

高速度撮影による電気雷管用点火玉の燃焼に関する研究

(その一)

(昭和28年10月8日受理)

山田正幸・津島敏夫・若園吉一・藤中雄三

(日本化業仁豊野作業所) (京都大学工学部鉱山学教室)

I 緒 言

電気雷管用点火玉を大気中で燃焼させた場合及び密閉管中で燃焼させた場合について、その燃焼状況を高速度撮影機により約3000コマ/秒の速度で撮影し、それらの写真から点火玉の燃焼機構を解明しようとした。又点火玉を Coating した場合と、しない場合の燃焼に及ぼす影響を比較検討した。

II 試料及び撮影装置

1. 試 料

試料として二層点火玉(第一層はゼニトロソルゼン鉛 5mg, 二層はロダアンモン+塩素酸カリ(1:1) 5mg, 何れもコロジオン液膠着)及び二層点火玉を図1Bの如く coating したものを使用した。(以下二点火玉を夫々 coating のないもの、あるものと略称する)

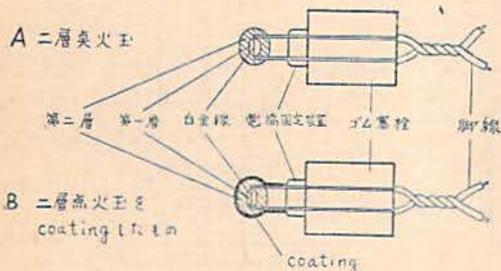
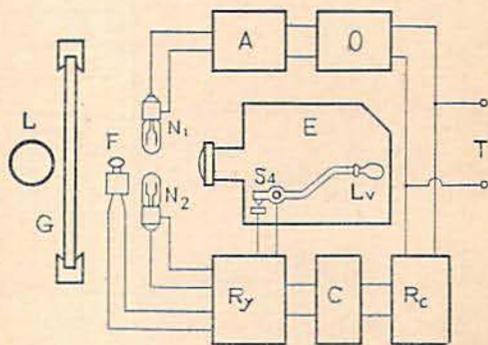


図 1

2. 高速度撮影法

撮影機は福原式 16mm 高速度撮影機¹⁾を使用した。本撮影機内附の刻時装置 (time marker) には小型の同期電動機が使われているが、これは自己起動型であるため軸の摩擦が増す時は、同期速度以下で回転を続けることがあり、この様な状態に陥つてることが簡単に判別出来ないので撮影記録の時間的精度を欠くおそれがある。そこで我々は音叉を時間標準とする

刻時装置を新たに製作した。即ち図2の如く音叉発振器の出力電圧を増幅し、小型ネオングロー管(以下ネオン管と略称する) N_1 を音叉と同一の周波数で点滅させて、これを刻時信号とした。又点火玉へ電流が流れ始めた瞬間を知るため、点火玉と並列の回路に別のネオン管 N_2 を接続した。これら2個のネオン管 N_1, N_2 を撮影画面の一部へ同時に撮影することにより、点火



- T: 電源端子
- O: 刻時信号用音叉発振器
- A: 刻時信号用増巾器
- Rc: 充電用整流器
- C: 点火電源用蓄電器
- Ry: 同期用継電器
- E: 16mm高速度撮影機
- Lv: 始動用レバー
- S4: 同期用スイッチ
- N1: 刻時用ネオン管
- N2: 通電報知用ネオン管
- F: 供試点火玉
- G: 背景すりガラス
- L: 背景用光源

図 2

玉の発火遅れ、燃焼状況の時間的变化等の測定が可能となつた。

撮影は明視野撮影法を採用した。即ち図2の如く、

すりガラスの後方に光源を置き点火玉のバックを明るくして撮影を行った。

本実験はすべて点火電流を一定にするため200Vに充電した蓄電器(500 μ F)を電源とし、点火回路の抵抗を常に200 Ω に調節して、点火電流の初期値を1Aにした。尚、電流値の時間的变化は

$$i = (E/R) e^{-t/CR}$$

の式で表わされ図3の如きものである。

3. 電気回路

電気回路実験装置の電気回路は図4の如きもので、交流電源を変圧器 T_1 , T_2 で変圧し、整流管 V で R_2 を通じて蓄電器 C に充電するのであるが、その充電電圧の調節は R_1 で行う。蓄電器 C が十分に充電されるとネオン管 N_3 が点灯して実験準備の出来たことを示す。この時スイッチ S_2 及び S_3 を閉じれば通電報知

