

電気雷管及びコンデンサー式発破器の 設計及び電気発破に就いての研究 (第二報)

(昭和29年10月4日受理)

木 下 四 郎

(日本化薬株式会社折尾作業所火工品研究課)

第三章 齊発理論

3.1) 主として数値計算による解明

3.1.1) 点爆時間の分散を考えた場合

今或る一定の電流値にて電気雷管の一個一個を発火させた時は点火時間及び電橋切断時間は正規分布をなしてバラツいて居る。この点火時間と電橋切断時間の分散は実用電流値の辺では我々の実測によれば第1章第4節に述べたる如く殆ど等しいので点爆時間の分散は殆ど零である。即ち点火電流の値が定まれば点爆時間 τ は $\tau = \text{const.}$ と考えて差支ないが一般には点火時間の分散と電橋切断時間の分散は異つて居る。即ち点爆時間もある分散をもつて居ると考えるべきである。この場合の齊発の條件は Jones 氏⁷⁾によれば次の通りである。

或る電流値で電気雷管を発火させた場合の平均点火時間を μ_a 、その分散を σ_a とし電橋の切断平均時間を μ_b 、その分散を σ_b とする。然る時は推計学の教えるところにより n 個の試料(この場合は n 個の電気雷管)を取り出した時の最大最小の時間の差の中心値即ち \bar{R}_a 、 \bar{R}_b は σ_a 、 σ_b とそれぞれ次の関係にある。

$$\bar{R}_a = E(w) \sigma_a \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\bar{R}_b = E(w) \sigma_b \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに $E(w)$ と試料数 n との関係は正規分布のものに就いては数値表として表示されて居り¹⁰⁾¹⁴⁾その関係は第3.1表の通りである。

第3.1表

n	2	3	4	5	10	20	50	100	1000
$E(w)$	1.128	1.603	2.059	2.320	3.070	3.785	4.491	5.015	6.433

この場合 n 個の電気雷管を齊発させる条件式は Jones 氏によれば

$$E(w) = \frac{2(\mu_b - \mu_a)}{\sigma_a(1 + \sigma_a/\sigma_b)} \dots\dots\dots (3.3)$$

と表わされている。同氏は実験値につき(3.3)式の右

辺を計算し、これと第3.1表の n と $E(w)$ の関係を使用して n 個の電気雷管を齊発させるに必要な平均電流値を求めている。この値は第3.2表の通りである。

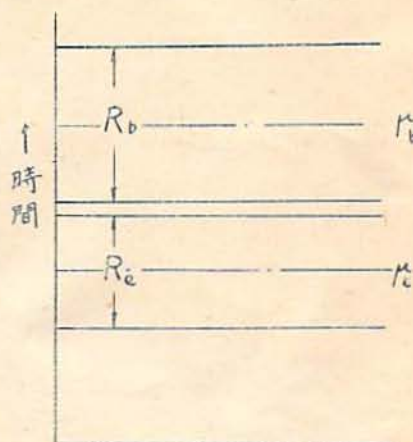
第3.2表

No. of detonators in series	Mean Firing Current (Amp)	
	Observed	Calculated
2	-	0.52
5	-	0.68
10	-	0.76
20	-	0.81
30	-	0.86
50	0.88	0.90
100	0.93	0.96

Mean detonator resistance (ohm) = 1.4

これにより点爆時間の分散を考えた場合の解答は得られたわけである。

次に不発の確率が小なる場合 $w = R/\sigma$ (ここに R は範囲、 σ は分散を示す) を考えたときの齊発の条件を考えてみる。



第3.1図

今 \$n\$ 個の電気雷管の点火時間、電橋切断時間が第3.1図に示す如く \$R_e\$, \$R_b\$ で、平均時間がそれぞれ \$\mu_e, \mu_b\$ とすると、斉発するための条件は

$$\mu_e + \frac{R_e}{2} \leq \mu_b - \frac{R_b}{2} \dots (3.4)$$

となることは明らかである。又

$$R_e = w\sigma_e$$

$$R_b = w\sigma_b$$

と表わされるので第(3.4)式は

$$w \leq \frac{2(\mu_b - \mu_e)}{\sigma_e + \sigma_b} \dots (3.5)$$

を得る。これは Jones 氏が不発の確率小なる場合に就いて求めた式と同じである。

3.1.ii) 点爆時間の分散を零と考えた場合

前節で述べた方法によれば点爆時間に分散ある場合の解答を得られるが、既に述べた如く点爆時間の分散は実用上は零としても差支ないと考えられるので、以下同一電流値に対しては点爆時間 (\$\tau\$) 一定と考えて斉発の条件を求めてみる。勿論点火電流値が大となればこの値は小となることは既述の通りで、或る試料については \$\tau = 1.59i^{-0.3}\$ であることも(1.6)式にて述べた通りである。

