

curic fulminate.

Mercuric fulminate varies its sensitivities according to its crystal forms, whose microscopic photographs are shown here. Raw crystals of the salt and recrystallized ones from ammoniac solution, pyridine and water were submitted to tests of fall hammer, friction, ignition in a Krupp vessel and electric spark ignition. These tests showed that

the most sensitive crystals were recrystallized ones from a hot solution, and the raw ones were least sensitive.

On the other hand crystallographic studies by X-rays and quantitative analysis of water contained in the above crystals showed that no essential difference between those crystals was found, and no crystal water was found even in crystals deposited in water.

大電流による電気雷管の点爆について

伊藤 一郎・若岡 吉一・藤中 雄三*

1. 緒 言

電気雷管の点火に大電流を用いたときの点爆についてはすでに E. Jones¹⁾, 東島, 西²⁾らの研究が発表されている。Jones によれば電流が大きいかほどばらつきが小さくなつて好ましいとされているが, 東島, 西によれば点火電流が 2~5A のときばらつきが最小になるとされている。しかし以上のほかにわが国で現在使用されている電気雷管に対しては, 大電流を用いるとかえつてばらつきが大きくなるという意見もある。また最近ではコンデンサー式の大容量点火器が普及しててしばしば大きいピーク値をもつた電流を用いることがあるから, この点を明らかにしておくことが必要であると考へて実験を行った。

2. 実 験

実験の概要は次のようである。

6号瞬発電気雷管を静電容量の大きいコンデンサーを電源とする約 10, 16, 35, 65A の直流電流によつて点火起爆し, 電流の大きさと, 通電時間および点爆時間をそれぞれ20~30回測定した。点爆時間は管体に巻き付けた電線の切断状況から判定した。なお実験に用いた点火玉はデニトロソレゾルシン鉛, ロダン鉛, 塩素酸カリよりなつている。

一方, 別に点火玉を同様の電流を用いて大気中で発火させて, その燃焼状況の高速映画撮影を行い, それらの結果を前記の実験結果と対比して検討した。

このほか約 200A と 10A 以下の電流とについてそれぞれ数回の実験を行ったが, 100A 以上については

実験回数も少いために今後改めて検討したいと考へている。さらに 10A 以下のものについては今までに多くの実験値が発表されているので今回は単に比較のために行つたものである。

実験装置をブラウン管装置と高速度映画撮影装置とに別けて示せば, それぞれ Fig. 1, Fig. 2 の通りである。

Fig. 1 では, 通電の直前に単掃引時間軸を起動させ, 点火回路中の 0.5Ω の抵抗器の両端に点火電流に比例して現われる電圧を, 管体に巻き付けた電線を通じてブラウン管に導く。一方タイムマーク用の 10kC

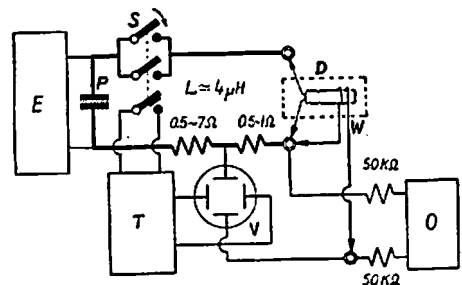


Fig. 1 Igniting and recording circuit

- D: Detonator sample
- E: Stabilized d. c. power supply (100~200V)
- O: Time mark oscillator (1 KC/s)
- P: Igniting source capacitor (1,500μF)
- S: Specially treated ganged switch
- T: Single sweep generator
- V: Cathode-ray tube (type 5ABP11, post accelerated)
- W: Bound wire to measure the time to detonation

昭和35年7月22日受理

* 京都大学工学部

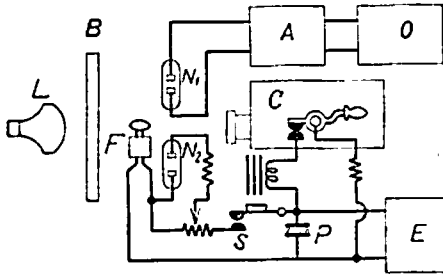


Fig. 2 The line-up of high speed photographing instruments

- A: Time mark shaping amplifier
- B: Frost glass background
- C: High speed cine-camera (16mm)
- E: Stabilized d. c. power supply
- F: Fuse-head sample
- L: Background illuminator
- N₁: Time marking neon bulb
- N₂: Shot marking neon bulb
- O: Time mark oscillator (1KC/s)
- P: Igniting source capacitor (1,500 μ F)
- S: Relay igniting switch

