

## 報 文

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ての研究

(第一報)

(昭和29年4月20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)

## 緒 論

電気雷管の点火頭を発火させるに必要なエネルギーに就ては Dreko<sup>1)</sup>氏は点火電流 ( $I$ ) と点火時間 ( $t$ ) との間には  $I^2t = K$  なる関係があると発表した。この式が実験値と合わないことは今日では良く知られて居る。即ち日野<sup>2)</sup>氏は理論的に又竹中<sup>3)</sup>氏は各種点火薬につき実測値より  $1/I^2$  と  $t$  との関係を図示したが、之が Dreko<sup>1)</sup> 氏の言う如く直線にならぬことを報告して居る。1948年に Elwyn Jones 氏と H. P. Stout<sup>4)</sup>氏は電気雷管の発火に要するエネルギー ( $E$ ) と点火時間 ( $t$ ) との間には  $E = A + Bt$  なる関係あることを発表した。更に同氏等は客発の問題を推計学的見地より解明し発火電流が客発個数とともに上昇することを述べ、計算値と実測値がよく適合することを示した。

即ち Jones 氏及び Stout 氏により客発の問題も明瞭になつて来た。従つて或る電源を使用した時最大何個迄客発可能であるかは従来の如き簡単な方法で計算され得ないことも明らかとなつた。

さて電気雷管の客発に就ては Dreko<sup>1)</sup>氏は第Ⅱ章に述べる如く点火時間、点爆時間、電橋切断時間というものを考えることにより客発発火の場合は限界電流値というものがあることを発表した。故に客発発火の場合はこの限界電流値以上の電流を通ずる必要があると述べて居る。然し Dreko<sup>1)</sup>氏は確率的な考慮を払つて研究を行なかつたので客発個数の如何に拘わらず限界電流値は一定であるという結論を出したのである。これは上述の通り誤りであることは認められている。

又 1948年には W. Taylor 氏と G. R. L. Hall 氏<sup>5)</sup>、1950年には G. Allsop 氏と E. M. Guenault 氏<sup>6)</sup>

もそれぞれ客発発火の場合はその発火に要する電流は単発発火の場合より大であり然も客発個数が増加するに従い次第に大となることを述べた。即ち客発の問題を論ずる際は従来の如き簡単な考え方は許されないことが明らかとなつた。

又一方実用的に客発の問題を取扱つたものには各社のパンフレット其他発破参考書等に見られるが何れも理論的には極めて粗雑な基礎にたつたものと言わざるを得ない。即ち単発発火に要する電流値と使用電源の容量を基準にして計算する如き方法とか、或は直列結線の場合は供給する電流を最低 1.5 アンペアとせよといった程度のものである<sup>7)</sup>。

さて上述の如く客発個数と平均点火電流値の関係が分つても実際問題と関連ある問題、例えば或る容量の電源を使用した時最大何個の電気雷管を客発させ得るか、又  $E = A + Bt$  なる式は客発個数と何か関連ある式であるか、又客発個数は如何なる条件を満たせば向上するか等の研究は行われていない。

そこで筆者は第Ⅰ章に於て電気雷管を発火させるに必要な点火時間及び点火エネルギー、点爆時間等を求めた結果 Jones 氏の言う  $E = A + Bt$  なる式が適合することを確認した。第Ⅱ章、第Ⅲ章に於て推計学的考察を基礎として客発の問題を論じ客発個数が増加するに従い発火電流が大なることを図計算並びに数式的に導いた。Jones 氏の研究には数式的な考察は見られないが筆者の求めた数式には電気雷管の特性を表わす因子が入つて居るので実際問題に適応した議論を行へるわけである。又或る電源を使用した時最大何個迄客発可能であるかを数式的並びに図計算で求めた。