今或る一定の電流値にて電気雷管の一個一個を発火させたとき点火時間は正規分布をなしてバラツキている。今 \$n\$ 個の電気雷管に一定の電流を通じたときの点火時間の最大最小の範囲を \$R\$ とする。然るときは斉発の条件とは一般に

$$R \leq \tau \dots (3.6)$$

ということに外ならない。何となれば第3.2図に於い

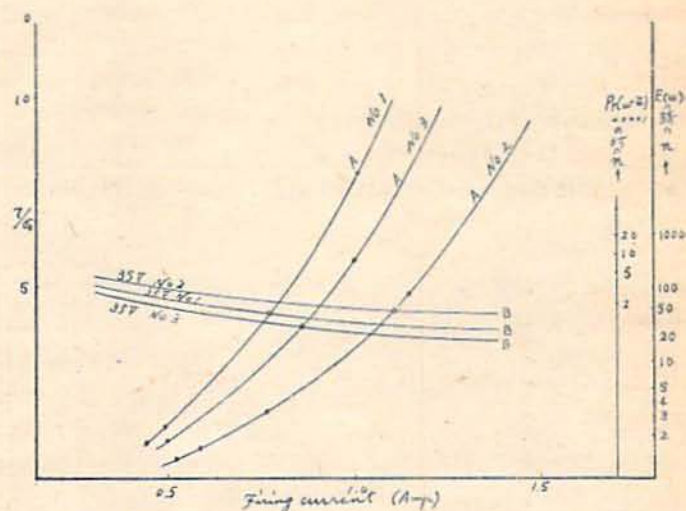


第3.2図

てBの場合 \$\tau\$ が \$R\$ より小なればDのものが点火される

第3.3表

	Firing Current (Amp) i	Mean Detonator Resistance (ohms)	Excitation time (ms)		Critical Energy E'	Reaction time(ms) mean τ	τ/σ_e
			Mean t	Std Dev. σ_e			
No. 1	0.430	1.153	24.14	1.81	5.14	1.60	0.88
	0.484	1.157	15.96	1.20	4.31	1.60	1.33
	0.648	1.157	7.23	0.54	3.51	1.60	2.97
	1.014	1.144	2.72	0.20	3.20	1.60	8.00
No. 2	0.508	0.749	24.16	2.66	4.67	1.20	0.45
	0.587	0.750	15.85	1.74	4.09	1.20	0.69
	0.764	0.733	6.58	0.72	2.82	1.20	1.67
	1.166	0.751	2.18	0.24	2.22	1.20	5.00
No. 3	0.5	1.4	23.33	1.76	8.17	1.62	0.92
	0.8		6.44	0.48	5.77	1.62	3.37
	1.0		3.86	0.29	5.40	1.69	5.82
	2.0		1.14	0.084	6.38	1.34	15.95



第3.3図

前に回路が切断され必要な点火電流が流れないこととなり不発残留となることは明らかである。故に

$$R/\sigma_e \leq \tau/\sigma_e \dots (3.7)$$

が斉発の条件となる。第1章で得られた実験データをまとめ以下の計算に必要な \$\tau/\sigma_e\$ を記したものが第3.3表である。

点火時間は実験で得られた値及び Jones 氏のデータを参考として試料 No.1 については 1.60ms, 試料 No.2 については 1.20ms として計算を行い、No.3 については Jones 氏の測定値のまま使用した。この第3.3表より点火電流と \$\tau/\sigma_e\$ の関係をグラフにかくと

第3・4表

Sample	No. of detonators in series	Mean detonator resistance Ω	Mean Firing Current		Firing Current	
			Observed	Calculated	Probability of failure 10^{-6}	
No. 1	2	1.2	0.45	0.46	0.79	
	5		0.60	0.60	0.85	
	10		0.60	0.66	0.88	
	20		0.85	0.72	0.90	
	50		-	0.78	-	
	100		-	0.82	-	
No. 2	2	0.7	0.65	0.67	1.13	
	5		0.70	0.86	1.21	
	10		0.80	0.96	1.25	
	20		1.10	1.04	1.28	
	50		-	1.12	-	
	100		-	1.17	-	
No. 3	2	1.4	0.54	0.53	0.52	0.91
	5		0.67	0.70	0.68	0.98
	10		0.81	0.77	0.76	1.01
	20		0.82	0.83	0.81	1.04
	50		0.88	0.90	0.90	-
	100		0.93	0.95	0.96	-

*) この項は Jones 氏の方式による計算値にて第3・2表に記したもの

第3・3図A曲線を得る。

(3・7) 式より $w = R/\sigma_e \leq -/\sigma_e$ であるから限界の場合では第3・3図の縦軸は w と同じものである。然らば第3・1表より発火個数 n の時の $E(w)$ の値が分つているから、第3・3図の右側の縦軸に n の値を入れれば或る個数の電気雷管を発火せしむるに要する平均点火電流を求めることが出来る。第3・4表の計算値とはかくして得た数値である。猶試料 No.3 Jones 氏の項を見れば分る如く本方式による計算値と Jones 氏の計算値とはよく一致している。猶 Jones 氏の計算には前節で述べた如く σ_e, σ_s を用いて居るが、筆者は既に述べた如く範囲の分布と τ の関係より導いたものであるが、第3・4表に示す通り Jones 氏の計算値とよく一致した計算値が得られたので筆者の考え方も異つていないことを示すものといえよう。これは発火個数が100個という様に相当大なる場合でも平均点火電流値は1アンペア程度であり、この程度の電流なら Jones 氏の如く σ_e, σ_s を異つたものと考えない。即ち、点火時間を一定と考えても差支ないために原因している。筆者の考え方を基礎とすれば以下述べる如く電気雷管及び発火器の設計が数式的に可能となる利点がある。