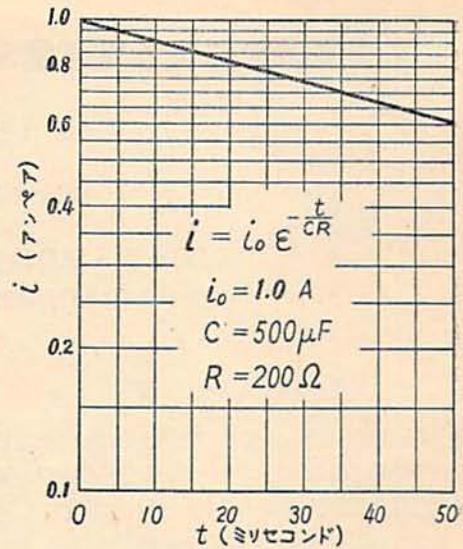


図 3

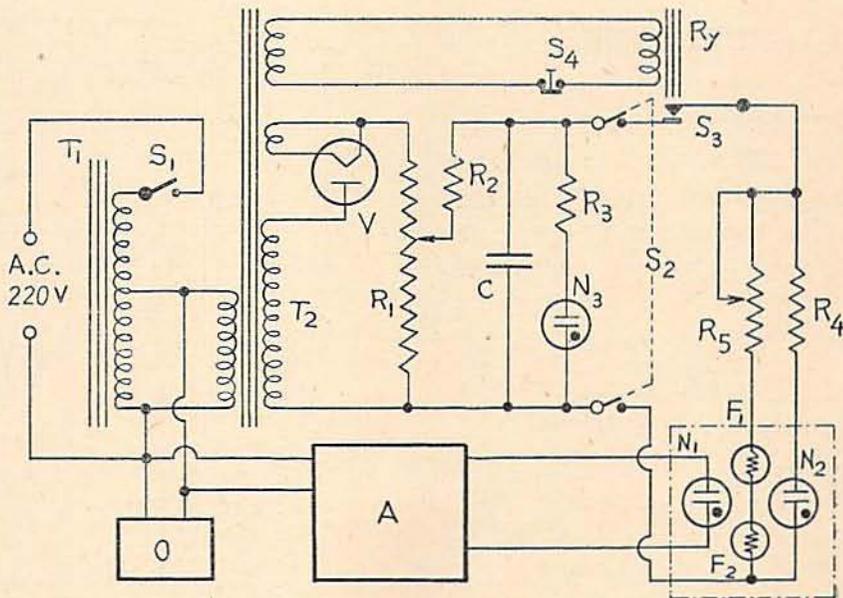
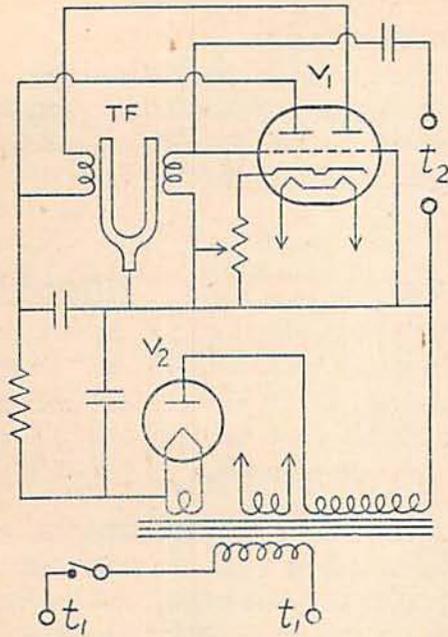


図 4

- T_1 : 220V/100V 変圧器
 V : 整流用真空管
 R_1 : 充電電圧調節器
 R_2, R_4 : 安定抵抗器
 N_1 : 刻時用ネオン管
 N_3 : 充電報知用ネオン管
 O : 刻時信号用管又発振器 (図5参照)
 R_y : 継電器
 S_2 : 点火回路スイッチ
 S_4 : 始動スイッチ

- T_2 : 電源変圧器
 C : 蓄電器
 R_2 : 充電電流制限器
 R_3 : 点火電流調節器
 N_2 : 通電報知用ネオン管
 F_1, F_2 : 供試点火玉
 A : 刻時信号用増幅器 (図6参照)
 S_1 : 電源スイッチ
 S_3 : 自動点火スイッチ (継電器 R_y に附属)
 F_1, F_2, N_1, N_2 は撮影画面内へ配置する。