第Ⅳ章に於て電気雷管の特性を表わす要因に就て論じ、第Ⅴ章に於てこれらの要因が電気雷管の客発発火感度に如何なる影響を与えるかを求め、客発性から考



えた場合の電気雷管の設計基準を明らかにした。更に第Ⅵ章に於てこれらの要因が電気雷管の単発発火感度に如何なる影響を与えるかを求め、単発々火感度から考えた場合の設計基準を明らかにした。次に第Ⅶ章に於て迷走電流に對し安全を確保するためには電気雷管は如何なる條件を満足すべきかを論じた。以上第Ⅳ章より第Ⅶ章により電気雷管の設計基準が數式的に求められたわけである。

次に第Ⅷ章に於て電気雷管の特性及び高発個数とともに点火電流値も上昇するという点を考慮に入れてコンデンサー式発破器の設計基準を導いた。その結果メタン瓦斯に對する安全度を問題とする炭鉱用コンデンサー式発破器は電圧を増し電流容量を小とすべきこと、又無危険用の大発破用コンデンサー式発破器は電氣容量大なるものが有利であるという結論を導いた。

又第Ⅷ章に於て各種結線法による電気発破の一般解を導き直列結線、並列結線、直並列結線の長所短所につき述べ、ダイナモ式発破器又は電池を使用した場合は直列結線で使用することを建前とすべきこと並びに大容量の電源を使用して大発破をする時は直並列結線は有利であり、又コンデンサー式発破器を使用する場合もコンデンサーの容量によつては直並列結線が有利な場合もあるが、原則としては直列結線で使用するべきであるという結論を導いた。

## 第Ⅰ章 電気雷管の点火時間、点火エネルギー及び点爆時間に就て

電気雷管の点火エネルギーが Drekopf 氏<sup>1)</sup>の述べた如く  $I^2t = K$  と表わされるものであるか、或は最近 Elwyn Jones 氏<sup>2)</sup>等の述べた如く  $E = A + Bt$  と表わされるものであるか、或は他の式で表わされるものであるかを究明することは電気雷管に就ての研究の基礎となるものであるから筆者は先づこの基礎実験を行うことにした。手法の詳細に就ては以下述べる通りであるが、すべて推計学的手法を基準として実験並びに理論を進めることにした。

### 1.1) 試料

点火玉の構造は第1.1図の如く Stay 式と Bead 式とを用いた。



Stay 式 Bead 式

第 1.1 図

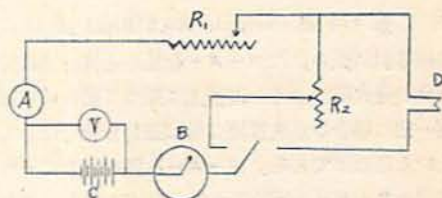
点火薬は第1薬としてゼニトロンゾルシン鉛、第2薬としてロマン鉛と塩素酸カリの等量混合物を使用した。電橋は第1.1表の如きものを使用した。

第 1.1 表

No.	点火部の構造	材料	直徑 $\times 10^{-2}$ /m/m	長さ m/m	抵抗 $\Omega$
1	Stay 式	Ni Cr	3.9	1.11~1.11	1.1 $\pm$ 0.1
2	Bead 式	Pt Ir	3.0	1.11~1.11	0.7 $\pm$ 0.1

### 1.2) 点火時間の測定

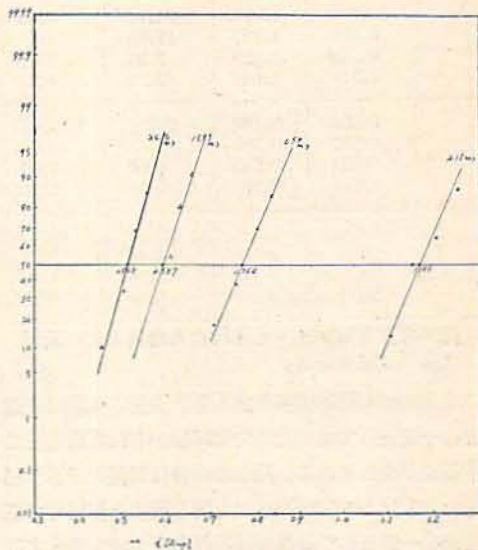
第1.2図の如き回路を有する点火時間測定器を用い、通電時間を一定として点火電流を点火玉が50%発火する上下で少し宛移動させ4点測定する。一点に使用する試料数は40個である。各通電電流に對する発火率を確率紙にプロットし通電時間に對する平均点火電流値を求める。猶通電時間を正確に知るためにオッシュログラフと点火時間測定器を連動させて測定した。