第3・4表より明らかな如く Drekopf 氏が発火個数の如何に関せず一定と考えていた限界電流値は発火個数の増加とともに大となることが明らかとなつた。この特性は以下述べる如く電気雷管の設計及び発火器の設計、更に電気発火に対する従来の考え方を根本的に改めねばならない重要な特性となるのである。

3・2) 任意の不発の確率についての発火個数と点火電流

以上により平均点火電流値が求められたが、任意の不発の確率についての場合を検討する。

例えば $P_r(w \geq) = 0.001$ の場合は数値統計表¹⁾より

n	2	5	10	20
$P_r(w \geq) = 0.001$	4.65	5.48	5.97	6.41

なる関係がある。この表は n 個の電気雷管を取つた場合、点火時間について w が或る値より大となる確率が 0.001 であることを示している。同様に電機切断時間についても w が或る値より大となる確率が 0.001 であることを示している。従つてこの表から得られる不発の確率は $(0.001)^n$ ということになる。故に第3・3図の右側の縦軸に $P_r(w \geq) = 0.001$ に相当する n を目盛れば試料 No.1, 試料 No.2, 試料 No.3 について不発の確率 10^{-6} なる場合の点火電流を得ることが出来る。この値を第3・4表に併記した。任意の不発の確率についての値は同じ手法により求められる。

以上により発火個数とともに限界電流値も上昇することが分つたが第3・4表のままでは或る発火器を使用したとき何個の電気雷管を発火させ得るかは簡単には分らない。何となれば点火電流は発火個数とともに変化するので、従来行われた如き点火電流を1.5アンペアとして計算する如き方法は実用上はともかく理論的には無意味であるからである。更に点火部の構造を異に

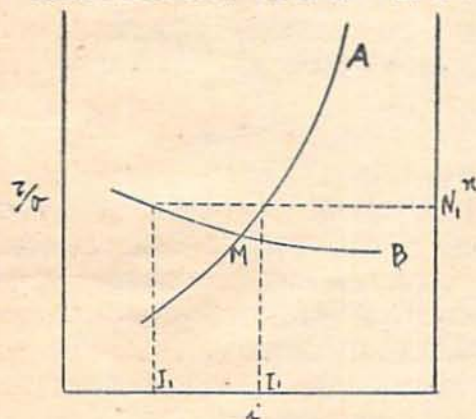
した二種の電気雷管を同一発破器で発火させたとき、どちらが多数発火可能であるかに至つては判別し難くなる。更にかくの如く点火部の構造を異にしたために発火個数に影響を与えるのは如何なる因子であるかに至つては全然分らないわけである。

3.3) 或る電源を使用した場合の最大発火個数

直流電源の電圧を V とし、電気雷管一個の電極抵抗を r 、電気雷管の脚線抵抗を R 、母線の抵抗を R_m とし直列個数を n とする。その時の流通電流を i とすると

$$V = i\{n(r+R) + R_m\} \dots \dots \dots (3.8)$$

となる。今一定電圧の直流を使い一定の電気雷管即ち r 及び R は一定のものを使用し母線抵抗 R_m も一定とすると (3.8) 式より或る n に対する i の値を求めることが出来る。然らば i と n との関係は第 3.3 図に入れることは可能なわけで第 3.3 図の曲線 B を得る。この曲線は $V=35$ ボルト (即ち鳥居印 10 発掛発破器の記銘電圧) のものを使った場合である。第 3.3 図において曲線 A と曲線 B との交点はその電源を使用したときの発火限界個数を表わすことになる。即ちその交点より n が大なる場合には点火に必要な電流が流れないので不発となることは明らかである。第 3.4 図によりこ



第 3.4 図

の関係を説明する。二つの曲線の交点 (M) より大なる数、例えば N_1 のとき A 曲線より発火に必要な電流値 I_1 を得る。又 B 曲線よりこの発破電源でこの個数のときは I_1 しか流れないことが分る。即ち不発残留となることは明らかである。第 3.3 図によると電源 35 ボルトを使用したときの限界平均発火個数は次の如くなる。

第 3.4 表と第 3.5 表より Jones 氏の用いた電気雷管即ち英国の代表的なものと思像されるものが案外発

第 3.5 表

		No. 1	No. 2	No. 3 (Jones 氏)
限界 発火 個数	計 算 (Fig 3.3) より	40	45	30
	実 測	$\frac{27}{40}$ $\frac{27}{40}$	$\frac{44}{45}$ $\frac{46}{50}$	—

数の少いことが分る。この問題は第 VI 章で考察することにする。

3.4) 發火理論

電気雷管の点火エネルギーと点火時間の間には前述の (1.4) 式即ち $E = A + Bt$ なる関係が成立することは Jones 氏により理論的並びに実験的に確認され又筆者も第 I 章に述べた実験で確認した。又点火時間の平均値とその標準偏差の間には (1.1) 式即ち $\sigma_e = at$ なる関係が成立することを述べた。