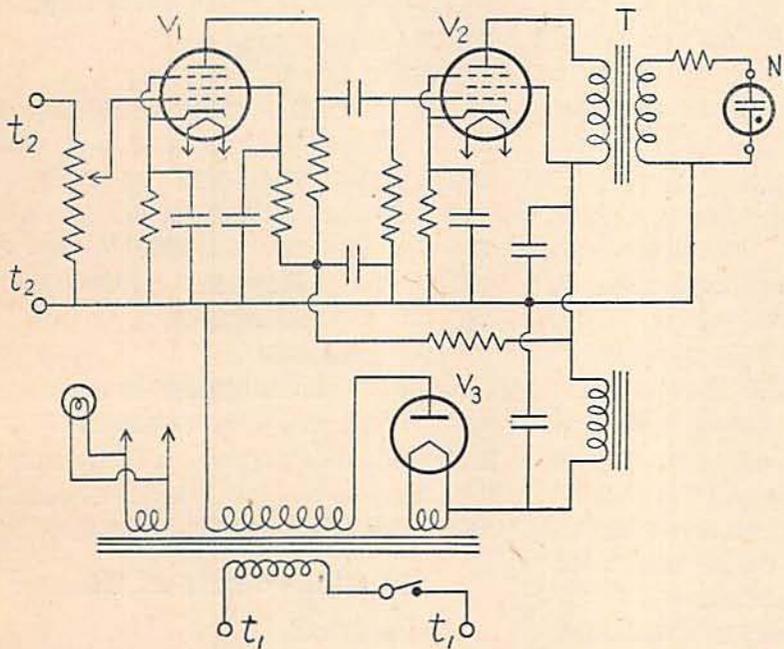


TF: 結合コイル付 800c.p.s 音叉
 V₁: 6SN7GT
 V₂: 12F
 t₁: 電源端子(100V,60b.p.s.) t₂: 出力端子

図 5

用ネオン管 N_2 及び点火玉 F_1, F_2 に放電電流が流れるのであるが、 S_3 は継電器になっており S_4 を開くことによつて点火回路が閉じるようになってゐる。 S_4 は高速度撮影機のレバー L_r (撮影を始動させるためのもの。図 2 参照) に取り付けられてゐるから撮影開始後、継電器によるわずかの時間遅れの後、通電開始となる。図中 R_4 はネオン管の安定抵抗器、 R_5 は点火玉に流れる電流の初期値 (1A) を調節するための抵抗器である。 O 及び A は夫々音叉発振器と増幅器であつて電気回路は図 5、図 6 に示す通りである。

音叉発振器 O は 800 サイクルの小型音叉を双三極真空管の陰極結合方式と組み合わせたもので、その出力電圧を増幅器 A で増幅してネオン管 N_1 を発光させる。実験に使用したネオン管 N_1, N_2, N_3 の放電開始電圧は 0~70V 位であるが、撮影画面に含まれる N_1, N_2 は通常の暈光放電では、この撮影には露出不足となるので、弧光放電をも含む程度の放電状態にまで電流を増加して輝度を高めることにした。このため N_2 に対しては直列抵抗 R_4 を小さくし、 N_1 に対しては増幅器 N を用い、且つその利得調節を行つて任意の輝度が得られるようにした。尚 N_1 の点滅は交流 (800 サイクル/秒) によるものであるから N_1 の両極が 1/1600 秒毎に夫々交互に発光する。又商用交流の周波数は実験



N_1 : 刻時用ネオン管
 T: 出力変圧器
 V_1, V_2 : 6SJ7
 V_3 : 12F
 t₁: 電源端子
 (100V60c.p.s.)
 t₂: 入力端子

図 6

の都度周波数計で測定した。

4. フィルム

フィルムは16mm Ansco panchromatic film を使用し、メトール単液の強力現像薬で30°C、2分間の処理により最も好結果が得られた。

III 大気中で燃焼させた場合

1. 実験(その一)

最初に予備実験として各点火玉を大気中で燃焼させた場合について撮影を行った。その結果は写真第一及び写真第二の如きものである。(撮影速度は各々2880コマ/秒, ms は millisecond の略)

1) 二層点火玉(写真第一)

写真①は燃焼前即ち通電開始前で画面の中央が点火玉、上方のネオン管が刻時用、下方のものが通電報知用である。写真②は下方のネオン管が光つた時、即ち通電開始の瞬間でこの時をもつて0ms(第1コマ)とする。第1コマより第14コマ迄は変化が表面に現われていない。写真③(第15コマ, 通電開始後4.9ms)で点火玉中央が白く光つて変化を起し始め、引き続き写真④(第16コマ, 5.2ms)で点火玉の先端部が破裂して欠け、これが写真⑤(第17コマ, 5.6ms)で粉末となり遠方に飛散する。写真⑥(第25コマ)即ち通電開始後8.3msで白金線附近より始めて火焰が発生して次第に大きくなり、写真⑦(第28コマ, 9.4ms)では点火玉前方に拡がり成長して、写真⑧(第49コマ, 16.7ms)に至つて火焰が最大となる。その後は衰えて小さくなり(写真⑨), 写真⑩(第92コマ, 31.6ms)では焰は全く消えて煙が残る又白金線は切れずに光っている。

2) coating した二層点火玉(写真第二)

写真①は1)の場合と同様に通電開始前で、写真②は通電開始(第1コマ, 0ms), 写真③(第16コマ, 5.2ms)に至つて始めて点火玉の表面に変化が起り、写真④(第17コマ, 5.6ms)で先端部が欠けて粉末となり飛散する。写真⑤(第21コマ, 6.9ms)で欠けた残りの凹部より発火を開始し、写真⑥(第23コマ, 7.6ms)を経て写真⑦(第88コマ, 30.2ms)で火焰最大となり、以後は写真⑧(第113コマ, 38.9ms)の如く漸次衰え写真⑨(第143コマ, 49.3ms)で焰が消える。写真⑦及び⑧の如く火焰が前方へ細長く伸びて燃焼していることは、coating のある点火玉の燃焼に特有なもので、これを我々は仮に壺突状燃焼と呼んでいる。

