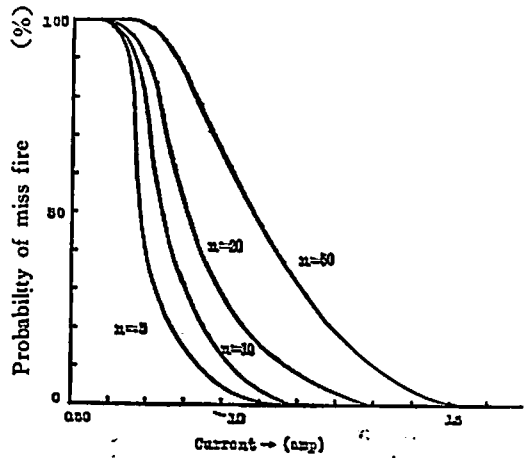


Fig. 4

$$\begin{aligned} \alpha &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\} \\ &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k - \min_{1 \leq k \leq n} Y_k > 0 \right\} \end{aligned}$$

So α is the function of the firing current and the number of electric detonators and the result is shown in above figure.

MS遅発発破による地震動

名和小太郎・菅田博*

まえがき

発破により、爆破エネルギーの一部は、発破点近傍

昭和36年11月14日受理

* 旭化成工業株式会社 技術研究所 東京都板橋区

の破砕領域をこえて、弾性波エネルギーとして、周囲の媒質中に伝播してゆく。この弾性波は、発破点周辺の構造物に震動をあたえ、場合によっては、それに損傷をあたえる。それゆえ、実際の見地よりすれば、こ