

電気雷管点火玉の発火について

(昭和34年9月4日 受理)

加藤 清 視

(日本化業株式会社折尾作業所)

I. 緒 言

点火玉の発火は電橋に電流を通じその発熱により温度 T_0 (室温)より見掛けの発火点 T に達した後発火することはよく知られている。通電開始より発火する迄の時間 t は電流値及びその波形 (加熱速度)、電橋の材質、直径、長さ、点火薬、電橋及び点火薬の熱伝導度等に左右される。

綿業式点火薬の加熱の状況は岡崎氏¹⁾が測定され、電橋の抵抗変化による電流変化を電磁オツシログラフに記録しこれを解析したが、この方法では電磁オツシログラフのドラム回転数がおそいので低電流の場合しか測定されない欠点を持っている。点火玉式の発火の状況も同様な寸法で筆者等も測定したが同様に記録出来た。陰極線オツシログラフを使用すれば比較的大きい電流でも測定される。

然しながら従来の如き測定方法では電橋に加える電圧を一定にした方法であるから、抵抗変化と共に電流も変化し精度が悪い欠点を持っている。

本研究ではこの点を改良しサイラトロン (TX-15) により点火電流を一定に保ちながら点火玉に通じ、その時の抵抗変化による電圧変化をシンクロスコープで撮影し、これにより電橋の点火玉加熱状況、断線の状況、点火時間、断線時間、線径の点火時間、点火温度への影響を調べた。

II. 実 験

2.1 測定方法

測定方法は図一に記してあるがサイラトロンの調

極に 250V の電圧を印加し通電電流を抵抗 R で調節し、起動パルスによりサイラトロンを働かせ電橋 r に所定電流を通電する。この際 $R \gg r$ であれば点火電流は不変であると考えてよい。従つて電橋の電圧変化を測定すれば抵抗の変化が精度よく得られる。今電橋に加わる電圧を v とすれば

$$v = ir(1 + \alpha T) \quad (1)$$

である。ここで i : 点火電流, r : 電橋抵抗, α : 電橋の抵抗温度係数, T は電橋温度である。(1)式で i , α が夫々一定であれば v の変化を求めれば T の変化が求められる。故に取る試料について得られたオツシログラフより電橋の温度変化が分かるから、点火薬の加熱状況の解析が出来るわけである。なお点火玉は開放状態で測定した。

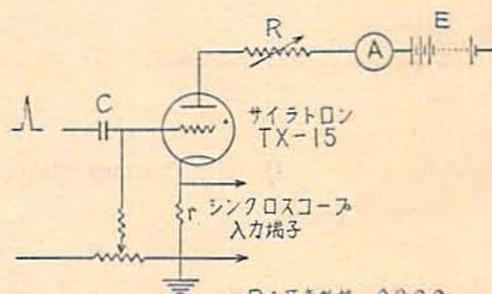


図-1 測定装置

R: 可変抵抗 300 Ω
r: 電 橋 0.7 ~ 0.2 Ω
A: 電 流 計
E: 電 池 250V

2.2 試 料

a) 電 橋 (表一)

表一

試 料 No.	1	2	3	4	5	備 考
線 径 mm	0.0287	0.0327	0.0406	0.0434	0.0500	万能投影機使用
断 面 積 mm ²	6.59×10^{-4}	8.46	12.94	14.79	19.63	
抵 抗 Ω/m	401.7	341.4	217.7	190.4	142.9	16°C, L-3型抵抗測定器
成 分	Pt-Ir=88%-12%					

表-2

薬種	配 合	薬 量
ジニトロソ ゾルシン鉛系	第1薬：ジニトロソゾルシン鉛/純薬=100P/5P 第2薬：ロダン鉛/KClO ₃ /純薬=50P/50P/10P	7~10mg
トリシネート系	トリシネート/薬綿=100P/5P	7~10mg

b) 点火薬 (表-2)