の交流電圧も同時にブラウン管に導かれているが、これは管体に突き付けた電線によつて短絡されているため、その電線が起爆によつて切断された瞬間から現われてくるようになっていゝ。このようにして単掃引で点火電流、通電時間、点爆時間、タイムマークを描かせることができる。

また点火玉の高速度撮影の際には、Fig. 2 に示すように、通電時間とタイムマークとをそれぞれ小型ネオン管を用いて撮影画面に入れるようにした。

実験を行うにあつて確実に大電流を通じさせるため、回路構成とスイッチとについて以下にのべるような注意を払つた。

点火回路をインダクタンス L 、静電容量 C 、抵抗 R の直列回路とすると、点火電流は回路定数によつて種々の形態をとるが、 $R^2 - 4L/C > 0$ であれば電流は非振動的で、通電後対数減衰を行う。この実験では、できる限り不変電流を用いることが望ましいと考えたので、 C を大きくとり、1,500 μ Fとした。 R は大きい方が点火玉の抵抗変化の影響が少なくなつて好ましいが、コンデンサーの充電電圧に制限があるため、2~10 Ω とした。この場合電気振動を起さないためには $L < 1.5$ mHであればよいが、通電初期の電流の立ち上りを鋭くすることが重要であると考えて、点火回路の L を極力小さくするように努力した。すなわち雷管の脚線をほぼ20cmに切り、回路長を短くして、点火回路の全インダクタンスを約4 μ Hにすることができた。これは直径30cmのワンダーンコイルのインダクタンス

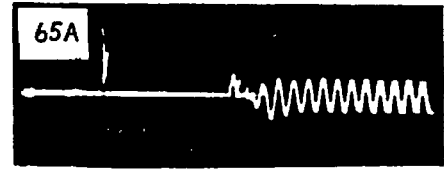
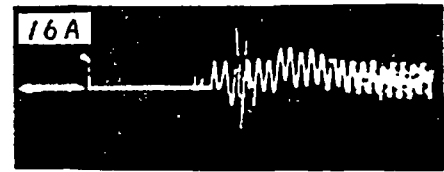
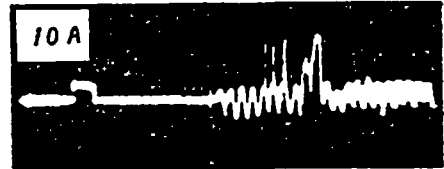
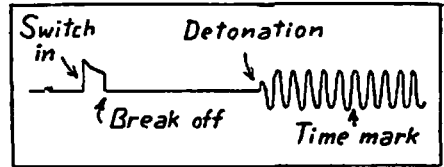


Fig. 3 Some experimental records obtained with a circuit shown in Fig. 1.

とほぼ等価である。点火回路の寸法や電線布設の形状にじゆうぶん注意を払つても、立ち上りの鋭い100A近い点火電流を得ることは容易でないため、雷管を爆破現場で用いるときにこのような大電流が実現するかどうかは疑わしいとも考えられるし、また現場では回路のインダクタンスがかなり大きいから電気振動を発生して複雑な過渡状態が現われているものとも思われる。しかしこの実験では、最も基本の形として不変電流を流すことを目標とした。

次に、大電流回路においてスイッチを投入する際、その接触部において接点が閉ぢるときのチャタリングすなわち完全接触の直前に起る火花や電磁力にもとづく反撥、弾性衝突による反撥などのため、通電初期に起る微細な断続現象は、電圧や電流がかなり大きいときはこれを取除くことがなかなか困難である。しかも点火力積の小さい点火玉を大電流で点火する場合には、チャタリングは点火状態に大きく影響するから特に注意する必要がある。この実験に用いたものは定

格60Aの3連式ナイフスイッチで、これをばねを用いて約10m/secの接近速度で投入し、その2極を並列に接続し、それぞれの刃形を修正してチャタリングを相補わせることによつて目的に適合させることができた。残りの1極は他の2極よりも約0.1ms早く接触するようにしておき、これを単掃引装置の起動に用いた。Fig. 3はFig. 1に示した装置によつて得た実験記録例である。