従つて (1.1) 及び (1.4) 式より

$$i^2 r = \frac{1}{\sigma_e} \beta + B \dots \dots \dots (3.9)$$

ここに

$$\beta = Aa \dots \dots \dots (3.10)$$

を得る。 r, β, B は同一種類の電気雷管については一定である。従つて i^2 と $1/\sigma_e$ とは直線関係をなすべきである。(3.9) 式を變形して

$$i^2 = \frac{\tau}{\sigma_e} \xi + \eta \dots \dots \dots (3.11)$$

$$i = \sqrt{\frac{\tau}{\sigma_e} \xi + \eta} \dots \dots \dots (3.11)'$$

ここに

$$\xi = \beta / \sigma_e \tau \dots \dots \dots (3.12)$$

$$\eta = B / r \dots \dots \dots (3.13)$$

を得る。即ち (3.11)' 式は第 3.3 図の i と τ/σ_e の曲線を表わす式である。一方第 3.1 表より n と $E(w)$ の関係が分つているが、この関係を数式で表わされれば (3.11) 式とから発火個数 n と平均点火電流値 i との関係が数式的に表わされることになる。

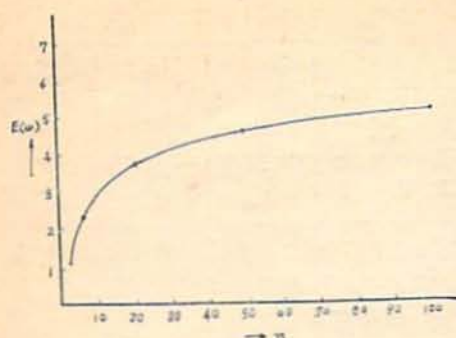
然るに n と $E(w)$ の関係は簡単には求められない。なんとすれば R の平均値 \bar{R} は

$$\bar{R} = \int_0^{b-a} R f(R) dR$$

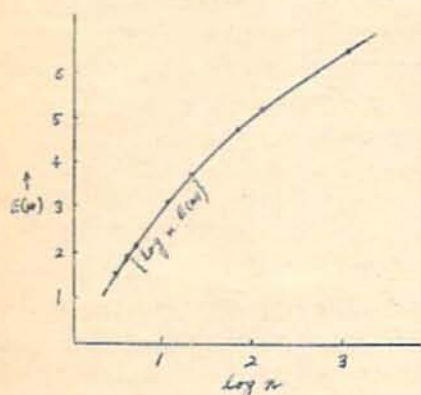
$$f(R) = n(n-1) \int_a^{b-n} p(u) p(u+R)$$

$$\left[\int_a^{u+n} p(x) dx \right]^{n-2} du$$

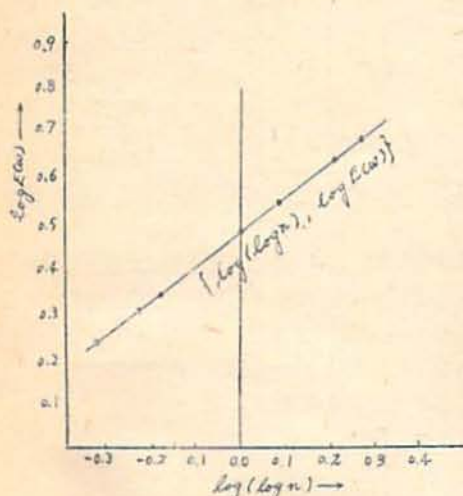
あたり複雑な多重積分となる¹⁴⁾。ここに a, b は $p(x)$ が定義されている範囲を示し u は a, b 間の任意の値である。正規変数に対する n と $E(w) = \bar{R}/\sigma$ の関係は数表として作られていることは前掲第 3.1 表の通りで



第 3.5 図



第 3.6 図



第 3.7 図

ある。然しこのままでは使用出来ないので筆者は n , $E(w)$ の関係を近似的に求めることを試み次の如き関係を求めた。

即ち第 3.1 表により n と $E(w)$ のグラフをかくと第 3.5 図を得る。

この曲線を直線化する試みとして $E(w)$ と $\log n$ との関係を求めると第 3.6 図を得る。これで大分直線に近づいたわけであるが更に $\log(\log n)$, $\log E(w)$ の関係を作つたのが第 3.7 図である。さて第 3.7 図は近似的に直線と見做して差支ない。この直線式は次式で表わされることになる。即ち

$$\log E(w) = 0.490 + 0.7 \log(\log n) \dots (3.14)$$

又は $E(w) = 3.091 (\log n)^{0.7} \dots (3.15)$ が近似式である。これで n と $E(w)$ の関係は数式として表わされたわけである。

さてこの (3.15) 式より求めた $E(w)$ と数値表に表われた値とは何程の差があるかを求めたのが第 3.6 表である。(第 3.1 表参照のこと)