c) 点火玉の構造

点火玉は bead 式で a) b) を組合せて作り、電橋の鍍層長は $1.75\text{mm} \pm 0.15\text{mm}$ を基準とした。

2.3 点火時間、断線時間、及び臨界エネルギー

シンクロスコープより得られた電圧の変化の一例を写真1, 2, 3に夫々示す。写真1はジニトロソゾルシン

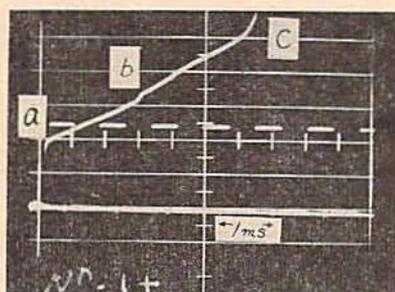


写真1 ジニトロソゾルシン鉛系

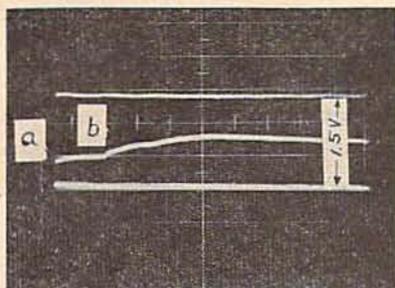
 $i=1.5\text{A}$ $\phi=0.0287\text{mm}$


写真2 ジニトロソゾルシン鉛系

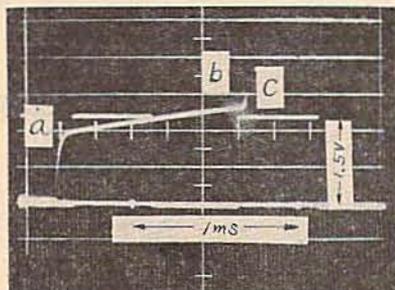
 $i=1.0\text{A}$ $\phi=0.0134\text{mm}$


写真3 トリシネート系

 $i=1.5\text{A}$ $\phi=0.0287\text{mm}$

鉛系点火玉の電圧変化で電橋径 0.0287mm 、点火電流 1.5A の場合である。写真2は同じくジニトロソゾルシン鉛系点火玉であるが電橋径 0.0134mm 、点火電流 1.0A の場合でこの場合は電橋の熔断が起っていない。写真3は点火玉がトリシネート系で電橋径 0.0287mm 、点火電流 1.5A の場合である。

先づ写真1について観察するとa点に於て通電開始すると電圧は時間と共に直線的に上昇しb点で急激に変化が起り更に上昇曲線を描きながらc点で電圧が0となつている。この電圧の変化よりb点で点火玉は発火し電橋を加熱するために抵抗の増加を来したものと考えられ、又c点で電橋は熔断されたものと思われる。従つて曲線 a-b が電橋の温度上昇即ち点火玉の加熱状況を示し時間 a-b が略々点火時間に相当する。曲線 b-c が曲線 a-b より傾斜がやや急な点は点火薬の発火による加熱と露出された電橋の空気に対する熱損失が少ないため電橋自身の温度上昇が大きくなったためと解される。時間 a-c は熔断時間とする。これらの現象は点火電流、線径によらず皆同様な記録を得た。しかし点火電流により熔断しない場合は写真2の如く b-c 曲線が趣を異にし、点火玉の発火による焔が空气中に拡散されて終つと定常的になり電橋の温度はある一定温度となる。

一方、トリシネート系の場合は曲線 a-b はジニトロソゾルシン鉛系に比し直線性が良くかつb点、c点が接近して居る。恐らく燃焼速度が早いために電橋が点火玉の発火と同時に吹き飛んで回路が切れているものと思われる。