3. 考 察

3.1 電橋断線時間および通電時間

実験結果から点火電流と断線時間との関係を示すとFig. 4の通りになる。

Fig. 4において、点火電流が約10Aの場合には断線時間は120~150 μ sとなつており、これはジュール熱が断熱的に蓄積されると仮定して計算した断線時間($t_{oc}i^{-2}$)とほぼ等しい。しかし電流が大きい場合は実測時間は計算値より長くなつている。この原因は、実験を低抵抗回路で行つたため電橋の温度上昇にしたがつて電流がぐい減すること、通電初期における電流の立ち上り傾斜の影響によるものである。すなわち電流の立ち上り傾斜はこの実験では20A/ μ sec程度であつて、短時間で断線したものは通電時間の長いものに比べるとその影響を受けることが大きく、したがつて実際には発生したジュール熱は横軸に示した電流の値より小さい値に対応するからである。

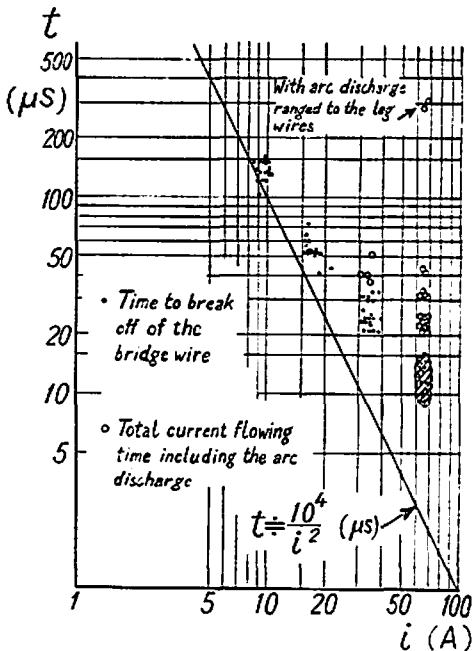


Fig. 4 Break off time measured with several intensities of igniting current

次にこの実験で点火電流を約35Aとした場合は4/28回、65Aの場合は23/29回が電橋の断線に引続いてアーク放電を起している。電橋の断線時間は65Aの場合10 μ s前後であるが、アーク電流を含めれば65A,35Aのそれぞれの場合に対して通電時間の差はほとんど認められない。

あらためて断線時間について全般的な考察を行うと (i) 1A以下の電流では断線時間と通電時間とは一致して起爆によつて通電が終り、(ii) 1~10Aの範囲では点火玉の着火にもとづく電橋の温度上昇が断線を早め、1A以下の場合と同様にその実測値はFig. 4の計算値より小さくなる。(iii) 10A前後で点火玉の着火時間とジュール熱による自己熔断とがほぼ同時であると想像すれば計算値に近くなり、10A以上では電流の立ち上り傾斜の影響をうけて断線時間が長くなる。(iv) 30A以上になると断線にしたがつて発生するアーク放電の継続のため断線時間と通電時間とが分離されてくることになる。

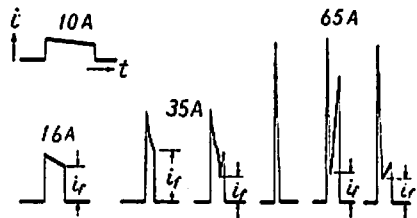


Fig. 5 Examples showing igniting current forms

アーク放電の発生は、オシログラムの電流波形ならびに実験後留管塞栓部の残がいを観察することによつて判断したが、Fig. 5に示すように35A以上の場合は電橋の抵抗増加にもとづく電流の減少の途中からやや定常あるいはふたたび増加しその後急に遮断されている。電流が35A以下の場合、遮断時の電流値 i_f は電橋合金線の融点を1,700~1,800°Cとして求めた抵抗値にほぼ対応しているが、35A, 65Aの場合でアーク現象の認められたものについては、発弧直前の i_f の大きさは通電初期の電流値から甚だしく減少しており、あるいは電橋が4,000~5,000°Cにまで達しているのかも知れない。しかし非常な高温状態での電気伝導現象は不明の点も多く、また今回の実験では起爆時間をも同じ記録に写しとるようにしたので、記録の掃引速度があまり速くなく、そのため電流値の大きいものに対してはとくに電流減少部分の傾斜状況を正確に判断することができなかつたのでこの点明らかではない。したがつてFig. 4において、65Aのときの断線時間は他の電流値に対して求めた断線時間に比べれば

