

Photochemical Decomposition of Nitrocellulose

by H. Osada, S. Kakinouchi & N. Kunishige

We investigated the mechanism of the photodecomposition of *n/c* from the viewpoints of the effects of wave length, surrounding atmosphere, and photoelectric conductivity of *n/c*.

The depolymerization of *n/c* is caused by the wave length of less than 3,200Å, and its rate by constant wave length light is constant though the nitrogen contents are different if the degree of polymerization of *n/c* are constant. By increasing their intensity of radiation, the rate of depolymerization becomes higher. O₂ molecule in the air accelerates the depolymerization of *n/c*. The temperature is not so much effective to photolysis as the wave length.

In the air, depolymerization is not occurred but reduction of nitrogen contents is caused by near ultra violet ray. On the contrary, in reduced pressures, depolymerization is caused and reduction of nitrogen contents is not occurred by ultra violet ray. The reduction of nitrogen contents will be due to chemical reaction of *n/c* with O₂, and depolymerization will be due to photo-degradation reaction.

Being irradiated by ultra violet ray, the carriers are produced in *n/c* film, then these carriers react with O₂ molecule which is excited by ultra violet ray, and depolymerization and reduction of nitrogen contents are caused at the same time.

電気雷管点火玉の電気火花感度と通電感度

中野 義信・田中 幸雄・水島 容二郎*

目次

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1. はしがき | 2. 7. 1 実験法 |
| 2. 実験 | 2. 7. 2 結果 |
| 2. 1 試料 | 2. 8 長時間パルス電橋通電 |
| 2. 2 雷管の絶縁耐力 | 2. 8. 1 実験法 |
| 2. 3 点火玉の絶縁耐力 | 2. 8. 2 結果 |
| 2. 4 カーコイルの火花法 | 3. 考察 |
| 2. 5 点火玉の発光 | 3. 1 電気火花感度 |
| 2. 6 放電エネルギーの直接測定 | 3. 2 電橋通電感度 |
| 2. 6. 1 従来法の不適性 | 3. 3 本実験の特長 |
| 2. 6. 2 実験法 | 4. まとめ |
| 2. 6. 3 結果 | 付記, 文献 |
| 2. 7 短時間パルス電橋通電 | |

1. はしがき

高圧電気火花が火薬を通じて発生すると、燃焼、爆燃または爆発が起り得る。この生否は火花の特性と爆

薬の性質で決まるので、これを起し得る最小の電気エネルギー値を火薬の感度表示に使用することができる。同様なことが爆発性気体についても言え、この種の研究は従来行なわれている¹⁾。

しかし火薬についてはこの種の実験は殆んどなくま

昭和40年6月21日受理

* 東京工業試験所第7部 千塚市新宿85

してこの様式で感度表示をすることについて定量的に研究、実施した例は殆んどない²⁾。その理由は火花放電が極めて短時間 (μsec) の現象であるため、正しく測定するための工学技術が十分でなかったためと思われる。

電気火花に対する火薬の感度は上記のように利用できるが、特に火薬取扱時の静電気放電による発火の危険対策の資料となる。例えば起爆薬の製造、雷管の取扱、AN-FO 爆薬の装填³⁾、発射薬、ダイナマイトの製造等の保安に関してこの感度値は取扱上の基準とすることができよう。

爆薬については現在研究中で、その一部は発表したが⁴⁾、ここでは雷管雷管の点火玉について実験した結果について述べる。この種のデータは従来発表されたものがない。

5種の点火玉(類似物を含む、以下同様の)薬を通じて、火花放電を起させ、発火を起し得る最小電気エネルギーを求め、これを電気火花感度とした。また火花放電による同じく μsec 級のパルス電流を点火玉の電橋を通じた場合の発火についても同じく電気エネルギーを求めた。さらに msec, decisecc 級の長時間通電による発火についても点火玉1種の感度を求めた。従来のこの種の実験は msec 級⁵⁾ のもので μsec 級のパルス電流によるものはなかった。

2. 実験

点火玉の化学成分は起爆薬または酸化剤と被酸化剤の混合物が主成分で、前者は爆轟または燃焼し、後者は燃焼する。以下発火と称するのはこの何れかを意味する。何れにしても雷管作動の第1段である。ここでは点火玉の実験であるから、起爆薬と添装薬を用いず、点火玉のみまたは点火玉と銅管体のみを組立てて実験を行なった。

2.1 試料

日本の雷管メーカー3社の中の2社の実用点火玉製品の内点火玉型 A, B, C および充填型 D, E を試

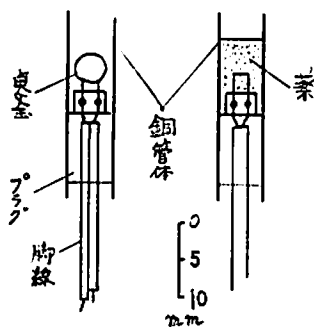


図1 点火玉の形状

表1 点火玉の主成分

点火玉種類	主成分
A	Pb(SCN) ₂ , KClO ₃
B	Pb(SCN) ₂ , KClO ₃
C	DDNP (Diazodinitrophenol)
D	DDNP
E	DDNP

料とした。これで国産品の大体の様子を知り得る。試料は常に塩化カルシウムデシケートに保存した。D, E は湿つていると発火し難い。B, D 点火玉の略図を図1はに示す。A, B, C は大気中で脚線間通電で炎と小爆音を発生する。何れの点火玉も密閉状態では激しく瞬間的に燃焼する。その大略の化学成分につき文献⁶⁾と定性分析を行なった結果を表1に示す。

2.2 雷管の絶縁耐力

予備実験として銅管体に納めた点火玉につき、管体と電橋の間に 5kV/30sec の速度で電圧を上昇しつつ加え、絶縁耐力 (= 絶縁破壊電圧, 火花放電開始電圧) を検し、またそのときの点火玉の発火の有無を検した。回路は図2に示す。