尙 coating した点火玉で乾燥不十分な場合は、通電後約140msでもまだ燃焼を継続し、その間火焰は不規則に大きくなつたり、小さくなつたり或いは火花が

飛散したりして一定しない。

2. 考察(その一)

1) 及び2)の場合各回の撮影結果は表1の如きもので、 t_f は通電開始後点火玉の表面に変化を確認出来た最初の時間、 t_i は着火を始めた時間、 t_{max} は火焰が最大となつた時間、 t_e は燃焼完了時間である。

表 1

二層点火玉	coating なし			coating あり		
変化開始 (t_f)	4.9	5.7	6.7	4.6	5.2	5.4
発火開始 (t_i)	8.3	7.8	9.9	8.9	6.9	7.5
火焰最大 (t_{max})	16.7	22.4	15.8	14.6	30.2	25.0
燃焼完了 (t_e)	31.6	36.0	29.9	45.6	49.3	54.9

(注) 単位: millisecond

この表に示す通り点火玉に電流(初期値1A)を通ずると5ms前後で変化を起し始め、先端部は粉末となつて飛散した後、7~9msで着火し、15~30msで火焰最大となり、以後は衰えて燃焼完了は30~50msである。又 coating の有無による差異は次の通りである。

i) 発火遅れ

いずれも通電開始と同時に発火せず数msの後、始めて発火する。即ち通電後白金線により点火玉の第一層がガス化膨脹し、一部が粉末となり飛散した後、始めて残部より発火するのであつて coating の有無による差は殆んど認められない。

ii) 発火方向

coating のない点火玉の場合には、発火直後、火焰は必ずしも前方へのみ進行するとは限らないが(例えば写真第一, ⑥)では側方より燃焼している)

直ちに全表面に伝播して凹部に拡がる。これに反して coating を施した点火玉は飛散後凹型となり、その凹部にある白金線附近より着火して、焰は前方へのみ長く伸びいわゆる壺突状燃焼を起す。

iii) 燃焼継続時間

coating のない点火玉の燃焼継続時間は30ms前後であるのに比較して、coating のある点火玉の燃焼継続時間は長く、50ms前後である。これはii)に於いて述べた如く coating のために火焰が点火玉の全表面に伝播せず、前方へのみ進行するからである。