その精度が低いので斜線によつてその範囲のみを示した。

次にアーク電流は時間とともに増加していることが多いが、これはアークが負抵抗特性をもっているためと、点火電流がこのときにはまだ立ち上り傾斜の途中にあるためであると考えられる。

3.2 点 爆 時 間

点火電流と点爆時間との関係は Fig. 6 に示す通りで、10A以上の点火電流に対しては一見差がないように見えるが、65Aにおいて発弧したものについては点爆時間が短くなつていくことに気付く。

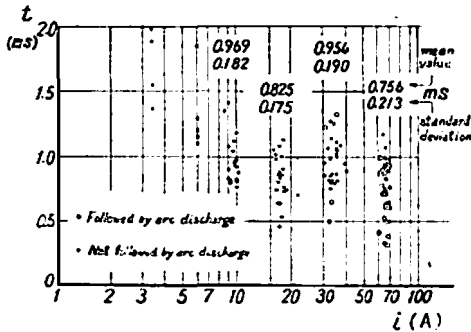


Fig. 6 Time to detonation measured by a bound wire with several intensities of igniting current

一般に点火玉の発熱量実測値は 10cal. 以下であるが⁵⁾、これは数 10ms の間に発生する総熱量であり、一方アーク熱はこの実験条件ではほぼ 5cal. ms にも達すると推定される⁶⁾。このアークは後述するように電磁力によつて雷管底部に向つて吹き付けられる傾向をもっているから、爆粉の点爆に対してアークエネルギーはかなりの影響をおよぼすものと考えられる。なお電橋に用いる白金イリジウムは温度アーク型の金属で、その最低発弧電圧は 20~30V であるから、20A 以下の点火電流ではアークの発生および維持は困難となり、実験結果からもこれは明らかである。

次に 35A のときアークを伴つた場合の点爆時間はそのばらつきのある両極端を示している。点爆時間が短くなることは 65A の場合と同様アーク熱によると考えられるが、かえつて長くなつていくものに対しては次のように考えられる。すなわち、約 20A 以下の場合には電橋の発熱量または温度上昇の速さが点火薬の着火と燃焼を積極的にたすける範囲であるとするれば、電流を増すことによつて点火玉の着火と燃焼とはますます速かつ均一になつてゆくが、約 20A より大きい電流を急に通じた場合には、電橋の温度上昇が極めて速いので電橋や電橋附近の水分などが急激な膨脹あるいは気化を

起し、またそれに加えて電橋に働く電磁力のため点火薬を吹き飛ばすような破滅的な動作を行ひ、そのため点火玉の燃焼をかえつて不均一にするのではないかと考えられる。したがつてこのような電流では点爆時間もそのばらつきもかえつて小さくならないこともありうると思へる。

しかしその際もし強力なアーク放電が起れば、点火薬にはさらにアークによるエネルギーが与えられて点爆時間が短縮されるが、35A の場合はアークの発生限界に近い条件であるため、65A の場合に得られるほどのアークエネルギーをもっていないので、過激な加熱による点火薬燃焼の不均一さを強めるのみに止まり不十分な着火状態の点火玉を破壊飛散させてしまうためではないかと考えられる。

結局、電流が過大であつてしかもアーク放電を起さなかつた場合が点火、点爆に対しては最も条件が悪い場合であると考えられる。

(附記) 点火電流によつて電橋に働く電磁力 F は、Fig. 7 において、筒線直径を 0.4mm、電橋の長さを 2mm、電流 i を 70A とすれば

$$F \approx 23 \times 10^{-5} (N) \approx 0.24g \text{ 重となる。}$$

3.3 高 速 度 写 真

高速度写真によつて点火玉の燃焼状況を観察すると Fig. 8 に示すように点火電流が 10A 以下の場合には点火玉の燃焼は順次その各段階を追つてゆくことがわかるが、20A では火花が四方に飛散し、65A では点火玉が吹き飛ばされて焰を発生しないことがあるのを認めた。