A : アンメーター R<sub>1</sub> : 外部抵抗  
B : 回転開盤 R<sub>2</sub> : 電橋と同じ大きさの抵抗  
C : 電池 V : ヴォルトメーター  
D : 電橋

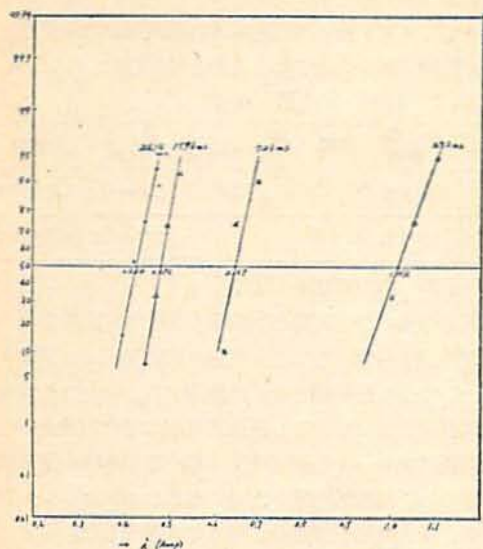
第 1.2 図

この方法により前記試料合計 1,280 個を使用して次に掲げる確率紙を得た。



第 1.3 図 Sample No 1 Stay 式





第1.4図 Sample No.2 Bead 式

この確率紙に表われたデータを見ると同一通電時間の場合の発火率はよく一直線に乗って居るので通電時間一定の場合の点火電流の値は正規分布をなしているといえるわけである。データを羅め、また  $\sigma_e$  より臨界エネルギーを求めると第1.2表を得る。猶参考のために試料 No.3 として Jones 氏の発表したデータ<sup>7)</sup>を記す。

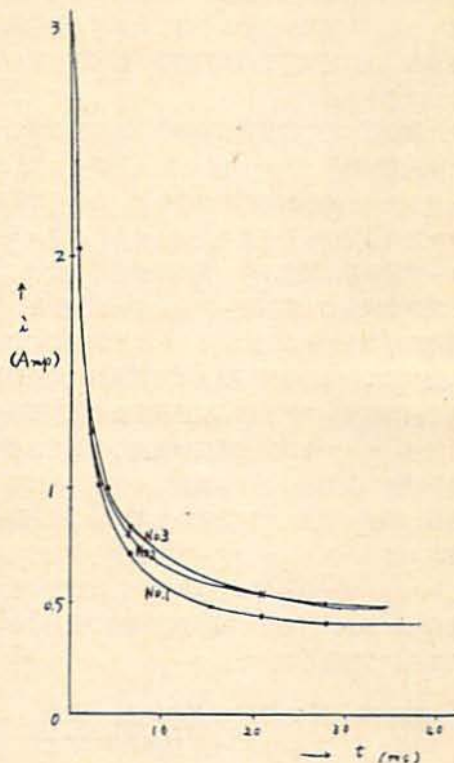
第1.2表

試料	平均点火電流 $i$ (A)	電橋平均抵抗 $r$ ( $\Omega$ )	平均点火時間 $t$ (ms)	臨界点火エネルギー $E$ (Joule)
No.1	0.430	1.153	24.14	5.14
	0.484	1.157	15.96	4.31
	0.648	1.157	7.23	3.51
	1.014	1.144	2.72	3.20
No.2	0.508	0.749	24.16	4.67
	0.587	0.750	15.85	4.09
	0.764	0.733	6.58	2.82
	1.166	0.751	2.18	2.22
No.3 (Jones 氏)	0.5	1.4	23.33	8.17
	0.8	〃	6.44	5.77
	1.0	〃	3.86	5.40
	2.0	〃	1.14	6.38