即ち実用発火数 $n=5 \sim 100$ 位では (3.15) なる近似式で充分であるとして差支えなからう。

然らば (3.15) 式を (3.11) 式の τ/σ に代入して

$$i^2 = 3.091 (\log n)^{0.7} + \tau \dots (3.16)$$

を得る。この式は発火個数 n と平均限界点火電流値 i の関係を示す一般式である。も、 r に (3.12) (3.13) 式を代入すれば

$$i^2 = 3.091 (\log n)^{0.7} A\alpha/r + B/r \dots (3.16)'$$

を得る。

電気管の特性値 A, α, r, τ, B は実測可能であるから (3.16)' 式より平均限界点火電流値 i と発火個数 n との関係は計算出来る。これより第 III 章第 1 節で図式的に求めた第 3.4 表の試料 No. 1, No. 2 についての平均点火電流値と発火個数の関係が計算的に求められることになる。猶試料 No. 3 についての計算を行うには第 (1.6) 式即ち $\tau = 1.59i^{-0.3}$ の値を (3.16)' に代入して得た

$$i^2 = 3.091 (\log n)^{0.7} \frac{A\alpha}{r 1.59i^{-0.3}} + \frac{B}{r} \dots (3.16)''$$

を計算すれば第 3.4 表の試料 No. 3 についての平均点火電流値と発火個数の関係は計算で求められることに

第 3.6 表

n		2	3	4	5	10	20	50	100	1000
$E(w)$	数値表 (3.1表)	1,128	1,693	2,059	2,326	3,078	3,735	4,498	5,015	6,483
	計算値	(1,333)	(1,841)	(2,166)	2,445	3,091	3,717	4,479	5,020	6,667

なる。

次に(3.16)'と(3.8)式より i を消去して交点座標のうち n についてのものを求めれば、或る電源を使つたときの発破限界係数 n が求められることになる。今簡単のために(3.8)式の R 及び R_w を零として電橋部分についてのみ考えることにする。すると、

$$V^2 = r \left\{ n^2 (\log n)^2 \cdot \frac{A\alpha}{\tau} \times 3.091 + n^2 B \right\} \dots (3.17)$$

を得る。

この式の V, r, A, τ, B, α は何れも実測により求められることは第1章に述べた通りであるから n も計算出来ることになる。猶 A, B, r, α, τ については第4章で述べることにする。

又発破個数を多くするためには即ち同一電源を使用し n を大にするには、左辺 V^2 は一定なので A, B, α, r は小で τ が大なることが必要条件となる。

試料 No. 1 について第1章で得た値即ち第1.4表第3.3表の $A=0.0029$ Joule, $B=0.09$ Joule/sec, $r=1.2\Omega$, $\tau=0.0016$ sec, $\alpha=0.075$ なる数値を用い $V=35$ ボルトについて(3.17)式を用い計算すると $n=40$ となりグラフより得た値、即ち第3.5表No.1の値とよく一致している。

即ち実測の計算はグラフで充分であるが(3.17)式を誘導した目的は発破個数 n に影響を与える因子が何であるかを知る為であつた。そしてその因子は A, B, τ, α, r であることが明らかとなつた。従つて電気雷管の設計を行う場合発破特性の面から考察するときは如何なる因子を考えればよいかを判明したわけで、従来経験並びに実験を基礎として居つた弱点が解決されることになるわけである。

第4章 電気雷管の特性を表わす要因 A, B, r, α, τ について

前章に於いて電気雷管の発火特性に影響を与える要因は A, B, r, α, τ であることが判明した。故に電気雷管の設計を行う場合はこれらの要因につき検討を行わねばならぬことになる。従つてこれらの要因が如何なるものであるかを究明することは電気雷管を合理的に設計する場合に必要となるわけである。換言すればこれらの要因を究めれば従来経験並びに実験的に設計して居つた電気雷管も合理的に設計されることになるわけである。

4.1) A について及び点火薬の発火温度について

A は第1章(1.5)式に述べたる如く電橋に保持されるエネルギーを表わし

$$A = C(T - T_0) \dots (1.5)$$

と表わされる。 C は電橋の熱容量で次式で表わされる

$$C = l \rho a k \dots (4.1)$$

ここに

l : 電橋の長さ

a : 電橋の断面積

d : 電橋の比重

k : 電橋の比熱

である。

今試料 No. 1 について(1.5)及び(4.1)式を用いて点火薬の発火温度を計算してみる。 $l=1.64 \times 10^{-1}$ cm, $a=1.19 \times 10^{-6}$ cm², $d=8.4$, $k=0.12$ より $C=1.98 \times 10^{-6}$ cal/°Cを得る。

さて A は第1.4表より0.0029 Jouleであるからcalに換算すると $A=0.69 \times 10^{-6}$ calとなる。従つて(1.5)式より $T - T_0 = 346^\circ\text{C}$ を得る。即ち $T_0 = 20^\circ\text{C}$ とすると $T = 366^\circ\text{C}$ となる。猶点火薬の発火点は点火薬に固有のものでなく点火薬の量、加熱速度、容器の形状等により異なることはよく知られている通りである¹⁹⁾。

4.2) B について

B は電橋よりの熱損失を表わす項であることは既述の通りであるが、これは電橋の末端へ逃げるもの(end effect)と側面へ逃げるもの(lateral effect)に分けられる。

先づ末端へ逃げるものについて考えてみる。今電橋の中央部が点火薬の発火点 T に達した場合も電橋の両端の温度は最初の温度 T_0 という仮定をする。電橋の熱伝導率を λ 、断面積を a とすれば単位時間当り電橋の両端へ逃げる熱量 H は次式で表わされる。

$$H = 2\lambda_1 a \frac{T - T_0}{l} = 4\lambda_1 a \frac{T - T_0}{2} \dots (4.2)$$