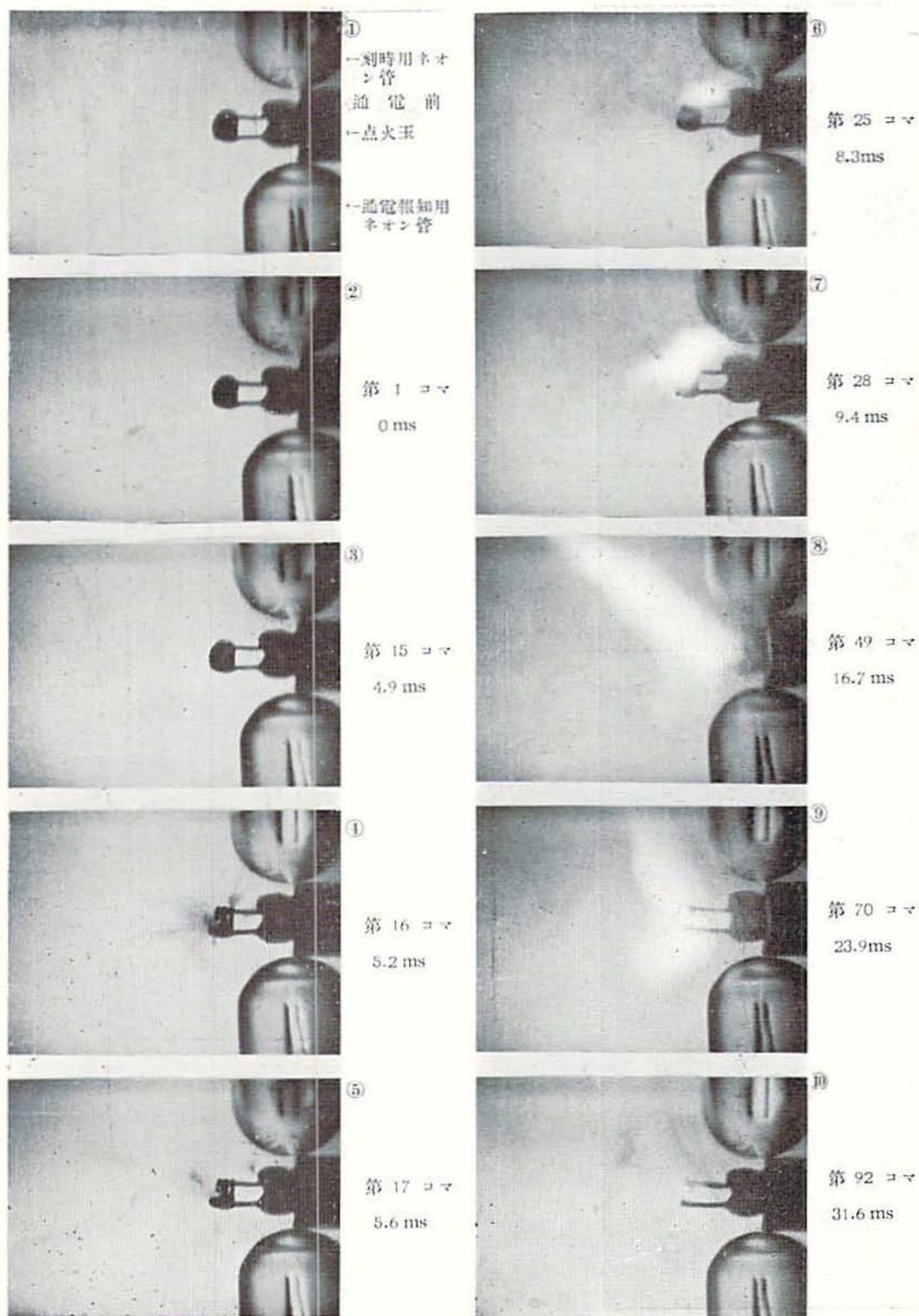
IV 密閉管中で燃焼させた場合

1. 実験(その二)

点火玉を雷管中の状態に近づけるために密閉管中で燃焼させた。即ち図7の如く内径6mmの石英管に夫

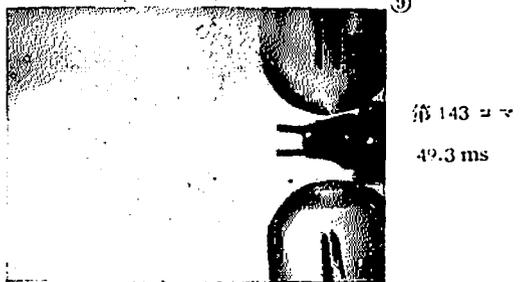
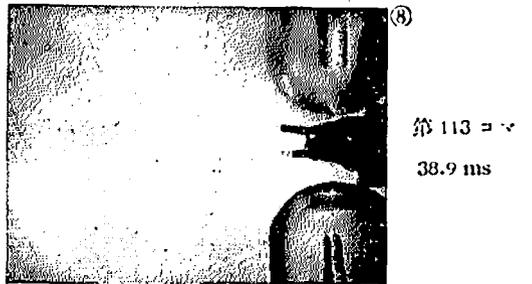
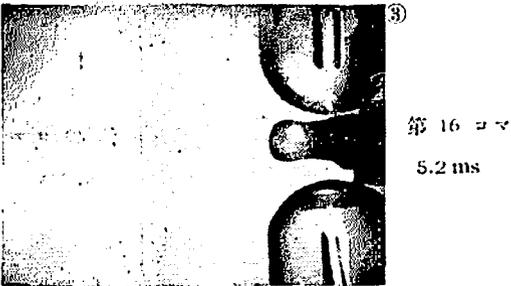
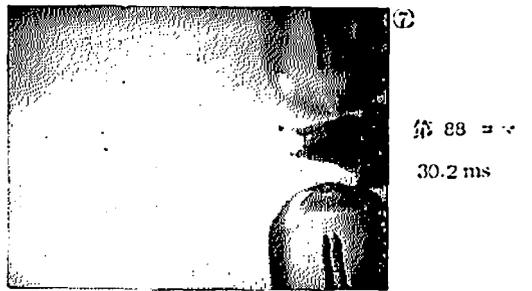
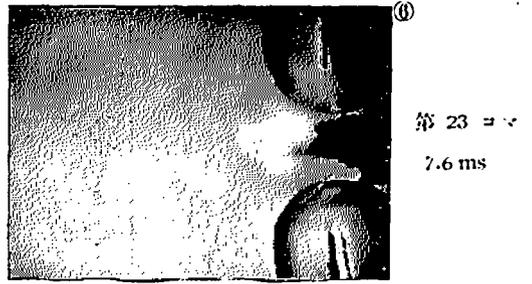
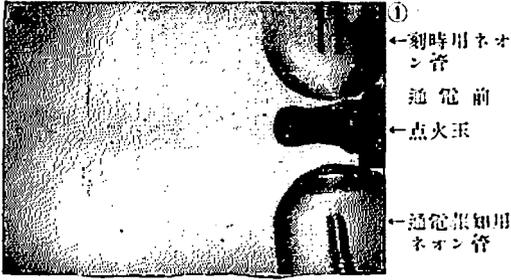
写真第一 (coating のない点火玉)

2880 コマ/秒



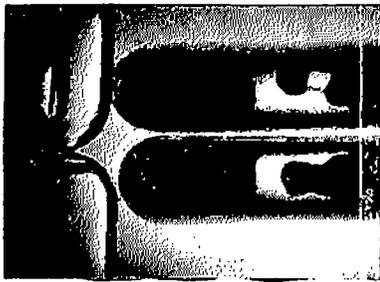
写真第二 (coating のある点火玉)