3.4 アーク放電

65A の電流を用いた実験結果のうち、最も短い点爆時間を示した 2 例 (Fig. 4, Fig. 6 参照) につき、実験後の雷管塞栓部を観察すると、Fig. 9 (A), (B) のようにアーク放電の痕跡が明瞭に認められた。

この例以外のものは電橋部分だけでアークが終じたようであるが、Fig. 9 のように電橋線のかん着部分をこえて塞栓に至る部分の脚線にまでアークが続いたときは、電磁力によつて爆粉方向に向う大量の熱を瞬時的に発生するから、この場合点火薬の燃焼に先立

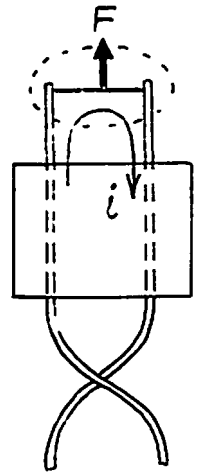
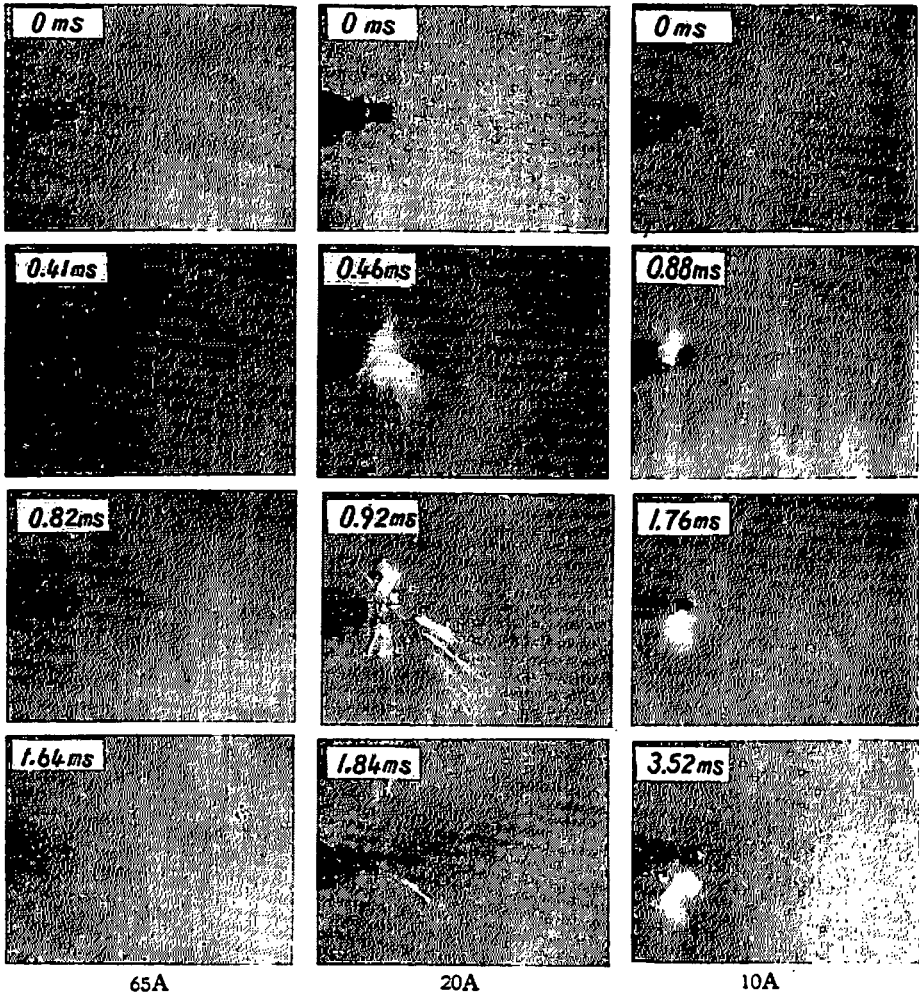
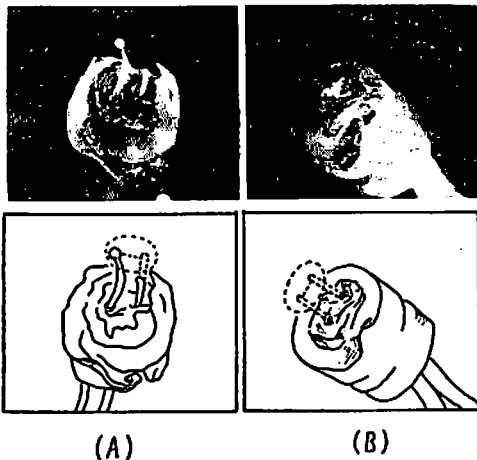