\* 猶平均点火電流値  $i$  と平均点火時間  $t$  との関係は第1.5図となる。

次に点火時間の標準偏差を求める。上記の実験は通電時間を一定として求めたので確率紙からは点火電流の標準偏差が求められる。然しこの値は以後の計算に必要無いので第1.2図で述べたと同じ装置を使用して点火電流を一定として通電時間を点火玉が50%発火する上下で少し宛移動させて4点測定する。各通電時間に

対する発火率を確率紙にプロットすると第1.6図及び第1.7図を得る。この確率紙上に得た直線より推計学の教えるところにより点火時間の平均値及び標準偏差が求められる。その値は第1.3表の通りである。



第1.5図

この結果を  $\sigma_e$  と  $t$  についてグラフにプロットすれば第1.8図を得る。

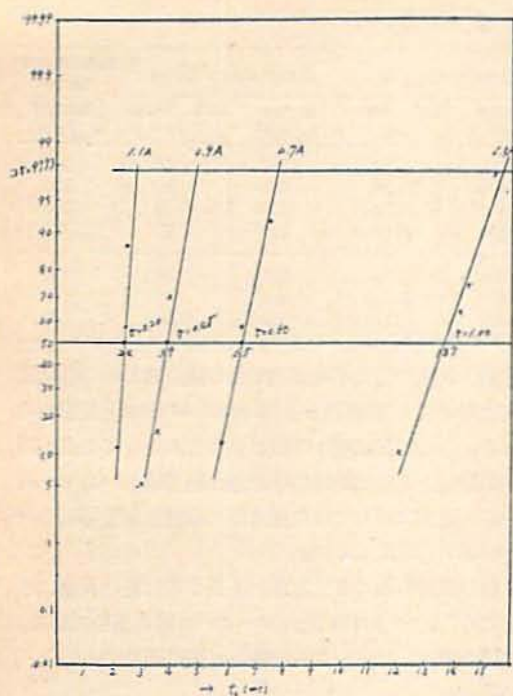
さて電気雷管の平均点火時間  $\bar{t}$  (Mean<sup>7)</sup> excitation time)  $t$  とその時の点火時間の標準偏差  $\sigma_e$  の間には

第1.3表

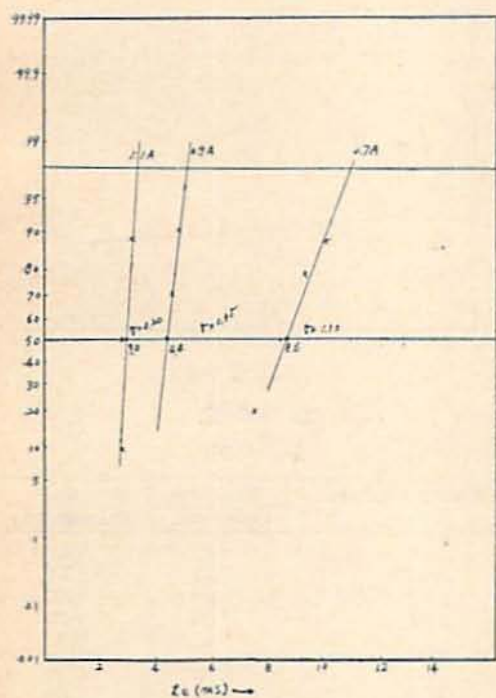
試料	点火電流 $A$	点火時間	
		平均値 $t$ (ms)	標準偏差 $\sigma_e$ (ms)
No.1	0.5	13.7	1.00
	0.7	6.5	0.60
	0.9	3.9	0.45
	1.1	2.4	0.20
No.2	0.7	8.6	1.10
	0.9	4.4	0.35
	1.1	3.0	0.20