2880 コマ/秒

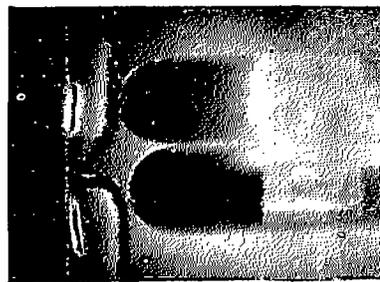


写真第三（有孔板のない場合）

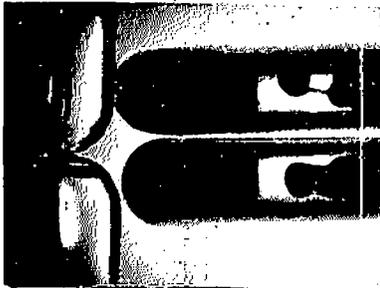
2960 コマ/秒



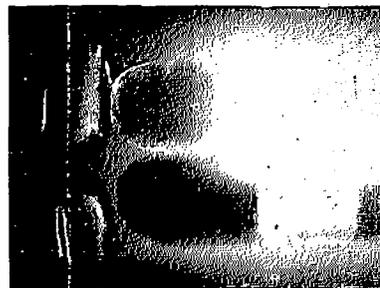
(1) ←coating なし
通電前
←coating あり



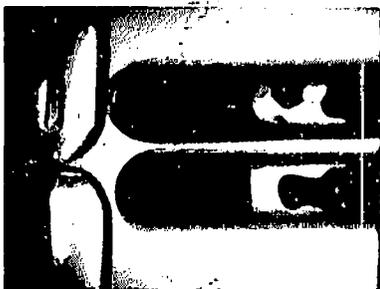
(6) 第 20 コマ
6.4 ms



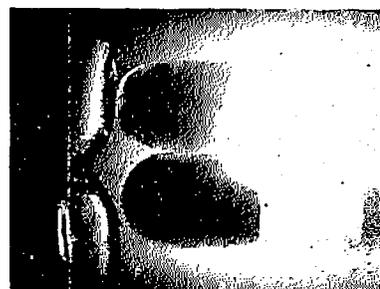
(2) 第 1 コマ
0 ms



(7) 第 22 コマ
7.1 ms



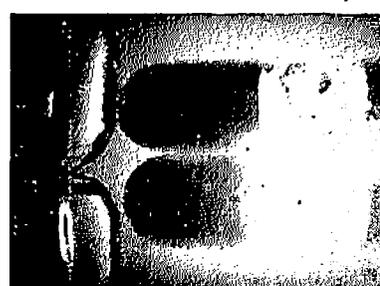
(3) 第 14 コマ
4.4 ms



(8) 第 25 コマ
8.1 ms



(4) 第 16 コマ
5.1 ms



(9) 第 30 コマ
9.8 ms



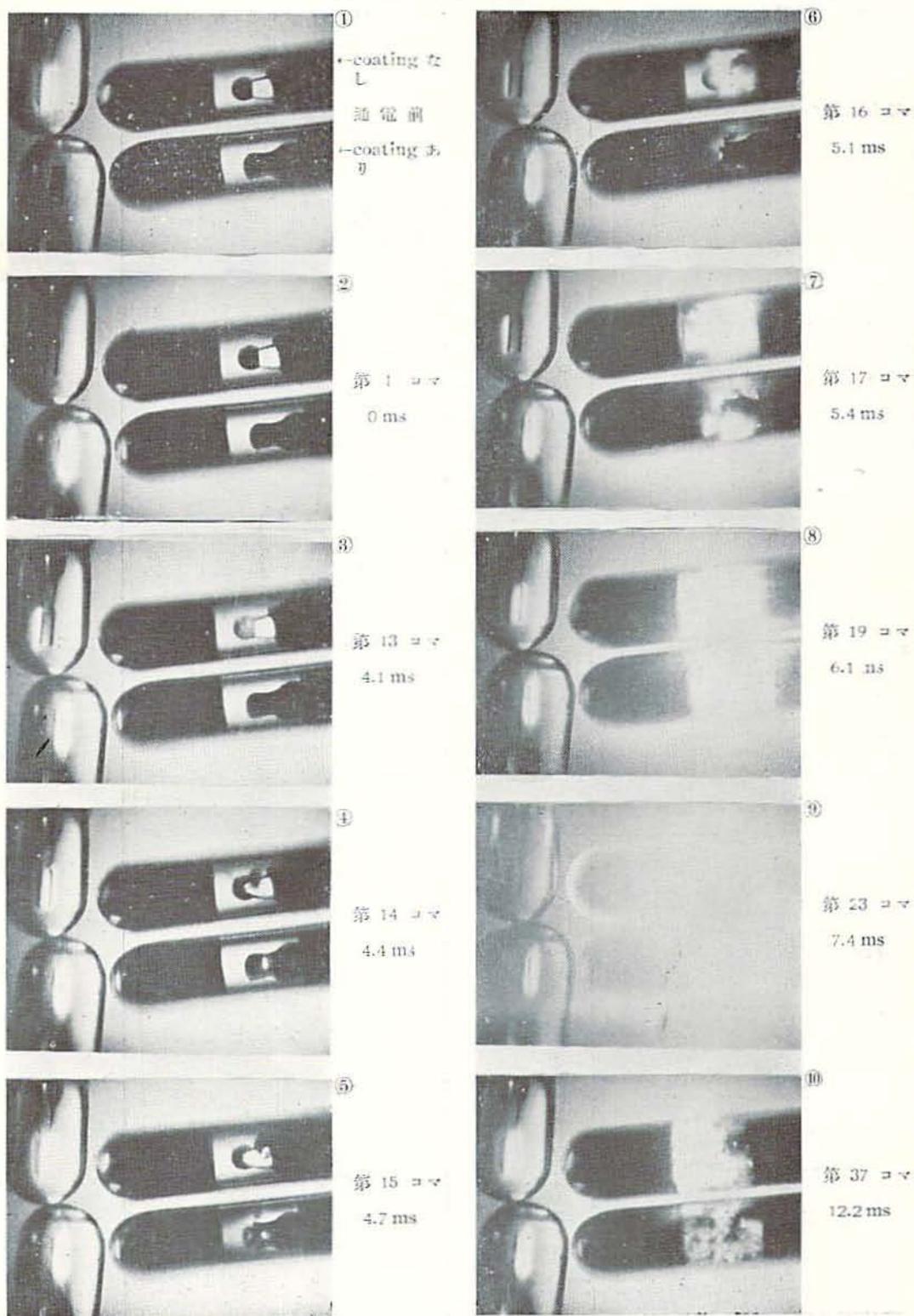
(5) 第 17 コマ
5.4 ms



(10) 第 64 コマ
21.3 ms

写真第四 (有孔板のある場合)

2960 コマ/秒



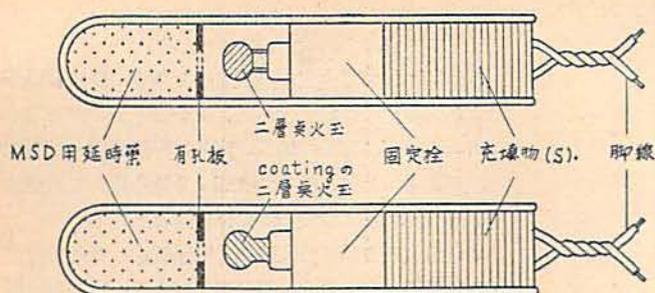


図 7

々ミリ秒雷管用延時薬と共に各点火玉を封入し、同時に点火させて着火の状態を比較撮影した。その結果は写真第三、第四の如きもので、写真第三は有孔板（後述）のない場合、写真第四は有孔板を付した場合である。（撮影速度：2960コマ/秒）

1) 有孔板（延時薬押え）がない場合（写真第三）
 写真①は通電開始前での上のネオン管が刻時用、下のネオン管が通電報知用であり、又上の石英管中の点火玉は coating のないもの、下の石英管のものは coating のある点火玉である。写真②は通電開始時のもので、下のネオン管が光っている。これを 0ms（第1コマ）とする。