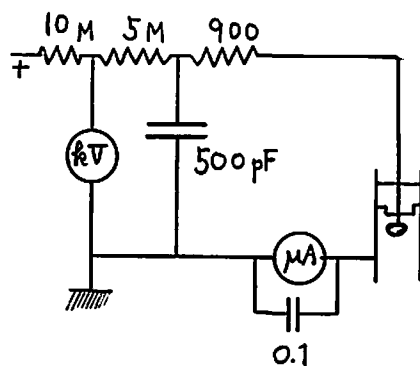


図2 雷管の絶縁耐力測定

高圧電源は興和製 Kowa HTS-1000S 型で、電圧制御部を改造し低電圧 (40kV) にも安定化作用を持たせた。

火花放電の起る前にコロナ放電 ($5-15 \mu\text{A}$) が先行するのが普通である。このとき発火した例はなかった。A, B, C 点火玉については火花放電は点火玉実質を通じて起るよりも点火玉下部の銅線露出部と管内壁の間で起る方が多いようである。表2(a), (b), (c) はこの状況での結果である。表2(d), (e) の充填型では必ず火花は薬部を通じて起る。

表 2 (a) A 雷管としての絶縁耐力

火花放電 開始電圧 (kV)	その後の 電流 (μ A)	その継続 時間 (sec)	発火の有無
5.7	—	0.5	○—(発火)
1.7	200	10	×—(不発)
4.5	—	0.5	○
2.4	—		×
4.2	200	瞬間	○
4.2	150	5~10	×
4.0	200	5~10	×
5.9	200	10	×
5.2	250	3~5	×
5.3	50	10	×

表 2 (b) B 雷管としての絶縁耐力

火花放電 開始電圧 (kV)	その後の 電流 (μ A)	その継続 時間 (sec)	発火の有無
3.6	130	10	×
6.2	—	瞬間	○
5.0	120	3	○
5.2	130	10	×
3.6	120	10	×
5.0	—	瞬間	○
4.8	50	15	×
5.4	130	15	×
6.0	—	瞬間	○
5.8	150	15	×

表 2 (c) C 雷管としての絶縁耐力

火花放電 開始電圧 (kV)	その後の 電流 (μ A)	その継続 時間 (sec)	発火の有無
4.8	100	20	×
5.4	200	10	×
5.2	—	瞬間	○
5.8	200	15	×
4.4	20	15	×
4.4	250	10	×
5.0	80	15	×
6.0	290	15	×
4.6	—	瞬間	○
4.0	150	10	×

表中継続火花電流値は電源電圧の調整により広い範囲で任意に選べるので、適当な値とし辛うじて発火する程度にした。

表 2 (d) D 点火玉の絶縁耐力
(雷管としても同じ)

火花放電 開始電圧 (kV)	その後の 電流 (μ A)	その継続 時間 (sec)	発火の有無
4.0	180	18	○
4.3	80	60	×
4.6	180	60	×
5.0	150	60	×
4.8	220	60	×
4.4	380	40	○
4.3	480	4	○
4.5	420	34	○
4.0	400	18	○
4.4	360	3	○

表 2 (e) E 点火玉の絶縁耐力
(雷管としても同じ)

火花放電 開始電圧 (kV)	その後の 電流 (μ A)	その継続 時間 (sec)	発火の有無
3.4	50	60	×
3.5	120	4.5	○
3.0	120	60	×
3.5	140	41	○
3.4	160	5	○
3.5	80	34	○
3.6	60	15	○
4.1	60	45	○
3.0	80	60	×
4.2	90	28	○

2. 3 点火玉の絶縁耐力

2.2 の火花放電は前述のように必ずしも点火玉葉中を通じて起つていないので、点火玉下部の導線露出部に絶縁のためエポキシ樹脂を塗布、重合させ管体を用いることなく、広い銅平板に向対させ図3のように配線して2.2と同様に電圧を加え、絶縁耐力をA点火玉

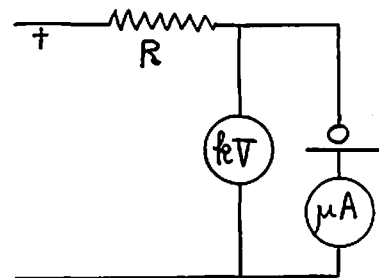


図 3 点火玉の絶縁耐力測定

についてのみ測定した。結果は表3に示す。多少 2.2より発火しやすくなっている。発火しなかつた点火玉には火花路となつた細孔が肉眼で認められた。

表3 A点火玉葉の絶縁耐力

間隙 (mm)	火花放電開始電圧 (kV)	その後の電流 (A)	その継続時間 (分)	発火の有無
接 触	2.0~2.4	0→100	2	×
"	4.1	—	瞬 間	○
"	2.0	20→70	1	×
"	0.5~0.7	250	1	×
0.5	2.8~2.3	10→500	4	×
1	5.2	—	瞬 間	○
1	4.6	150	瞬 間	○
1	5.0	50→100	1	×
1	5.0	100	瞬 間	○
1	3.0	—	瞬 間	○
1	3.4	—	0.7	○
1	3.2~4.0	10→100	35(秒)	○
1	4.3	—	瞬 間	○
1	4.8	100	瞬 間	○
1	4.6	—	瞬 間	○
1	5.5	250	瞬 間	○
1	7.2~5.4	100	0.5	○
1	4.0	100	1	○
1	6.0	—	瞬 間	○
1	6.0	—	瞬 間	○
1	3.2~2.8	10→50	1	×
1	3.1	50	1	×

2.4 カー・コイル (Car Coil) の火花法

カー・コイルによりパルス入力を昇圧して火花放電をさせる方法で実験例²⁾はあるが、エネルギー伝達率が不詳のため発火に必要なエネルギーの絶対値を求めることは困難である。しかし簡単に実験できるので予備的に行なつた。