然し電橋の中央部分では長さの方向への温度勾配は極めて小さい¹⁶⁾、又電気雷管の電橋では長さは直径に比較すると極めて大であるから(4.2)式の成立しない部分が大部分となる。従つて(4.2)式が成立する部分の電橋の長さ l' は両端に近い極く短い部分ということになる。従つて実際の電気雷管についてはJones氏の述べている通り末端への熱損失は電橋の断面積、熱伝導率、点火薬の発火温度一定ならば電橋の長さには無関係で一定として差支ない。

次に側面への熱損失について考えてみる。点火薬を塗布した電橋を軸に直角に切断した横断面第4.1図を考える。電橋より点火薬に単位時間に移動する熱量 q は次式で表わされる¹⁷⁾¹⁸⁾。

$$q = \frac{T - T_0}{L_1} \dots (4.3)$$

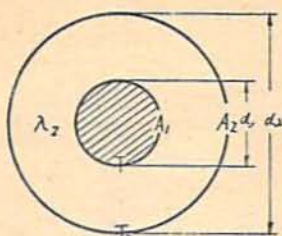
ここに

$$L_1 = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$$

$$A_{av} = \frac{A_2 - A_1}{2.3 \log \frac{A_2}{A_1}}$$

$$A_1 = \pi d_1 l$$

$$A_2 = \pi d_2 l$$



第 4.1 図

であり d_1 は電橋の直径 d_2 は点火玉の直径、 A_1 は電橋の表面積、 A_2 は点火玉の表面積、 l は電橋の長さ、 T は電橋の温度、 T_0 は点火玉の外面の温度を表わし最初の温度と同一とする。又 λ_2 は T, T_0 間の点火薬の平均熱伝導率を表わしている。

従つて (4.3) 式は

$$q = \frac{(T - T_0) 2\pi \lambda_2}{2.3 \log \frac{d_2}{d_1}}$$

となり電橋の直径 d_1 、点火玉の直径 d_2 、点火薬の発火温度 $(T - T_0)$ 及び熱伝導率 λ_2 が一定ならば l に比例する値となる。即ち

$$J = \frac{(T - T_0) 2\pi \lambda_2}{2.3 \log \frac{d_2}{d_1}} \dots (4.4)$$

と置けば

$$q = J l \dots (4.5)$$

となる。

従つて (4.2) 式及び (4.5) 式を綜合して

$$B = H + J l \dots (4.6)$$

を得る。

即ち単位時間当り電橋から失われる熱量は電橋の長さに関係ない項と長さに比例する項とに分けられる。

4.3) r について

電橋の長さを l 、断面積を a 、比抵抗を ρ とすれば

$$r = \rho \frac{l}{a} \dots (4.7)$$

と表わされる。

4.4) α について

α は (1.1) 式に述べた如く

$$\sigma_e = \alpha t \dots (1.1)$$

であり σ_e は点火電流一定の時の点火時間の標準偏差を表わし、 t は平均点火時間を表わしている。そしてこの値は実験の結果同一種の電気雷管については点火電流値の大小に拘わらず一定である。このことは第 I 章第 2 節に述べた通りである。

さてこの α は電橋の直径、長さ等のバラツキ、点火玉と電橋との接触状況のバラツキ等の要因により支配される値である。

4.5) τ について

τ は第 I 章第 4 節に述べた如く点爆時間を表わしている。既に述べた如く電橋に電流が流れると或る時間後に点火薬が発火するが、この時はまだ雷管は爆発しないで或る時間遅れてから爆発する。この点火薬が発火してから爆発する迄の時間を点爆時間と称して居る。従つて点爆時間を左右する要因のうち最大なものは点火薬の種類であろう。又点火玉の大きさ、コーティングの有無及びその特性も影響を及ぼす要因であろう。又点火玉と爆粉の距離も点爆時間に影響を与える。即ちチニトロソルソルシ鉛を点火玉として、点火玉と爆粉の距離を変化させたときの電橋切断時間 (t_b) の値は次の通りであつた。

第 4.1 表

点火電流 0.75 アンペア	点火玉と爆粉との距離 (mm)				
	2	9	17	27	67
t_b	9.5	9.3	11.2	12.5	不着火

又点火電流値が大となるに従い τ の値は小となることは第 I 章に述べた通りであり、或る試料についてはその関係は $\tau = 1.59i^{-0.3}$ であることは既に述べた。

第 V 章 斉発発火感度を表わす特性について

電気雷管による発破と導火線付雷管による発破とを比較するときは各種の利点、欠点が数えられるが、電気発破の特長の一つとして多数斉発々破を安全確実に行えるという利点がある。

故に電気雷管を設計する場合はなるべく斉発性のよいものとすべきであらう。

今電圧 V なる電源を利用したとき斉発個数 n と A, B, r, α, τ との関係は

$$V^2 = r \{ n^2 (\log n)^{0.7} \frac{A \alpha}{\tau} \times 3.091 + n^2 B \} \dots (3.17)$$