上記の様に点火時間、断線時間を定義してオシログラムより測定しかつ臨界エネルギー ($i_2 R t$) を計算したのが表-3 である。

表-3 より次の事が判明する。

(1) 点火時間は線径の小さい程短く、即ち鋭敏であり、同一電橋では点火電流の大きい程短い。

又線径が $4.34 \times 10^{-2}\text{mm}$ 以上で、 $i=0.7\text{A}$ 以下では発火しないがバラッキが大きくなる。

(2) 断線時間は点火時間に比してジニトロソゾルシン鉛系は2~3倍大きく、トリシネート系では殆んど同一である。

表-3 点火時間, 断線時間, 臨界エネルギー

電橋径(長さ)		0.0287mm($l=1.90$ mm)				0.0327mm($l=1.79$ mm)				0.0406mm($l=1.73$ mm)		
点 電	火 流	点火薬	$r(\Omega)$	$t_e(\text{ms})$	$t_B(\text{ms})$	$E(\text{mj})$	$r(\Omega)$	$t_e(\text{ms})$	$t_B(\text{ms})$	$E(\text{mj})$	$r(\Omega)$	$t_e(\text{ms})$
0.7(A)	D	$n=3$ 0.783 (0.026)	5.84 (0.87)	23.0 (5.1)	2.24	$n=2$ 0.598 (1.11)	8.00 (1.60)	28.7 (2.3)	2.34	$n=1$ 0.412	33	
	T	$n=3$ 0.737 (1.00)	8.03 (0.83)	8.03 (0.83)	2.90	$n=3$ 0.667 (0.012)	12.2 (0.8)	12.2 (0.8)	3.99	—	—	
1.0	D	$n=3$ 0.791 (0.098)	2.32 (0.52)	9.23 (1.00)	1.84	$n=3$ 0.598 (0.040)	3.76 (0.62)	13.7 (4.1)	2.25	$n=3$ 0.384 (0.014)	8.07 (0.20)	
	T	$n=3$ 0.728 (0.045)	3.14 (0.27)	3.14 (0.27)	2.29	$n=3$ 0.643 (0.115)	4.21 (0.32)	4.21 (0.32)	2.71	$n=3$ 0.397 (0.041)	11.71 (4.12)	
1.5	D	$n=3$ 0.814 (0.152)	1.48 (0.80)	3.64 (0.71)	2.71	$n=3$ 0.555 (0.086)	1.61 (0.57)	5.66 (1.26)	2.01	$n=3$ 0.357 (0.081)	4.21 (1.17)	
	T	$n=3$ 0.734 (0.044)	1.09 (0.12)	1.09 (0.12)	1.80	$n=3$ 0.625 (0.085)	1.81 (0.41)	1.81 (0.41)	2.55	$n=3$ 0.368 (0.060)	4.77 (0.20)	

電橋径(長さ)		0.0406mm($l=1.73$ mm)		0.0434mm($l=1.67$ mm)				0.0500mm($l=1.60$ mm)				
点 電	火 流	点火薬	$t_B(\text{ms})$	$E(\text{mj})$	$r(\Omega)$	$t_e(\text{ms})$	$t_B(\text{ms})$	$E(\text{mj})$	$r(\Omega)$	$t_e(\text{ms})$	$t_B(\text{ms})$	$E(\text{mj})$
0.7(A)	D		51	6.66		不発火				不発火		
	T		—	—	$n=1$ 0.305	101	101	15.09		不発火		
1.0	D		37.2 (27.0)	3.10	$n=3$ 0.310 (0.060)	13.3 (6.7)	50.8 (31.0)	4.12	$n=3$ 0.224 (0.012)	36.3 (13.7)	73.9 (38.3)	8.13
	T		11.71 (4.12)	4.65	$n=3$ 0.322 (0.058)	18.0 (2.5)	18.0 (2.5)	5.80	$n=1$ 0.231	56	—	12.94
1.5	D		16.04 (3.81)	3.38	$n=3$ 0.296 (0.025)	5.44 (0.85)	22.87 (3.40)	3.62	$n=2$ 0.232 (0.042)	9.59 (2.17)	34.0 (8.5)	5.00
	T		4.77 (0.20)	3.95	$n=3$ 0.346 (0.025)	5.91 (0.86)	5.91 (0.86)	4.60	$n=3$ 0.229 (0.02)	10.9 (1.1)	10.9 (1.1)	5.61

D: ジニトロソルソルシン鉛系 T: トリソネット系 r: 電橋抵抗(室温) t_e : 点火時間
 t_B : 断線時間 E: 臨界エネルギー l: 電橋長(計算値) ()内: 偏差

(3) 臨界エネルギーは線径の大きい程大きい。又ジニトロソルソルシン鉛系の方がトリソネット系より一般に小さい。

(4) 電気雷管の発射の場合はトリソネット点火玉の方が不利である。(断線時間が短い)

Pt-Ir 合金線の抵抗温度係数 α を求めるために線径 0.0327mm のものの 15°C~500°C 迄の範囲で抵抗変化を測定した結果表-4 を得た。

α の計算

測定値より測定方程式を作り, 最小二乗法で規準方程式を計算すれば

2.4 電橋の温度係数

表-4 温度による抵抗変化

試料長	15°C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	備考
$l=105$ mm	39.5 Ω	40.5	42.1	43.5	45.3	47.0	48.8	50.1	52.0	53.5	54.9	実測値
	39.3	40.5	42.2	43.8	45.8	47.2	48.9	50.5	52.2	53.9	55.9	計算値