使用カー・コイルはダイヤモンド印 6V 用で図 4

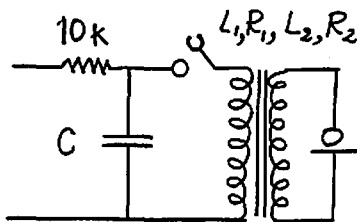


図4 Car Coil による予備実験

$L_1=6.3\text{mH}$ $R_1=0.96\Omega$
 $L_2=33\text{H}$ $R_2=5.3\text{k}\Omega$

のように配線した。Cはエネルギー蓄積用オイルペーパーコン、スイッチは自作の機械的な銅片接触式である。カー・コイルの諸定数、および以下の項に現われる抵抗値等は日黒電波製 LCR ブリッジ 826 型および横河電機製万能ブリッジ BV 103 A 型によつて測定した。充電回路の時定数は 1 msec 程度で長いから、スイッチ投入時の hunting があつても問題にならない。試料はA点火玉で 2.3 項と同様に処理したものである。結果は表4に示す。

表4 カーコイルによるA点火玉の予備実験

Cの容量 (F)	Cの電圧 (V)	間隙 (mm)	発火の有無
0.05	427	0.5	火花のみ
0.1022	427	0.5	発火
"	427	1.0	"
"	270	"	火花なし、発火せず
"	300	"	発火
"	275	"	火花のみ、発火せず
"	240	"	"
"	249	"	"
"	300	"	発火
"	285	"	"
"	265	"	火花のみ、発火せず

Cの容量が 0.1022 μF のとき、充電電圧 280 V 以上では必ず発火し (5 回)、以下では必ず発火しなかつた (5 回)。従つて 1 次側のエネルギーが $1/2 CV^2 = 4.0 \text{ mJ}$ のときが限界となる。この結果は次のように検討した。

試料に加わるエネルギーは変圧器のカー・コイルを通過しているから、1 次側のエネルギー 4.0 mJ より小さい筈である。その損失は次の 3 項に分けられる。

(1) 2 次コイルの内部抵抗 (5.3 k Ω) のため直流損を発生する。火花間隙の大略の抵抗値 500 Ω (後出図 7) との比で比例配分されるとしてよい。従つて効率は $500 \Omega / 5.3 \text{ k}\Omega = 9.4\%$ となる。(2) 電流を高周波用の低抵抗に通じその電圧降下を岩崎シンクロスコープ 5305-SP-20 (帯域幅 20 Mc) で肉眼観測するに 50 kc 程度の減衰振動であつた。従つて表皮効果がある筈で、直流抵抗 5.3 k Ω より実効抵抗は大きくなる。(3) この振動電流に従つて変化する磁束に伴う鉄損は商用交流の鉄損 (1~3%) より大きい筈である。

(2), (3) の損失の評価は困難であるが仮りに 1/2 とすると後述 2.6.3 の結果と合う。これを表5に示す。

表 5 A 点火玉についての発火エネルギー

項	目	計算式	エネルギー (mJ)
1 次側 C 中のエネルギー		$1/2 CV^2$	4.0
2 次コイルの直流抵抗損失を除去		$4.0 \times 9.4\%$	0.38
高周波なるための損失を除去		1/2 と仮定	0.19
2.6.3 の実測値		$\int e i dt$	0.14

2.5 点火玉の発光

後述 (2.6) のエネルギー直接測定を実施した条件、つまり辛うじて発火し得る条件で A 点火玉を発火させ、その光をホトコル (浜松テレビ製 1P21) に受けることにより通電より発火までの時間と発光継続時間を測定した。ホトコル受光系の時間分解能が $2 \mu\text{sec}$ よりよいことは別に確めてある⁷⁾。発光は通電後 30 msec 後に始まり、継続時間は 10 msec 弱であることが 2 例で示された。発光までの時間は通電電流の大きさにより著しく変動する ($200 \mu\text{sec} \sim 30 \text{msec}$) ことは既に示されている⁷⁾。

2.6 放電エネルギーの直接測定

2.6.1 従来法の不適なること

従来の爆発性気体用試験回路を点火玉に適用し、これを図 5 に示す。

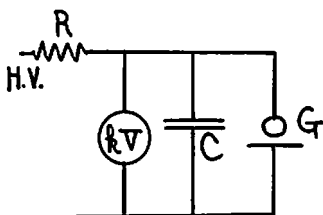


図 5 従来法

徐々に充電電圧を上昇し終に試料 G で放電させ、このとき発火するや否やを検しエネルギーは $1/2 CV^2$ 式より計算する方法である。G に加える電圧は少なくとも 6 kV (表 3) を要するから上記 2.4 のエネルギー 0.19 mJ を蓄えるためにはコンデンサー C の容量は 20 pF でよい。最初の放電後 R を通じて C が再充電されその結果再放電を起す可能性、さらに持続放電にまでなることを防ぐために RC の時定数を相当大きくして、最初の放電後直ちに手動等で電源を切り離さねばならない。RC=1 sec, C=20 pF より R=5×10¹⁰Ω となりこの程度の抵抗は絶縁抵抗と目つてよく安定に実現することは困難である。Blanc⁸⁾ 他はエポナイト棒を抵抗に使用しているが安定し難いであろう。