写真③（第14コマ、4.4ms）で coating のない方に変化が現われ始め、写真④（第16コマ、5.1ms）で発焰開始しているが、coating の点火玉は、まだ変化がない。写真⑤（第17コマ、5.4ms）で coating のない方は火焰が延時薬面に到達し、写真⑥（第20コマ、6.4ms）で coating の方は始めて変化が現われている。写真⑦（第22コマ、7.1ms）では coating のない方は火焰最大となり、ハレーションを起している。一方 coating の方はここで発焰を開始し、写真⑧（第25コマ、8.1ms）で火焰が延時薬面に到達して、写真⑨（第30コマ、9.8ms）で火焰最大となり、coating のない方は衰え始めている。いずれの点火玉も延時薬には

既に着火している管であるが、画面には現われていない。両点火玉の焰が殆んど消えている頃（写真⑩；第64コマ、21.3ms）延時薬燃焼管がわずかに現われている。

2) 有孔板（延時薬押え）がある場合（写真第四）

ミリ秒雷管には延時薬と点火玉の間に有孔内管（延時薬押え）が挿入されているので、内管が延時薬着火に及ぼす影響を観察した。内管では点火玉が外部から見えないので延時薬面に内管と同じ点火孔を持った銅板（有孔板）を附し、1) の場合と同様に両点火玉を燃焼させ撮影した。

写真①は開始前での有孔板は厚さが薄いため写真では認め難い、写真②は通電開始（第1コマ、0ms）、写真③（第13コマ、4.1ms）で coating のない方が変化し始め、写真④（第14コマ、4.4ms）に至り後端部で粉末が飛散している。coating の方はここで始めて変化を起し、写真⑤（第15コマ、4.7ms）で先端部が欠けて粉末が飛散している。写真⑥（第16コマ、5.1ms）で coating のない方は後部より発焰開始して、写真⑦（第17コマ、5.4ms）で火焰が延時薬面に到達、一方、coating の方は発焰開始し、写真⑧（第19コマ、6.1ms）で火焰が延時薬面に到達している。写真⑨（第23コマ、7.4ms）で両点火玉共火焰最大となる。（ハレーションを起している）以後火焰は次第に衰え、写真⑩（第37コマ、12.2ms）で既に延時薬に着火していると思われるが、1) の場合と同様、写真では認め難い。