Fig. 7 Electromagnetic force upon the bridge wire



65A 20A 10A
Fig. 8 Examples showing the combustion of fuse-head in open air.
 (picked-up from high speed cinematographs)



(A) (B)
Fig. 9 Samples after detonation suffered by arc discharge

つてあるいは直接爆粉へ着火したのではないかと想像される。この傾向は電流の増加とともに強くなり、実験例は少いが約 200 A を通じた場合には $100 \mu\text{s}$ 程度で点爆したことをみても、点火薬の反応に先き立つた真の瞬発に近い状態になるものと考えられる。この場合は電橋はアーク放電のスターターとして作用していることになる。

3.5 点火電流

点火回路のインダクタンスはある値以下にすることができないから、点火電流の立ち上り傾斜もある程度以上のものが得られなくなる。したがって大きい電流を通じうる点火回路を用いても予定した大電流が事実上流れなかつたことになり易く、回路のインダクタンスと、実用上利用しうる最高電源電圧とをあわせ考えると電気雷管に流れる最大電流には事実上かなり低いところにその限度があることになる。例えば回路のイ

ンドクタンスを $10\mu\text{H}$ とすれば、1個の雷管に直流 100V を加えても、電流が約 45A に達したときに電橋が熔断することになる¹¹⁾。

3.6 起爆時間の測定

雷管の管体に電線を擦き付けて起爆時間を測定するときは、その電線に通じている電流が完全に遮断されるまでには不規則な変化を伴いながら平均 0.1ms 程度のおくれを示すから、一般の雷管と電磁オシログラフを用いて爆波に関する精密な観測を行うときには注意を要する。

4. 結 論

以上述べたことを要約すれば、次のようになる。

(1) 点火玉の燃焼は、点火電流が約 20A のとき最も速くかつ均一であるが、それ以上の電流では過激な加熱のため点火玉が破壊されて飛散することが認められ、その現象の不均一さによつて、かえつて点爆時間が長くなることもあり、またそのばらつきも大きくなる。

(2) 電橋断線時間は点火電流の増加とともに短くなつてゆくが、電流が 20A 以上になると断線に伴つてアーク放電が起りやすくなる。したがつてこの場合には断線時間と通電時間とは異つてくる。

(3) 点爆時間は 10A で約 1ms となり、それ以上の電流でもやはり 1ms 前後を示すが、 20A 附近で極小値を示し、それ以上では点爆時間とばらつきがともにやや大きくなる。しかし 50A 以上になるとアーク熱によつて点爆時間はふたたび短くなる。それ以上の電流の場合はアークエネルギーの増加に伴つて爆粉への直接着火の傾向が強くなり、さらに点爆時間が短くな

つてゆくと考えられる。

(4) 単発の場合電橋断線時間が極度に短くなるような大電流では必ずアークを発生すると思われるから、不発になることはないとしても、斉発を行う場合点火玉の均一な燃焼を期待するためには点火電流が 20A を超えないようにすることが望ましい。

この実験に用いた多数の電気雷管は日本化薬株式会社仁豊野作業所長山田正幸氏の厚意により提供を受けたものであつて、ここに感謝する。

なお国内現用品はおおむねこの実験結果と類似の性質をもっているものと思われるが、今後入手しうる製品についても実験を行いたいと考えている。

(昭和35年4月23日 工業火薬協会年会にて講演)

参 考 文 献

- 1) E. Jones, H. P. Stout: Colliery Engineering, Oct./Nov., 1948.
- 2) 東島, 西: 昭和30年4月, 昭和32年11月 工火協年会にて講演
- 3) 伊藤, 若宮, 藤中: 水曜会誌 12, 379, (昭29).
- 4) 伊藤, 藤中: 水曜会誌 14, 132, (昭35).
- 5) 伊藤, 若宮, 藤中, 白波瀬: 水曜会誌 13, 620, (昭33).
- 6) 電気工学ハンドブック (昭26), 829~830.
- 7) 6) と同じ
- 8) 正田, 浅羽, 米田: 工業火薬協会誌 19, 136, (昭33).
- 9) 電気工学ハンドブック (昭26), 833.
- 10) 山田, 他4名: 工業火薬協会誌 15, 81, (昭29).
- 11) 4) と同じ

On the Detonation of Electric Detonator with Heavy Current

Ichiro Ito, Yoshikazu Wakazono, and Yuzo Fujinaka

The time to breaking off of the bridge wire (lag time) in the fuse-head and the time to detonation (bursting time) using d. c. heavy igniting current were studied experimentally with the regular electric blasting caps of No. 6 strength.