20 pF のコンデンサーの絶縁はさらによくなければならない。

なお回路抵抗を無視している点は根本的な欠点である。

2.6.2 実験法

火花エネルギーを直接求めるには電極間電位差 e と電流を i 時間の関数として実測し $\int e i dt$ を求める必要がある。

回路を図 6 に、その定数を表 6 に、電圧電流のオツシログラム例とこれより計算した電力と抵抗の曲線を図 7 に示す。抵抗は凡て高周波型、CRO は Tektronix 555-CA, K (帯域幅 DC-24MC, DC-30MC)(0.5~1 μsec/cm) で、時間軸は港通信機製タイマーカマー MB 18B で校正した。実験初期のスイッチはサイラトロン 5C22 を用いたが、極間容量が大きるので、機械的の接触型を用いた。分圧抵抗⁹⁾ は定抵抗型でないが、岩崎製パルス発生器 PG1B よりの 0.2 μsec パルスで試験するに至は殆んでないので 0.02 μsec よりよいレスポンスを持つと思われる。最初の放電後 C が再充電され放電が起り試料に再びエネルギーが加えられるサイクルはこの分圧器があるため起らない。(充

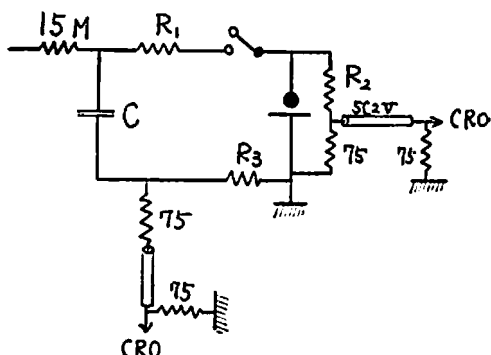


図 6 火花感度用回路、定数は表 6 参照

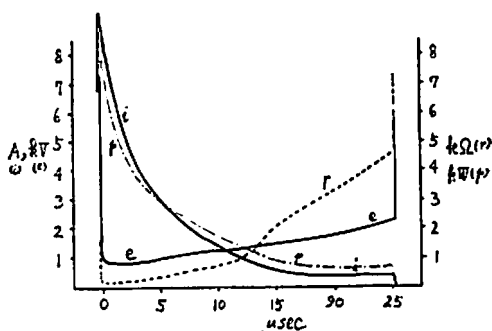


図 7 E 点火薬玉火花着火の例 (1.75mJ で着火)、e, i を実測し r, p を求めた。

表 6 図 6 の 定 数

点火玉	$R_1(k\Omega)$	$R_2(k\Omega)$	$R_3(\Omega)$	$C(pF)$	間隙 G (mm)
A	10	10.8	9.45	39.5	I
B	4	10.8	9.28	56	I
C	0.4	10.8	3.18	6,700	I
D	2	10	3.18	6,000	—
E	4	5.08	1.97	1,500	—

電抵抗 $1 M\Omega$ 分圧器抵抗 $10.8 k\Omega$ 分圧器を bypass する電流は火花が始まれば無視できるし、積分は火花が始まってからをとるので関係がない。

電流シャント¹⁰⁾は Bifilar 巻きのニクロム線の自作である。主回路の $10 k\Omega$ は振動抑制抵抗でコンデンサーに蓄えられたエネルギーの大部分はここで消費される。振動状態では $\int e \cdot i dt$ の積分が極めて困難となる。初期には CRO えの信号取出しは平衡 2 線で差動的に行なっていたが、配線のシールド、その短尺化、接地点の改良で 1 線非平衡式で正しい結果が得られるようになった⁹⁾。本実験で最も最も時日を要したのはこのあたりの問題についてであつた。

手続きは次のように行なつた。CRO 像を撮影したネガフィルムを引伸機にかけ、軌跡をグラフ用紙 (25 cm×18 cm) に手書きし、 $e \cdot i$ 曲線を作りプランメーター (精度 1%) で曲線下の面積を測定し mJ 値に換算した。積分の始点は電圧印加後遅れて ($1 \mu sec$ 以下) 電流が急に流れ始める点とし、終点は $e \cdot i$ が十分小さくなる点をとる。P. E. T. N. 試料のときは電圧曲線に変曲点¹⁾が表はれ、発火を示すのでこれを終点とすることができるが、点火玉では表われない。

2. 6. 3 結 果

2.3 項の試料と同じく導線露出部を絶縁被覆した A, B, C 点火玉と充填型 D, E 点火玉についての実験条件と結果を表 7 a, b, c, d, e に示す。

a, b, に示した平均エネルギー値は発火したもののみについてで、ほぼ同様のエネルギーを与えて不発火の場合は積分計算を行なわなかつた。この平均値はほぼ発火に必要な最小エネルギーと見なしてよく加える電気エネルギーが大き過ぎる状態で発火しているのではない。

A, B, C 点火玉では図 5 に示すように点火玉表面と銅板電極間に間隙 (1mm) がある。この大きさは厚みゲージで一定になるよう留意しているが、この間隙部で消費される電気エネルギーの評価は困難である。この点については後述する。(3.1)

D, E 点火玉の表 9 d, e の平均値は発火したものと、全数について示されている。両者が一致しないのは当然としても、D 点火玉では発火の平均値の方が小さい。これは大き過ぎる電気エネルギーを加えて実験をしているのではないことを示している。測定法および試料性質のバラツキによる大体の誤差はこれで見当がつく。

表 7 (a) A 点火玉火花エネルギー直接測定

C の 電 圧 (kV)	$\int e \cdot i dt$ (mJ)
19.6	0.12
17.0	0.15
17.0	0.13
17.6	火花でも不発
15.3	0.17
13.6	火花でない
17.0	0.10
15.3	火花でない
17.0	0.17
17.0	0.13
15.3	火花でない
17.0	"
17.0	0.10
17.0	火花でない
17.0	0.20
17.0	火花でない
19.6	0.17
17.0	沢花でない
平 均	0.14

表 7 (b) B 点 火 玉

C の 電 圧 (kV)	$\int e \cdot i dt$ (mJ)
16.0	0.44
18.7	火花でも発火しない
18.7	0.76
18.7	0.47
16.2	火花でも発火しない
17.9	0.61
16.2	0.68
15.3	0.72
17.0	0.74
16.2	火花でも発火しない
16.2	0.50
平 均	0.62