2. 考 察（その二）

密閉管中の各場合についての撮影結果は表2の通りである。

この表より、通電後点火玉が変化し始める時間々は coating のないものは 4.0~5.4ms であり、一方、

表 2

二 層 点 火 玉 有 孔 板 (延時薬押え)	coating なし											
	無				有				coating あり			
	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有
変 化 開 始 (t_f)	4.0	4.4	4.9	5.4	4.1	4.9	5.0	4.9	6.4	7.0	4.4	4.5
発 焰 開 始 (t_e)	5.0	5.1	6.3	6.4	5.1	5.2	5.5	3.6	7.1	7.6	5.4	5.2
火 焰 延 時 薬 面 に 到 達 (t_R)	5.3	5.4	6.6	7.1	5.4	5.6	5.7	5.9	8.1	7.8	6.1	5.6
火 焰 最 大 (t_{max})	7.3	7.1	8.0	8.8	7.4	6.3	8.3	7.3	9.8	9.2	7.4	6.3
燃 焼 完 了 (t_c)	55.3	30.8	42.7	37.2	29.7	26.7	38.0	36.4	17.2	23.0	26.0	24.3

(註) 単位：millisecond

coating のあるものは $4.4 \sim 7.0$ ms で range が大きい様である。又発焰開始時間 t_i , 火焰到達時間 t_R , 及び火焰最大時間 t_{max} も略々同様である。

以上の実験結果より次の事が考えられる。

i) 延時薬着火開始時間

延時薬の着火は点火玉の火焰が延時薬面に到達した時間 t_R と火焰最大時間 t_{max} との間に行われると考えられるが、現に述べた如くハレーションにより測定不能であつた。

ii) 有孔板の影響

有孔板の有無による延時薬着火の差異は本実験に於いて j) と同様の理由により認められなかつた。

iii) 大気中で燃焼させた場合との比較

大気中の燃焼と比較して、密閉管中では発焰開始時間 t_i が早くなり、更に火焰最大時間 t_{max} は大気中の場合の約 $\frac{1}{2}$ に短縮されており、又火焰最大時を中心とした約 $5 \text{ } \mu\text{m}$ (1.5ms) の間はハレーションを起している。これは点火玉の薬室容積が小さいから急激に温度及び圧力が上昇し発焰開始が早くなり、且つ狭い空間に浮遊している飛散粉末にも殆んど同時に着火し爆燃するためと考えられる(粉体爆発)。

V 総 括

初電流 1A で点火玉を燃焼させた場合の高速度撮影による実験結果を総括すると、次の如きものである。

1. 点火玉は通電開始後、直ちに燃焼せず一部粉末となり飛散した後、始めて残部より焰を發して燃焼する。即ち発焰迄には数 ms の発火遅れがある。

2. 点火玉の燃焼は大気中と密閉管中とでその状況を異にし、後者の場合は飛散粉末により一種の粉体爆発を起す。

3. coating を施した二層点火玉は、coating のない二層点火玉に比較して発火遅れの range が少し大きい。

終りに臨み本研究につき種々御指導、御援助を賜つた京都大学教授平松良雄、後藤廉平両先生に対し、厚く御礼申し上げる。尙、撮影には松木健三氏の協力を戴いた。記して深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) 福原達三：応用物理 10. 110 (昭16)
- 2) 北川徹三：消焰理論の研究 (未発表)

寄 書

爆薬による衝撃破壊変形下の最大歪の分布

(昭和 28 年 10 月 1 日受理)

桜 井 武 尙

(日本油脂武豊工場)

I 爆薬による実験

一つの物体の両側に左右対称に爆薬を置いて衝撃したとき、その物体中央に特異な亀裂が生ずることは先に述べたが、この亀裂は左右から圧縮応力波として進行して来た衝撃波の衝突の結果引き起された張力にもとづくことは容易に想像される。この現象を利用して、爆薬による様な動的な変形に於ける歪の分布を靜的なそれと比較してみた。

被衝撃物体として鉛を用いたが、従来の実験のよう

な円柱とせず、断面が正方形の角柱を準備する(正方形の一边は 37mm, 長 14cm)。次にこれを四方溶接した鉄板で作つた四角形の容器の中央に封じ、その両側に 300g づつ爆薬を装填する。そして 2 本の同じ長さの導線線で点爆する。

強い爆薬例えば新調ダイナマイトでは、この四角柱は完全に中央からちぎれ飛ぶが、白梅ダイナマイトであると、円柱の実験で見られた様な形状の亀裂が見られる。桂ダイナマイト、紫カーリットも美しい亀裂を残した。けれどもこのちぎれ飛ぶものと亀裂として残るものとの中間の威力を示す様な爆薬によると、今ま