で表わされることを第 III 章において述べた。

故に電源 V を一定とした場合即ち一定の電源を使用した場合に斉発個数即ち n の値を大にするには r, A, α, B を小にして τ を大にすればよいことが分る。

そこで第 IV 章で求めたこれらの値を (3.17) 式右辺に代入して計算を行えば

$$V^2 = \rho \frac{l}{a} n^2 (T - T_0)$$

$$\left\{ (\log n)^{0.7} \frac{l a d k \alpha}{\tau} \times 3.091 + 4 \lambda_1 \frac{a}{l} + \frac{2 \pi l \lambda_2}{2.3 \log \frac{d_2}{d_1}} \right\} \dots \dots \dots (5.1)$$

を得る。これで発破個数 n と点火薬の発火温度 ($T - T_0$)、点火時間に関係ある常数 α 、点爆時間 τ 、電橋の比抵抗 ρ 、長さ l 、比重 d 、比熱 k 、断面積 a (直径 d_1)、熱伝導率 λ_1 、点火玉の熱伝導率 λ_2 及び点火玉の直径 d_2 等との関係が求められたことになる。

今電橋の比抵抗 ρ 、比重 d 、比熱 k 、断面積 a (直径 d_1)、熱伝導率 λ_1 及び点火玉の直径 d_2 が同一の場合について (5.1) 式を考察すると

$$V^2 = K_1 l n^2 (T - T_0) \left\{ K_2 (\log n)^{0.7} \frac{l \alpha}{\tau} + K_3 + K_4 l \lambda_2 \right\} \dots \dots \dots (5.1)'$$

となる。ここに K_1, K_2, K_3, K_4 は常数である。故に (5.1)' 式より発破個数 n を大にするには

- i) 点火薬の発火点 (T) が低くその熱伝導率 λ_2 の小なるもの (T_0 は室温)
- ii) 点火時間の標準偏差と平均点火時間に関係ある常数 α の小なるもの
- iii) 点爆時間 (τ) の大なるもの
- iv) 電橋の長さ (l) の短いもの

を使用すれば発破個数 n を大にすることが出来ることが分つた。この結果は我々が電気雷管を経験的に設計して居つたときの常識と大体一致する結果である。

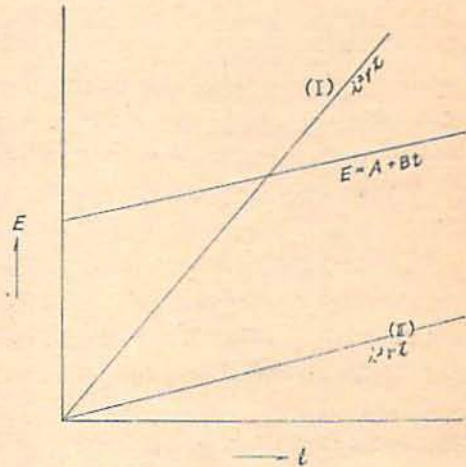
然し以上の条件のうち電橋の長さ l は短かければ短い程よいかというそうではない。即ち電気雷管は発破個数のみに注目して設計出来ないわけで後章で述べる単発々火感度も考慮しなければならないからである。

第VII章 単発発火感度を表わす特性について

第V章では発破個数の観点から A, B, α, τ 等の条件を考察した。電気雷管は単発で使用する場合も極めて多いので充分なる単発発火感度を具備していなければならない。即ち例えば 0.45 アンペアの電流にて発火すべきことといった様な規格に合格するには如何なる条件を満足し

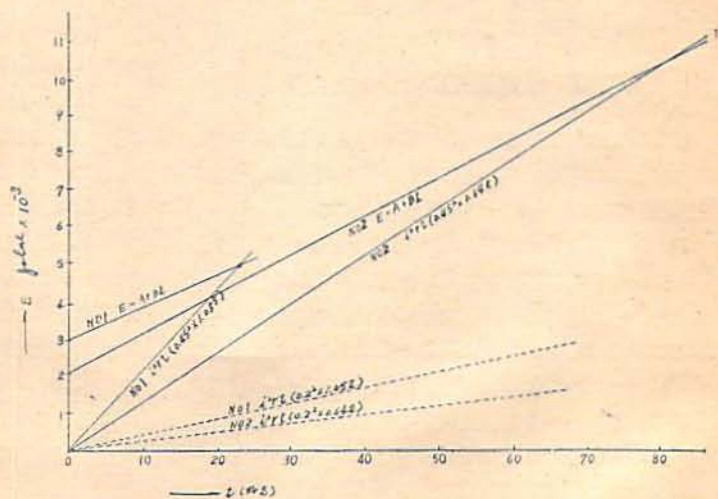
たらよいか問題となる。

電気雷管一個を発火させるに要するエネルギー (E) は $E = A + Bt$ で表わされ、そのグラフは第 6.1 図の如くなることは既述の通りである。さて次に電気雷管一個の電橋抵抗を r とすると t 時間に i なる電流が供給するエネルギーは $i^2 t$ である。この両者の関係をグラフに書いたものが第 6.1 図である。さて上に述べた規格即ち 0.45 アンペアの電流で発火するという事は $E = A + Bt$ なる電気雷管の臨界点火エネルギーを表わ