表 7 (c) C 点 火 玉

C の電圧 (kV)	$fei dt$ (mJ)
8.5	1.75
7.2	火花でも発火しない
8.5	1.60
7.7	火花でも発火しない
8.5	1.17
8.1	1.84
8.5	火花でも発火しない
8.1	"
10.2	1.90
8.5	火花でも発火しない
8.1	"
9.4	1.75
8.5	火花でも発火しない
10.2	1.23
平 均	1.61

表 7 (d) D の 点 火 玉

C の電圧 (kV)	$fei dt$ (mJ)	発火の有無
8.5	10.9	×
7.65	6.6	○
7.0	6.3	○
7.0	9.5	×
9.35	10.8	○
7.65	10.5	×
9.35	11.4	×
9.4	11.0	○
9.4	8.8	×
8.5	7.4	○
7.7	11.5	×
9.4	10.8	×
8.5	8.3	○
8.5	10.3	○
全 平 均	9.6	
発火したもの のみの平均	8.7	

2. 7 短時間パルス電極通電

2.6 では点火玉葉の実質を通じて起る電気火花放電による発火につき述べたが、ここでは点火玉内部の電橋に通電するときの発火に必要な最小エネルギーについて述べる。

この種の実験は従来³⁾より多くあるが、大部分は通電時間が長く (msec 程度)、また通電中に電橋温度が上昇するためにその抵抗が増加し、従って電橋に消費される電力が変わって来ることを正しく考慮した実

表 7 (e) E 点 火 玉

C の電圧 (kV)	$fei dt$ (mJ)	発火の有無
12.75	3.37	○
12.75	2.70	○
11.90	2.30	×
12.75	2.56	×
12.75	4.15	○
12.75	2.50	×
12.75	2.50	○
12.75	2.25	○
12.75	3.63	×
12.75	1.18	×
12.75	3.31	×
13.6	1.75	○
12.75	2.97	×
13.6	4.20	○
13.6	2.15	×
全 平 均	2.77	
発火したもの のみの平均	2.99	

験は見あたらない。

後述のように抵抗値を一定と見なすときは抵抗の増加を考慮した場合よりエネルギー値で 10~30% 低くでてくる。

2. 7. 1 実 験 法

回路を図 8 に、その諸定数を表 8 に示す。

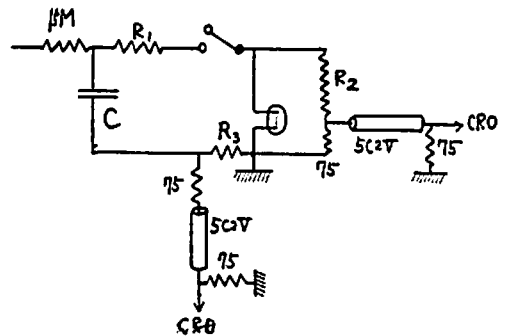


図 8 パルス通電回路

表 8 通電回路図の定数

点 火 玉	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	R_3 (Ω)	C (μF)
A	75	500	9.45	0.01
B	75	500	9.45	0.03
C	75	500	9.28	0.03
D	75	500	2.92	0.01
E	1,100	75	1.85	0.194

通電時間は数 μsec より 30 μsec である。CRO 等は 2.6.2 と同じである。制動抵抗は前同様放電が Overdamping になるよう、かつ印加電圧 6 kV 以下で点火玉が発火し得るようにした。分圧器の分割比を約 1/20 としたので 2.6.2 の場合でも波形歪は僅かであるが更に改善された筈である。電橋の抵抗が十分小さい (約 1 Ω) ので分圧器損失は無視できる。

実験順序はまず絶対不発火と予想される低い電圧より始め 100~200 V づつ上昇させ、その度に 2~4 回通電を試みながら発火するまで行なう。試料は前項同様発火の有無に拘らず、通電毎に新しいものを用いた。

2.7.2 結果

結果を表 9 a, b, c, d, e に示す。a, b, c では発火したもののみについて、d, e では発火、不発火ともエネルギーを示す。表中の平均値については前項 2.6.3 と同じ解釈ができる。

表 9 (a) A 点火玉の瞬間電橋通電
発火エネルギー

C の電圧 (kV)	$\int e_i dt$ (mJ)
4.0	0.74
4.4	0.79
3.7	1.00
4.0	0.73
4.0	0.78
3.9	0.77
平均	0.80

表 9 (b) B 点火玉の瞬間
電橋通電発火エ
ネルギー

C の電圧 (kV)	$\int e_i dt$ (mJ)
3.4	1.58
3.4	1.83
3.7	1.54
3.5	1.48
3.4	1.64
3.6	1.61
3.6	1.56
3.5	1.63
3.6	1.70
3.6	1.45
平均	1.60

表 9 (c) C 点火玉の瞬間
電橋通電発火エ
ネルギー

C の電圧 (kV)	$\int e_i dt$ (mJ)
3.4	1.53
3.3	1.70
3.4	1.48
3.3	1.23
3.3	1.20
3.3	1.51
3.2	1.24
3.2	1.38
3.3	1.41
3.3	1.38
平均	1.41

表 9 (d) D 点火玉の瞬間電橋通電
発火エネルギー

C の電圧 (kV)	$\int e_i dt$ (mJ)	発火の有無
5.95	0.91	○
4.25	0.44	×
5.20	0.53	×
5.95	1.01	○
5.53	0.67	○
5.20	0.67	×
5.95	0.82	○
5.53	0.66	×
5.95	0.67	○
5.53	0.65	○
5.20	0.77	×
5.95	0.67	○
5.53	0.81	○
5.20	0.51	×
5.20	0.57	×
全平均	0.69	
発火したもの のみの平均	0.78	