表-5 点火温度及び熔断温度

電橋径		0.0287mm				0.0327mm				0.0406mm	
点電	点火薬	R_{te} (Ω)	R_{tB} (Ω)	T_{te} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{tB} ($^{\circ}\text{C}$)	R_{te} (Ω)	R_{tB} (Ω)	T_{te} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{tB} ($^{\circ}\text{C}$)	R_{te} (Ω)	R_{tB} (Ω)
0.7(A)	D	1.048	2.06	377	(1,710)	0.740	0.972	406	880	0.592	0.722
	α	37.2%	153.6			36.5	79.3			43.6	75.2
	T	0.987	—	378	—	0.894	—	373	—	—	—
	α	33.6	—			33.7	—			—	—
1.0	D	1.13	2.248	469	(2,320)	0.843	1.94	452	(2,380)	0.591	1.116
	α	41.8	208			40.9	214.4			52.6	192.6
	T	1.00	1.197	403	657	0.865	0.994	386	490	0.612	—
	α	37.5	59.1			34.7	44.1			54.1	—
1.5	D	1.20	2.302	464	(2,150)	0.847	1.820	540	(2,025)	0.540	6.29
	α	41.8	193.6			48.6	182.6			52.9	303
	T	1.025	1.196	439	740	0.896	0.968	464	717	0.576	0.643
	α	39.4	66.5			43.4	64.6			48.6	81.1

電橋径		0.0406mm		0.0434mm				0.0500mm			
点電	点火薬	T_{te} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{tB} ($^{\circ}\text{C}$)	R_{te} (Ω)	R_{tB} (Ω)	T_{te} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{tB} ($^{\circ}\text{C}$)	R_{te} (Ω)	R_{tB} (Ω)	R_{te} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{tB} ($^{\circ}\text{C}$)
0.7(A)	D	486	836	—	—	—	—	—	—	—	—
	α	—	—	0.501	—	414	—	—	—	—	—
	T	—	—	37.2	—	—	—	—	—	—	—
	α	—	—								
1.0	D	600	(2,190)	0.500	0.797	673	(2,015)	0.343	0.477	630	(1,310)
	α			58.5	181.6			56.6	117.8		
	T	601	—	0.512	0.588	654	703	—	—	—	—
	α			58.7	63.3						
1.5	D	592	(3,370)	0.479	1.021	579	(2,520)	0.394	0.966	793	(3,975)
	α			52.0	227			71.4	352.8		
	T	538	900	0.544	—	633	—	0.376	0.557	711	(1,500)
	α			63.6	—			64.4	135.0		

R_{te} : t_e に於ける抵抗 R_{tB} : t_B に於ける抵抗 T_{te} : t_e に於ける計算温度
 T_{tB} : t_B に於ける計算温度 α : 抵抗増加率(%)

$$R = 38.83525 + 0.03249t$$

$$= 38.83525(1 + 0.000836t) \quad (2)$$

を得る。故に

$$\alpha = 0.000836(\Omega/^{\circ}\text{C})$$

となる。表-4 の計算値はこの α より計算した値である。

2.5 点火温度、熔断温度

表-3 及びオツシログラムより t_e, t_B に相当する抵抗を計算し、夫々に於ける温度を求めたのが表-5 である。但し熔断時の抵抗温度係数は 2.4) 項で求めた

ものよりはるかに大きくなつていられるのでこの α を使用することは不適當であるが参考のために () をつけて記載した。表-5 より

(1) 点火時の電橋温度は一定ではなく、線径即ち断面積に比例して温度は上昇し、又点火電流の場合も同様に高くなつていられる。点火時の電橋温度はこの実験の範囲内では $370^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ であつた。