$$\sigma_e = at \dots\dots\dots (1.1)$$

$$a = \text{const.}$$

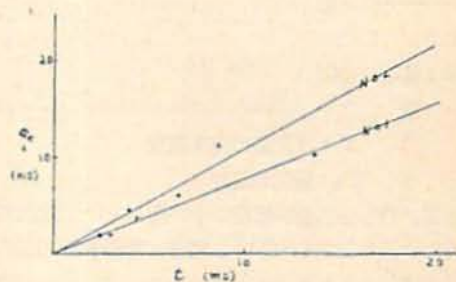


第 1.6 図 Sample No.1 Stay 式



第 1.7 図 Sample No.2 Bead 式

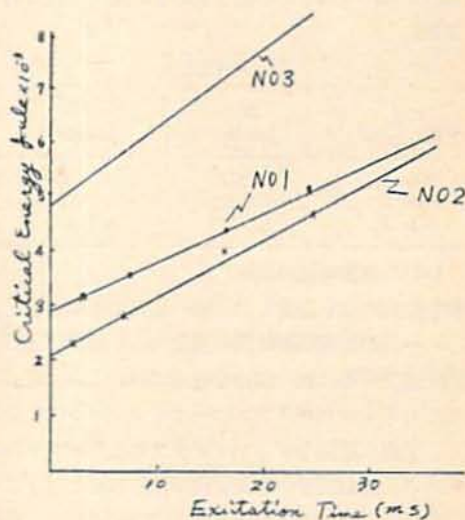
なる関係が成立することを Jones 氏は認めて居り同氏の使用した電気雷管について  $\sigma_e = 0.075t$  であると述べている。そこで第 1.8 図のグラフよりこの  $\alpha$  の値を求めると試料 No.1 に就て 0.075, 試料 No.2 に就て 0.11 を得る。この値を使用して後掲の第 1.5 表中の点火時間の標準偏差  $\sigma_e$  を算出した。



第 1.8 図

### 1.3) 電気雷管の臨界点火エネルギー

第 1.2 表に得られた点火電流  $i$ , 抵抗  $r$ , 点火時間  $t$  より点火に要したエネルギー即ち  $rit$  を求めたものが第 1.2 表末項の臨界点火エネルギーである。これを  $E-t$  なるグラフにプロットしたものは第 1.9 図である。即ち各実測値はよく一直線をなして居る。即ち Drekopf 氏の述べた如く  $It=K$  なる関係は全然成立しない結果となつた。



第 1.9 図

Elwyn Jones 氏<sup>2)</sup> の研究によれば電気雷管の抵抗を  $r$ , 点火電流を  $i$ , 点火時間を  $t$  とすれば電橋中に



発生する熱量は

$i^2rt$ である。これが全部電橋の中に保持されるとする

と  
 $i^2rt = C(T - T_0)$   
 ……………(1.2)