表 9 (e) E 点火玉の瞬間電橋通電
発火エネルギー

C の電圧 (kV)	$\int e_i dt$ (mJ)	発火
11.05	8.25	○
10.20	6.25	○
9.35	5.00	×
10.20	6.75	○
9.77	6.50	○
9.77	4.75	×
10.20	6.62	×
11.05	7.60	×
11.05	7.60	○
10.20	6.50	○
9.77	5.40	×
10.20	6.25	○
9.77	5.31	×
10.20	5.50	×
9.77	6.50	○
全平均	6.31	
発火したもの のみの平均	6.87	

2.8 長時間パルス電橋通電

2.7 の通電時間は数 μsec であつたが、ここでは長時間 (msec, decisecc) の電橋通電に対する感度について述べる。

2. 8. 1 実験法

回路は図9に示す。電流シャントはマンガニン線となるべく無誘導にまいたもの、図中の R は電流制限用で電橋抵抗よりはるかに大きく、従つて定電流源とみなしてよく、電橋の通電加熱による抵抗増加は電圧降下分の増大を来し、オシログラムに記録され、積分計算に自然に算入されることと 2.7 と同じである。ヘルムホルツ振子は数 kg の振子で軽い致接点を開閉するもので、時間間隔を任意に設定できる。接点は機械的のもので、Chattering を起していたので、水銀接点に改造した結果、満足な動作を行なうようになった。

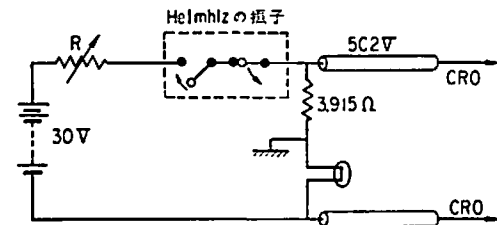


図9 長時間電橋通電回路

まず通電時間を決め、これに対し丁度発火するに必要な電流値の見当を数回の予備実験でつけ、その近くで数点より数十点の電流値を図9の R の増減で設定した。その範囲を表10に示す。同一試料についての通電を一回限りとしたこと前同様である。発火の判定は容易であつた。実測の通電時間と電流値より点火玉の電橋抵抗を一定と仮定すれば $\int i dt$ を求めることができる。しかしこの仮定は正しくなくその意味が不明瞭である。

表10 設定通電時間と大略の発火限界電流値

通電時間 (msec)	電 流 (A)
1	0.90
4	0.65
10	0.57
50	0.51
100	0.46

点火玉について得た電圧と電オツシログラム曲線より積分 $\int e dt$ を実行すること前項 2.7 と同じである。積分の開始点は通電開始時刻であるが、終点は必ずしもヘルムホルツ振るの接点の開く瞬間ではない。この点を次に述べる。電圧と電流のオシログラムの代表例を図10に示す。

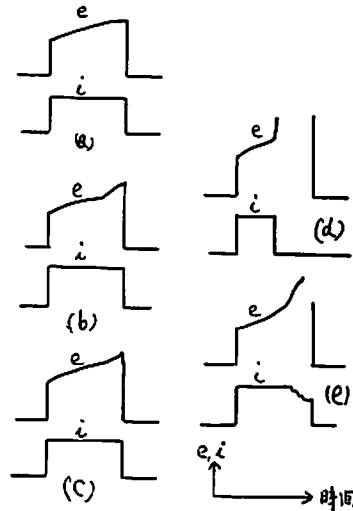


図10 電橋通電の電圧電流オシログラムの例

(a) を示すときは発火も不発もあり得た。不発のときは必ずこの形をとつた。電圧の上昇は電橋抵抗の加熱による増大を示すので、発火または発火に近い条件では 30~40% 増になつている。しかもこの抵抗増加には不連続点がないから発火した場合でも、その時刻は通電終了後である。

なお電流曲線は水平であるから、積分計算は極めて容易である。(b) の電圧曲線には不連続点あり急増を示す。ここで化学反応が始まりそのための加熱が開始されたとしてよい。Seidt の積分は一応この点まで行なう。(c) の電圧曲線には不連続点がスイッチの開くとき現われる。この曲線は稀に現われる。(d) の電圧曲線は電橋の抵抗の急激な増加を示し、電流は 0 となるので、切断したことを示す。通電設定時間 50~100 msec のときよく現われる。積分は切断時刻まで行なう。(e) の電圧曲線は d と似ていて電橋の切れかかりを示す。通電設定時間が 50 msec 以下のときよく現われる。

2. 8. 2 結果

積分したエネルギー値と通電時間(オシログラムで実測した時間でスイッチの設定時間とは必ずしも等しくない。電橋の早期切断が起ることがある。)の関係を図11に示す。ここに○は発火例(61点)、×は不発火例(71点)を示す。実験例が余り多くないので 50% 発火率の曲線を精確には決定できないが、大体の境界線を描いた。時間 0 に外挿した点は 2.7 の数 μsec のエネルギー値 (0.80 mJ) とよく一致している。この曲線は直線に近いが、やや上に突である。従来の $E = a + bt$ 式と近似的には合う。

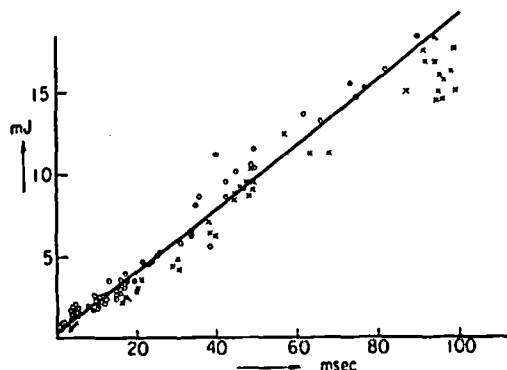


図11 msec 通電時の発火限界エネルギー

3. 考 察

3.1 電気火花感度

測定値は電極間で消費されたエネルギーであつて、葉の発火に有効なエネルギーより大きい筈である。測定されたエネルギーは(1)電極加熱、(2)空中火花路の形成による空気加熱、(3)音、(4)光、(5)葉の加熱に費やされる。