(2) 点火時の抵抗増加率は線径に比例して大きくなり大体 $+40 \sim 70\%$ である。

(3) 電橋断面積と点火温度は殆んど直線関係となる。

Ⅲ. 点火温度について

E. Jones 氏²⁾によれば点火玉の発火に要する臨界エネルギー E は点火時間 t_0 に直線的に比例し $t_0=0$ のときの E を E_0 とすれば

$$E_0 = Gl \quad (3)$$

と表わしている。ここで G は電橋単位長当りのエネルギー、 l は電橋長である。更に G と電橋断面積 a との間には

$$G = K + La \quad (4)$$

なる関係のあることを指摘している。 K, L は常数。(3) (4) 式より

$$\begin{aligned} E_0 &= Kl + Lal \\ &= Kl + Lv \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。ここで $v=al$ 即ち容積である。(5) 式の右辺の第1項の物理的意味は実際の点火に必要なエネルギーであり、第2項は電橋の持つエネルギーである。

今、表-3 より各電橋に於ける a, l, E_0 を計算しこれより G を求め a と G との関係を図示すれば図-2 を得る。(但しジネトロソルソルシン鉛系のみ)

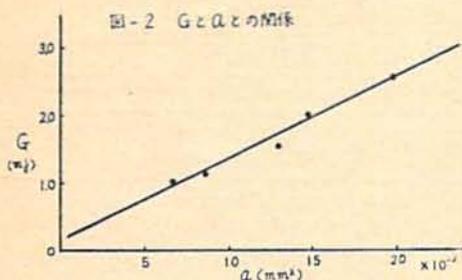


図-2 は断面積 a と G とは直線関係にあることを示し (4) 式の成立することを表わしている。従つてこれから L, K を求めることが出来る。

Pt-Ir 合金線の比熱 C_{Pt} を $0.032 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ とすれば比重が 21.5 であるから換算すると $0.688 \text{ cal/cm}^3^\circ\text{C}$ となる。一方 $L=1.18 \text{ mJ/mm}^3$ であるから cm^3 当りに換算すると $1.18 \text{ J/cm}^3 = 271 \text{ cal/cm}^3$ となる。故に Pt-Ir 合金線の温度を T_0 とすれば

$$T_0 = L/C_{Pt} = 271/0.688 \approx 394^\circ\text{C}$$

となる。

さて実際の点火玉の電橋温度は加熱速度 dT/dt の大小で変る。表-5 より電橋温度は線径に比例して高

くなり又同一線径では点火電流に比例して高くなつてゐる。点火時間は線径に比例し点火電流に逆比例してゐる。ここで点火時間について考えて見ると点火電流が大きくなれば単位時間当りの発熱量が大きくなるので見掛けの発火点に達する時間は短縮されるはずであるから実験結果は妥当であることが理解される。

しかるに電橋温度については点火電流が大きいと点火温度が高くなつてゐる点が納得出来難い。これは抵抗の急激な変化を来たす点を発火した瞬間と仮定したこと問題が残るのかも知れない。又電橋径については径の大きい程電橋温度が高くなつてゐるがこれは発生熱量と損失熱量の関係より解釈出来る。即ち木下氏³⁾によれば熱損失を B とすれば

$$\begin{aligned} B &= 4\lambda_1 a \frac{T-T_0}{l} \\ &+ (T-T_0) 2\pi\lambda_2 l / 2.3 \log d_2/d_1 \end{aligned} \quad (6)$$

で表わしているから熱損失 B は $l = \text{const}$ であれば断面積 a に比例する。故に a が大きい程供給熱量 iR は小さくなりかつ熱損失 B は大きくなるために点火迄の時間がかかるわけである。但し d_1, d_2 ; 夫々電橋径及び点火玉線径、 λ_1, λ_2 ; 夫々電橋及び点火玉の熱伝導率 T_0, T ; 夫々室温及び発火点、 l ; 電橋長。

ジネトロソルソルシン鉛系の温度上昇速度を各線径のものについて計算すれば表-6 を得る。

表-6 線径と温度上昇速度 ($^\circ\text{C/ms}$)

i (A)	mm 0.0287	mm 0.0327	mm 0.0406	mm 0.0434	mm 0.050
0.7	64.6	50.8	14.7	不発火	不発火
1.0	202	120	74.3	50.6	17.4
1.5	313	335	140.5	106.4	82.8