となる。ここに  
 $C$ : 電橋の熱容量

$T$ : 点火薬の発火温度

$T_0$ : 最初の温度

である。然し全熱量が電橋の中に残るという仮定は正しくない。そこで(1.2)式の右辺に電橋中より逃げる熱量を表わす $X$ を入れるべきである。即ち(1.2)式は

$$i^2rt = C(T - T_0) + X \dots\dots\dots(1.3)$$

となる。さて $C$ 一定、即ち電橋の材質、直径、長さ一定の場合に就て考えると(1.3)式は

$$E = A + Bt \dots\dots\dots(1.4)$$

となる。なんとなれば(1.3)式の右辺第1項は $C$ 一定にして点火薬の発火温度一定なれば

$$C(T - T_0) = \text{const} = A \dots\dots\dots(1.5)$$

となり $X$ は通電時間大なれば大なる程大となるからである。

さて第1.9図は(1.4)式が成立することを示すものでこれから、 $A$ 及び $B$ の値を求めると第1.4表の通りになる。

第1.4表

試料	A Joule	B Joule/sec
No. 1	0.0029	0.09
No. 2	0.0021	0.10
No. 3	0.0049	0.14

#### 1.4) 点爆時間の測定

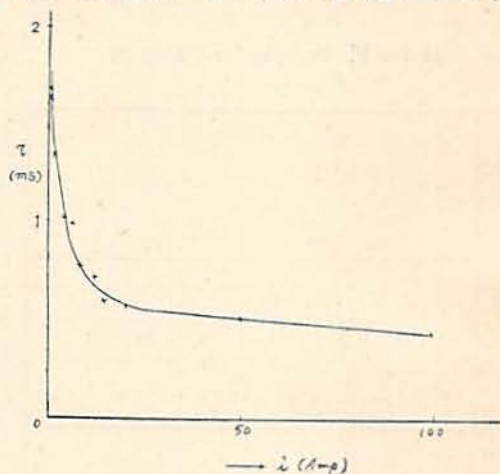
前記点火時間を測定したと同一種目の電気雷管を使用し、一個宛電橋切断時間を測定する。測定方法は雷管添装薬部外側に細い銅線を巻きつけ、これに電圧をかけておきオッシログラフの一つのエレメントに接続する。又点火電流をオッシログラフの他のエレメントに入れる。電気雷管に点火電流を流しなすと流通開始した点はオッシログラムに記録される。電流流通後ある時間経過してから爆発するので管体に巻きつけた銅線は切断されオッシログラム上に記録される。これより平均電橋切断時間( $t_b$ )及び切断時間の分散( $\sigma_b$ )が求められる。かくして得た平均電橋切断時間

第1.5表

Sample	Firing Current (A)	Resistance of Detonator ( $\Omega$ )	Bursting time		Excitation time		Reaction time (mean) $\tau$ (ms)
			mean $t_b$ (ms)	Std. Dev. $\sigma_b$	mean $t_e$ (ms)	Std. Dev. $\sigma_e$	
No. 1	0.5	1.2	15.9	1.34	13.7	1.00	2.2
	0.7	1.2	8.5	0.59	6.5	0.60	2.0
	0.9	1.2	5.9	0.22	3.9	0.45	2.0
	1.1	1.2	5.4	0.19	2.4	0.20	3.0
No. 2	0.7	0.8	10.0	0.73	8.6	1.10	1.4
	0.9	0.8	6.0	0.93	4.4	0.35	1.6
	1.1	0.8	4.9	0.11	3.0	0.20	1.9

と第1.2表で得た平均点火時間の差を求めれば各電流値に対する点爆時間( $\tau$ ) (Reaction time) が求められる。この結果は第1.5表の通りである。即ち点火時間の分散と電橋切断時間の分散は殆ど等しいので、同一点火電流に対しては点爆時間の分散は殆ど零即ち $\tau = \text{const}$ と考えてよい。

然し点爆時間は点火電流が上昇するに従い次第に小となることは Jones 氏のデーターにある通りである。同氏の発表したデーターは第1.6表の通りである。



第1.10図

第1.6表

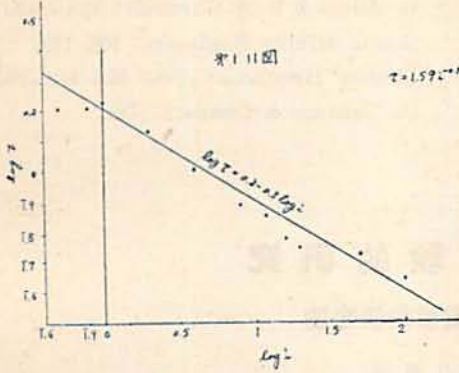
Firing Current (Amp)	Reaction Time (ms)	
	Observed	Calculated
0.5	1.62	1.97
0.8	1.62	1.69
1.0	1.69	1.60
2.0	1.34	1.30
4.0	1.01	1.05
6.0	0.98	0.94
8.0	0.77	0.85
12.0	0.71	0.75
16	0.59	0.69
20	0.56	0.64
50	0.52	0.50
100	0.43	0.40