(1) 稀ガス中で白金電極により火花放電をさせたとき、気体に与えられるエネルギーの割合は気体の種類、間隙長等で大幅に変わり 30~70% である¹¹⁾。本実験では空中と葉中の火花であり、電極の一方は銅板、他は葉中の銅線であるから条件は異なる。このとき空中で消費されるエネルギーの割合は不明であるが、葉に移行するエネルギーよりは比熱、絶縁抵抗より考えて小さいであろう。空気間隙長を変えても(2倍まで)発火に必要なコンデンサー充電電圧には殆んど影響がなかつたことも裏付けとなる。

(3)、(4) 音と光のエネルギーは僅かで無現できよう。(5) 葉のエネルギー移行を考える。

一般に電気火花のプラズマは数万度で、本実験の条件の 30 kV/0.3 cm の電位傾度では 45,000°K となる¹²⁾。このプラズマより葉は熱量を受取る。この火花放電をセロハン膜を通じて行なうと小孔を残す。仮りにこの直径を 0.03 mm とし、これがプラズマ直径に等しいとすると、この大きさの葉の部分の部分は恐らく機械的な力を受けるであろうが、その部分の温度上昇は次のように計算される。

その体積は 0.0008 cm³、葉を DDNP とし Neumann-Kopf の法則で比熱を求めるとその熱容量は 0.0004 mcal となり、入力 1 mJ によつて 620°C の温度上昇を来すことになる。この値は普通の測定法、すなわち 4 sec 待ちクラブ発火点(実測 186°C)よりはるかに高いが加熱時、間が短い(数 μsec)から

当然である。表11の値よりなお高いが熱容量の大きな白金線のごときものがなく、冷却が早く有効高温時間が短いためと考えれば説明できる。

発火エネルギーの測定値は図7の Overdamping の状態での値であつて、通過火花電流の波形が異なるときは、異なる最小発エネルギー値を与える可能性がある。P.E.T.N. について回路の定数を変えた実験¹³⁾では振動状態の方が小さいエネルギーで発火するようである。もつともその差は桁を変えるほど大きなものではなかつた。

3.2 電橋通電感度

μsec の通電とこれよりはるかに長い msec, decisecc の通電のときはエネルギー値が同一曲線上にあることが判つた。

これが完全な直線ではなく長い通電時間のときに短いとくに比してエネルギー能率が単なる 1 次関係(熱伝導損失)で予期される以上に悪い理由は別に考察する必要がある。

図10 a, b, c の場合積分の終点を不連続点までとつては、これより早い時期に通電を止めたとしても、その後になつて発火し得る可能性がある(2.5)。このため測定したエネルギーは大きすぎる可能性がある。もつともその差は大きなものではない。

従来の実験ではしばしば電橋の抵抗約 1 Ω に相当する点火力積(=i²t)を求めているが、通電中の電橋抵抗の増加を無視している。本実験の方法ではこの不明瞭さは残らない。

2.7 の短時間パルスでも 2.8 の長時間通電でも e と i が独立に得られるから e/i で抵抗が算出される。図12に示す。図13は電橋線のみをとり出し、油浴中で加熱しその抵抗を P.O. Box で実測したものである。3種の点火玉の電橋線は同一曲線上にあるので、質には大差がないと想像される。図12と図13より電橋温度が時間の関数として求められる。

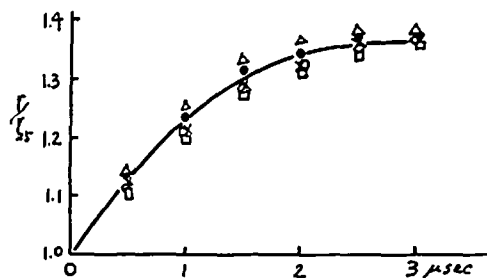


図12 A点火玉用電橋の抵抗と時間関係(5発)

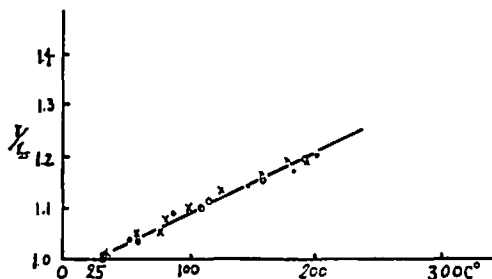


図13 温度による電橋の抵抗変化, ●, A点火用, ○, B点火玉用, ×, C点火玉用電橋の実測, 実線は文献の値1.4より計算

一方 *Seidt* 式による実測エネルギーが初期には電橋線の上に止まっているとすると、その寸法、性質より温度上昇を計算することができる。A点火玉では実測線径の平均値 0.0027 cm, 長さ 0.14 cm, 他の点火玉では実測線径 0.003 cm 長さ 0.2 cm であつた。組成は白金イリジウム (90 : 10) と仮定して比熱と比重を文献値⁽¹⁴⁾ 0.1362 J/g°C/25°C, $\Delta=21.5$ をとり電橋線の熱容量 0.563×10^{-6} cal/°C, 1.0×10^{-6} cal/°C を得、表9の値を用いて温度上昇を計算し表11を得た。

表 11 電橋温度の計算 (°C)

	A点 火玉	B点 火玉	C点 火玉
$e/i(=r)$ 曲線の最終値(最高値)と油浴中実測の抵抗温度関係より	380	370	300
<i>Seidt</i> と電橋線の熱容量より	366	380	340

表によると電橋線温度上昇と電橋線注入エネルギーとによる最高温度は、熱伝導ロスを無視していることを考えるとよく一致しているというべきである。つまりこの仮定は無理でない。