次に点火時間 t_0 と電橋温度 T との関係について赤崎氏⁴⁾は電橋抵抗 R を一定、電橋の熱容量 C, K を常数とすれば

t_0 が比較的大きい時

$$T = E(1 - e^{-Kt_0})/CKt_0 \quad (7)$$

t_0 が非常に小さい時

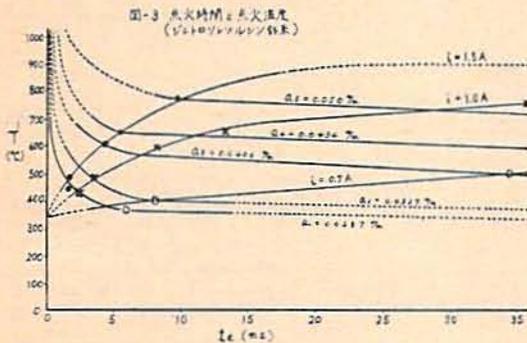
$$T \cong E/C \quad (8)$$

と述べている。(7) (8) 式より t_0 と T との関係は t_0 が小さい時は立上りが急で t_0 が比較的大きい時は右下りの曲線になることが示される。

これより表-5 に得られた各電橋径に於ける t_0-T 曲線を描けば図-3 を得る。同時に点火電流と点火温

度及び線径との関係も求めた。(但しジネトロソルソル鉛系のみ)

図-3によれば点火電流の大きい方が見掛けの点火温度は大きく、又線径の大きい方が大きいことが分る。又 $t_e=0$ の限界条件の場合は各点火電流に於ける t_e-T 曲線は縦軸上の一点に収斂される様でありこの点が真の発火温度を示すものと思われる。(図-3からは約 350°C が計算される)



IV. 結 論

本実験より得られた事柄を要約すると次の通りである。

(1) 本測定法は点火電流をサイラトロンを用い一定にし点火玉の発火の状況を電橋の抵抗変化に置換して間接的に測定する方法であるがこの方法でかなりよく点火玉の燃焼状況を推定することが出来る。

Ignition of the Fusehead

by Kiyomi Kato

The ignition of fuseheads in electric blasting caps has been studied by E. Jones, S. Kinoshita and others. In this paper, fuseheads are ignited by a constant direct current. For this purpose, a thyratron (TX-15) was used. The current was applied to the fusehead which consisted of fine bridge wire (Pt-Ir alloy) and ignition composition. The resistance of the bridge wire when the constant current is applied becomes higher in proportion to the bridge temperature.

This bridge wire circuit is put into the cathod ray oscillograph which draw the variation of resistance with voltage. As the ig-

(2) 点火玉の中でもジネトロソルソル鉛系の様な比較的緩やかに発火するものとトリシネート系の如く急激に発火するものとは電橋に与える影響に差があるため電氣雷管の設計の場合には考慮しなければいけない。特に発火と同時に電橋を吹飛ばすようなトリシネート系では密発に使用する電氣雷管用としては断線時間が短いので不利であり充分大きい点火電流を供給することが大事である。

(3) 電橋径、点火電流により見掛けの点火温度は異なり、電橋径、点火電流共小さい程点火温度は小さい。

(4) 又同一点火電流では電橋径が小さい程点火時間、点火温度が小さい。

(5) 本実験の範囲内では得られた点火温度はジネトロソルソル鉛系で約 $370^{\circ}\text{C}\sim 670^{\circ}\text{C}$ 、トリシネート系で約 $370^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ であつた。

本稿を終るに当り種々御指導を戴いた九州大学工学部助教授赤崎正則氏、及び実験を担当して戴いた当所横山宏、早川哲夫両君に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 岡崎一正：工火協，10，4 (1950.3).
- 2) E. Jones：Pro. Roy. Soc. Vol. 198 (1949).
- 3) 木下四郎：工火協，15，3 (1954.4).
- 4) 赤崎正則他：昭33年電氣四学会連合大会No. 737.

niter a composition of lead dinitrosorsorcinate or lead trinitrosorsorcinate is used, and as the bridge the fine Pt-Ir alloy 0.0287~0.05mm in dia. is used and ignition current of 0.7, 1.0, or 1.5Amp. are applied.

The result of this experiment shows that the apparent ignition temperature is not constant, but is influenced by the diameter of bridge wire and ignition current.

In this experiment the apparent ignition temperatures is in the range of $370\sim 640^{\circ}\text{C}$ for lead dinitrosorsorcinate, and $370\sim 800^{\circ}\text{C}$ for lead trinitrosorsorcinate in various conditions:

(Orio Factory, Nippon Kayaku Co., Ltd.)