これより  $\tau = f(i)$  と表わされるわけであるが (第1・10 図), その結果は  $\tau$  及び  $i$  についての対数をとることに より第 1・11 図の如くほぼ直線関係を得るので

$$\tau = 1.59i^{-0.3} \dots \dots \dots (1.6)$$

を得る。これを第 1.6 表の計算値として記載した。



第 1.11 図

以下第 III 章に於て

1. 点爆時間の分散を考えた場合
2. 電流値が定まれば点爆時間は一定即ち分散零と考 えた場合

に就て考察することにする。

### 第 II 章 電気雷管の斉発に就ての基 礎的考察

#### 2.1) 電気雷管の発火特性

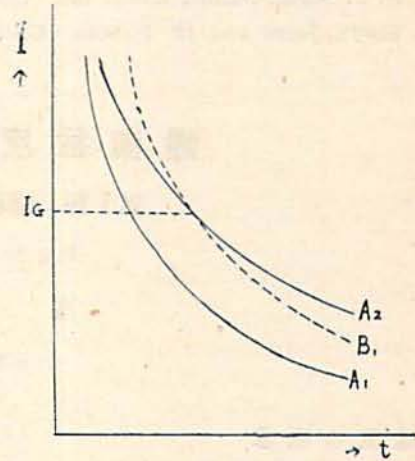
周知の如く電気雷管にある一定の電流を通じた時は 通電開始後ある時間を経過してから点火玉の点火が起 る。これを点火時間 (excitation time) と称する。次に 更にある時間遅れて雷管が爆発する。この時間を点 爆時間 (Reaction time) と称する。さてこの点火時 間、電橋切断時間は流通電流値の強弱により変化する ものであり、又同一電流値の場合でも点火時間、電橋 切断時間等はあるバラッキをもつて分布して居るので ある。

以上述べたことから単発発火の場合は問題は極めて 簡単であることが分る。即ち発火に必要な電流を流し さえすればとにかく発火は起るわけである。然し斉発 発火は簡単には論ぜられない。

#### 2.2) 電気雷管の斉発特性

以上述べたる如く電気雷管は点火時間、点爆時間と いう経過を通り爆発が起り電橋は切断されるわけであ る。今 N 個の電気雷管を直列に結線した場合を考えて みる。前節に述べたる如く電気雷管の発火特性は統計 学的なバラッキをして居るので、この N 個の電気雷管

の回路に或る電流を通じると先ずこのうち最も点火時 間短いものが発火する。これは或る点爆時間後に爆 発し、ここでこの直列回路は切断されることになる。 この直列回路が切断される前に N 個の電気雷管のうち 点火時間が最も長いものも発火していれば不発残留は 発生しないわけである。Drekopf 氏<sup>(1)</sup> もこの点につい ては述べている。即ち点火電流と点火時間につきグラ フを書くと第 2.1 図を得る。今  $A_1$  なる曲線は最も鋭



第 2.1 図

敏なる電気雷管の点火時間と電流の関係を与え  $A_2$  なる 曲線は最も鈍感なる点火時間と電流の関係を与えて いる。 $B_1$  なる曲線は最も短い電橋切断時間を与えて いる。今  $A_2$  と  $B_1$  との交点即ち  $I_G$  なる電流値以下の 電流を通した時は最も鈍感なるものは  $B_1$  なる電橋切 断時間後に点火が起ることになる。然しその時は回路 は既に切断されて居るので、そのものは不発となり残 留となるわけである。 $I_G$  なる電流値以上の電流を通 じた場合は  $A_2$  なる最鈍感な電気雷管も電橋切断時間 以前に発火して居ることとなり、従つて不発残留は生 じないことになる。この  $I_G$  なる値を Drekopf 氏は 限界電流 (Grenzstromstärke) と称して居る。即ち Drekopf 氏に依れば斉発個数の如何に拘わらず限界 電流というものは一定であると述べて居るわけである が、これは緒論にも述べた如く Jones 氏等によりそ の誤りであることが指摘された。即ち Drekopf 氏は 斉発の問題の究明に推計学的考察を行わなかつたため に実情に則しない結論を出したのである。