2.8 長時間パルス通電に対する感度曲線(図11)における時間0えの外挿値と μ sec 級パルス通電感度とがよく一致しているのは、この2方法とその結果が正しいことを示している。

電橋通電感度と薬を通ずる高圧火花放電に対する感度とは発火機構が異なるから必ずしも一致する必要はない。

表12で見ると電橋通電感度が火花放電感度より2~5倍鈍感なのは、前者では火薬でない、しかも相当熱容量の大きな白金線を加熱しなければならないとして説明できる。ただし C, D 点火玉で逆になっている理由はよく判らないが、薬の化学的、物理的性質のためか、これと関連して電橋線の触媒作用があるためかと想像されるが、これを明らかにするには別に

表 12 発火に必要な最小エネルギー

種類	火花のとき (mJ)	電橋通電のとき (mJ)
A	0.14	0.80
B	0.62	1.60
C	1.61	1.41
D	8.7	0.78
E	2.99	6.87

研究を要する。

3.3 本実験法の得失

本実験では電圧と電流 i を同時に測定しエネルギーを *Sciatt* 式で計算し、従来の $1/2 CV^2$ 式によらないので、回路抵抗、スイッチでの損失、コンデンサー誘電体の履歴効果による誤差は結果に含まれない。

欠点としては積分の手續きが面倒なこと、1 μ sec/cm 回路の組立、部品、接地点、整合点等に注意を要すること、1 μ sec/cm の単掃引記録可能のオシロスコープ2台または2素子のも1台を要することである。

4. まとめ

5種の電気雷管点火玉と管体との間の絶縁耐力、点火玉自身の絶縁耐力をまず測定した。

つぎに充電したコンデンサーの瞬間放電電流(数 μ sec)を点火玉薬中に火花の形で通じた場合、および点火玉内電橋を通じた場合発火に必要な最小エネルギーすなわち感度値を求めた。さらに長時間電橋通電(msec, decisec)に対する感度値を求め、その時間0えの外挿値は μ sec 通電の場合のエネルギーと一致することを見た。また通電中の抵抗変化を同時に知ることができるので、電橋通電につきその抵抗変化すなわち温度変化を知ることができた。またこれについて検討を試みた。

付記 本実験の一部の試料に関する部分については国鉄信濃川工事局よりの委託研究の報告 AN-FO 装填時に発生する静電気の保安対策について「昭和39年11月、高分子学会、静電気研究委員会、AN-FO 委員会」中の筆者の分担事項を再録させて戴いた。国鉄当局に謝意を表す。

他の部分の試料は日本化薬 K. K. 仁豊野作業所の好意により入手したものである。同社に謝意を表す。

文 献

- 1) B. Lewis, G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosion of Gases p. 390 Academic Press (New York) 橋口, 安全工学 3, 56 (1964)
- 2) 長山, 水島, 工火協誌, 21, 290 (1960), R. M. H. Wyatt, P. W. J. Moore, G. K. Adams, J.

- F. Summer, Proc. Roy. Soc. 246A 189 (1958)
- 3) 高分子学会静電気研究委員会, 国鉄信濃川工事局
に対する研究報告書“AN-FO 装填時に発生する
静電気保安対策について”(昭39)
- 4) 大久保, 水島, 工火協誌 25, 85 (1964)
- 5) 岡崎, 工火協誌, 9, 110 (1948), 10, 169 (1949),
11, 195 (1950), 12, 134 (1951), 木下 *ibid*, 15,
162 (1954), 17, 89, 94 (1956), 山本, *ibid*, 25,
15 (1964), E. Jones, Proc. Roy. Soc. 198 A,
523 (1949)
- 6) 兵庫県商工労働部工業課, 火薬保安教育講習者テ
キスト, p. 38 (昭39)
- 7) 水島, 東工試報, 60, 75 (1965)
- 8) M. V. Blanc, P. G. Guest, G. von Elbe, J.
Chem. Phys. 15, 798 (1947)
- 9) 三田, 衝撃電圧試験の実際 (昭36), オーム 文庫
オーム社 (東京)
試験電圧標準特別委員会・絶縁試験法小委員会,
衝撃電圧測定用分圧器, 電気学会技術報告 No. 56
(昭38)
- 10) 川俣, 電学誌, 82, 1318 (1962)
- 11) W. Roth, P. G. Guest, G. von Elbe, B.
Lewis, J. Chem Phys, J. 19, 1530 (1951)
- 12) 電気学会放電専門委員会, 放電ハンドブック, 電
気学会, p. 43 (1958) 東京
- 13) 中野, 田中, 未発表
- 14) Landolt-Bernstein Table 2-IV, 239 (1951)

Ignition Sensitivities of Beads of Electric Detonators to Spark and Flowing Current

by Yoshinobu Nakano, Yukio Tanaka, Yojiro Mizushima

Five kinds of beads made commercially were tested.

Breakdown potentials between ignition beads and inner surfaces of copper capsules were estimated.

Ignition sensitivities of beads to condenser-discharging spark whose current was critically damped and had several microsecond duration, were determined. The sensitivity, i. e. the minimum ignition energy was calculated from current and voltage of the spark. The current and the voltage were lead from the discharging circuit, and recorded by a CRT and camera.

Sensitivities of beads to current of deci and milli-second duration were also measured. The figure of the sensitivity extrapolated from that of long duration to the one of zero duration coincided with the above sensitivity to the condenser discharging current.

Discussion on energy balance at bridge wire was done.

Data of the minimum energies in mJ are as follows:

kind	of spark	of current flowing
A	0.14	0.80
B	0.62	1.60
C	1.61	1.41
D	9.60	0.67
E	2.81	6.24

These sensitivity data are useful for a safety handling of detonators against hazard by static electricity.