第 6.1 図

す直線と $E = i^2 t = (0.45)^2 t$ なる直線とが交わることである。即ち第 6.1 図 (I) の場合である。然るに (II) の直線の如くこの両者が交わらない時は発火は起らないことになり規格に不合格ということになる。以上述べた条件を式で表わせば



第 6.2 図

$$i_r > B$$

となる。これに $r = \frac{l}{a} B = H + JI$ を代入して計算すれば

$$I > \frac{H}{i_r \frac{l}{a} - J} \dots \dots \dots (6.1)$$

を得る。即ち電橋の長さ l は (6.1) 式の右辺よりも長くなければ単発々火不能となるわけである。

例えば第3.3表に述べた試料 No.1 及び No.2 について 0.45 アンペアの単発々火感度規格を満足するかどうかを計算してみる。電橋抵抗の偏差は ± 0.1 オームであるから最小抵抗値は試料 No.1 で 1.05 オーム、試料 No.2 で 0.64 オームとなる。即ち i_r の値は試料 No.1 で 0.21 Joule/sec, 試料 No.2 で 0.13 Joule/sec となる。然るに第1.4表から試料 No.1 の B は 0.09 Joule/sec, No.2 は 0.10 Joule/sec であるから試料 No.1 は No.2 より単発々火感度良好なることを示している。即ちこれらの関係をグラフにすれば第6.2図となり、No.1 は 24ms で発火し、No.2 は 84ms で発火することを示している。即ち試料 No.2 は単発々火感度悪いことを示している。

このことは第III章第2節に述べた如く英国の代表的電気雷管と推察されるものが案外公差数が少ないのは単発々火感度に充分なる考慮を払ったためであろう。即ち試料 No.2 の電気雷管は発火感度のみを向上させんとする実験的成果から生み出されたものであり、単発々火特性は全然考慮されていなかったため単発々火感度規格として「0.45 アンペアを通過して発火すること」という規格を要求される場合には不合格となる場合が生ずるわけである。

第七章 迷走電流に対する安全性

第VI章で述べた如く電気雷管は単発々火感度も充分でなければならないが、余り単発々火感度を良くすると迷走電流により発火する危険性が生ずる。

Du Pont Blasters' Handbook¹¹⁾ によれば迷走電流とは電池、発電機、変圧器等の電源から電線を伝つてモーター、電灯等へ流れ出た電流は必ず何等かの方法によりまたもとの電源に戻るものであり、これらの通路はケーブルの様に大地から絶縁された導体の場合もあり、又レールのように大地から絶縁されていない場合もある。前者の場合でも絶縁が悪い時は迷走電流の原因となるが、後者の場合が迷走電流の主原因となると述べている。そしてレール、パイプ、風管、地面等

の間に 0.15 アンペア、0.15 乃至 0.3 ボルト以上の電流電圧が検知されることがあるそうである。平松教授¹²⁾ 等の実測値によれば某金属鉱山に於いての調査によれば鉱体の付近では電圧 500 ミリボルト程度、電流 1~30 ミリアンペア程度、それ以外のところでは電圧数十乃至 200 ミリボルト程度、電流 0~20 ミリアンペア程度の直流電圧電流があることを確認されている。

迷走電流検知器も市販されて居り、例えば Du Pont "Detect-A-Meter" もその一つである。

我國の JIS には迷走電流に対する規格は無いが独自の規格¹³⁾ では 0.18 アンペアの電流で 5 分間に爆発しないこととなつて居り、米軍規格によれば 0.2 アンペアの電流で 5 秒間に爆発しないこととなつている。

さて以上の如き迷走電流に対する規格は如何なる条件を満たした電気雷管に於いて可能であるかは従来何等理論的に究明されて居らず、ただ実験によつて確めて居つた程度である。筆者はこの問題を次の如く解いた。

今例えば 0.2 アンペアの電流にて発火しないこととすることを考えてみる。これは前提第6.2図に於いて $E = A + Bt$ なる直線と $E = i_r t = 0.2 i_r t$ なる直線が交わらなければよいわけであり、この関係は第6.2図に点線で示してある。即ちこれらの直線は $E = A + Bt$ の直線と交わらないので迷走電流に対しては両者とも安全である。

數式的には第VI章で述べたと全く同じ考え方でよいわけであり、不等号の向きだけが反対となればよい、即ち

$$i_r < B$$

が迷走電流 (i_r) に対して安全である条件となる。

文 献

- (1) 乃至 (11) は第一報参照のこと。
- (12) 岡崎一正: 工火誌 10, 4 (昭 25.3)
- (13) 北川敏男, 増山元三郎: 新編統計数値表第36表
- (14) Paul G. Hoel: Introduction to Mathematical Statistics., 田口玄一訳 186~7
- (15) F. P. Bowden and A. D. Yoffe: The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids., (1952)
- (16) 眞島正市外: 応用物理学実験 122
- (17) 内田俊一外: 化学工学 90
- (18) Mc Adams: Heat Transmission
- (19) 京都大学鉱山学教室, 日本化薬株式会社: (昭 26.8.30)
- (20) 日化仁研 (昭 28.4.6) 未発表