The igniting current was drawn from a large capacity condenser ($1,500\mu\text{F}$) which was charged up through an electronically stabilized power supply ($100\sim 200\text{V}$), and it was conducted by a specially treated knife switch to get rid of the chattering troubles.

$4\mu\text{H}$ in overall self-inductance of the circuit was achieved to prevent the fall of Joule's heat as a result of the gradual increment of the current in the switching transient stage.

The records were obtained as photographic diagrams by adopting the arrangement showing in Fig. 1, and in each photograph the magnitude and the form of igniting current, the time to detonation, and the time mark were represented in a line performed by a single sweep.

The time to detonation is evaluated by means of the rupturing of the fine wire which was bound around close to the bottom of the sample.

The results obtained were summarized as follows:

- (1) When a detonator was ignited with the current intensity less than 20 A, the uniform combustion and the rapid spread of the flame of a flash-composition were supported and consequently the times to detonation and their deviations were more shortened by increasing the intensities of the current.
- (2) By using about 30 A or so, it was noticed that the uniformity of combustion

of the flash-composition was apt to disappear and it affected on the deviation of the time to detonation.

- (3) For about 65 A, in the most part of the samples, an arc discharge happened at the instant of the breaking off of the bridge wire, and accordingly the time to detonation was influenced to become to be shortened afresh.

In the cases of the heavier current, the instantaneous detonation would probably be expected to take place owing to sufficient energy of an arc discharge prior to the fuse-head combustion.

(Faculty of Engineering, Kyoto University)

書 評

F. P. Bowden, A. D. Yoffe 著 *Fast Reactions in Solids* (Butterworths Scientific Publications 1958) 163 p. ¥2,400

著者はケンブリッジ大学物理の教授で多年摩擦、潤滑の問題を中心として活躍しているが、火薬の感度についても目醒しい研究を多く発表している。その著 *Initiation and Growth of Explosions in Liquid and Solids* (1952) には起爆の出発点としての hot spot の概念を提出し一応完成させているが、更にこれを各個の場合に適用し具体的に研究して居り、これは年次発表して居てそのいくつかは工火協誌上に抄録されているが、この自分の研究を骨髄とし各方面の研究者による成果を肉として纏め上げたものが本書である。題目は高速反応となつて居るが、内容は起爆を主としている。英国の研究者らしく小型の廉価の装置で、かつ数式を余り用いず、従つて定性的な考察が多いが、示唆に富む ingenious な議論に満ちている。内容の一端を紹介すると顕微鏡下でアザイド結晶を加熱し変化を観察、電子顕微鏡と X-線回折を併用して熱分解

で、分解析出する Ag 結晶状態を検し、Frank-Kamenetzki 流の計算で粒子が余り小さいと AgN₃ でも燃焼するだけであることを確かめたり、起爆薬は瞬間強光露出で爆発するがこの感度は写真と同じ増感剤で増感されその機構も同じであること、金属のイオン化傾向とそのアザイドの安定度の関係、落錘感度試験の試料の厚さ、錘の硬度の関係、又水中衝撃波による起爆では気泡の大きな作用を高速写真で確認したり、高速度瞬間X線フラッシュで爆轟波面の研究等がある。起爆薬単結晶に電圧をかけ起爆することを見、機構を考察、 α 線、 β 線、 γ 線、U核分裂生成物による分解を研究したりしている。伝爆については頁数が少ないが、結晶破壊による粉末化の役割を重視している。

全体の通読で感ずることは多くの研究者の結果を公平な立場で取入れた広い視野で書かれた良本であると云うことである。新しい内容は殆んどなく、従来各種の雑誌に発表されて来たものの整理統合ではあるが纏まつて居るので便利である。(水島容二郎)