第 2 報以下で電気雷管斉発の問題及び其他について 述べる。

#### 文 献

- (1) Beyling Drekopf: Sprengstoffe und Zünd-



- mittel, Zwitter Teil, Die Sprengschüsse
- (2) Drekkopf: Zeit, Schiess und Sprengstoffe 30, 129(1935)
- (3) 日野篤雄: 工火協 3, 11 (昭25.12)
- (4) 竹中重夫: 日化厚研A第190号(1949~50)日本化学株式会社
- (5) Elwyn Jones: Proc. Roy. Soc. A 198, (1949)
- (6) H. P. Stout: Nature, Lond., 166, (1950)
- (7) Elwyn Jones and H. P. Stout: Colliery Engineering, October & November (1948)
- (8) W. Taylor and G.R.L. Hall: The Institution of Mining Engineers., 107, part 8.
- (9) G. Allsop & E. M. Guenault: Coll. Guard., 180 (1950) No. 4668.
- (10) G. Allsop & E. M. Guenault: The Institution of Mining Engineers., 109, 110.
- (11) Blasters' Handbook: (1952) E. I. Du' Pont De Nemours & Company (Inc)

## 爆薬猛度の実験的研究

### 第V報: 爆轟圧力の実験的決定法

(昭和29年4月20日受理)

桜井武尙

(日本油脂 武豊工場)

#### I 猛度の概念

爆薬猛度なるものの概念は、或いはエネルギーを解放する時間勾配とも、或いは直接接する物体の破壊効果に導いてはその作用効果ともとなえられ、C. E. Bichel の表式を始めとし、E. Redle, H. Kast, さらに E. Jouguet, R. Becker の理論式に至っている。またその実験的表示に於いては、現在広く Hess, Kast の方法が用いられているが、この方法と猛度そのものの概念との間には、かなりの断層が存在するもの様である。即ち、一旦これを破壊変形効果に導くとき、今のところこれらの効果については、単なる比較観察の域を脱し切れぬ破壊概念の食しさしか見出されぬからである。

従つて、破壊効果そのものの考察は簡単に許されぬものがあるが、爆薬猛度の定義をより合理的な考察の下に置き、その物理的意義を如何にして実験的に純粹に表現するかが本研究にかかる命題である。

論はやや散文的になるが、ここに一振りの刀があるとし、これが上から吊された紙片を断ち切る性能について考えてみる。その紙面から一定距離を定めて位置し、之に切りつけたとき、紙の切れた部分の長さから切れ味と言う概念を求め。然し、その紙の下方に風鎖をつけて行えばもつと切れるであろうし、さらにその重量を増加して紙が全く動かなくなつたとき、その

切断量は切れ味の鋭鈍を問わず、刀の長さや位置によつて定まる一定の値となるだろう。即ち切れ味をためすためには、ある微少の時間内に現象を止めるため、余分の時間に起る効果は逃してやる必要がある。即ち従来の猛度測定にはある時間以外の効果は逃してやり現象に介入しない様にする工夫が必ずなされている。そして、条件によつては遂に鉛牆試験の如く、ほとんど時間効果は除外して良い静的な試験にまで至る。Hess も Kast もおそらくこの切れ味の概念を以て実験を考えたであろう。然し、この切れ味の概念は確かに実験的に自然なもので何ら否定すべきものはないが、どこまでが所謂動的な時間範囲であるかは一義的に定まらず、多くの猛度の表示とは一つの断層にはままれざるを得なかつたのである。また仮に正しくその動的効果を示し得る時間が定められたとしても、それは材質によつて変り得る性質のもので、もはや猛度の概念は爆薬のみに固定して考えることは出来なくなる。

そこで、実験的に猛度を求めると言うことは、むしろ爆轟圧力そのものに着目し、それを如何にとらえるかを考えることが最も近道であり、次で切れ味に類する動的効果、又はエネルギーの解放勾配なる概念は、その条件に於ける種々の衝撃時間の巾を求めることに帰すべきである。そして前者は、明らかに爆薬に固有の値であるが、後者は材質や実験条件によつて変り得ることを前提として、一義的な意義を与えるべきでな