

点火玉の燃焼特性に関する研究

第1報 点火玉の火焰温度測定

水島 容二郎*・沢田 継男**

1. 緒言

点火玉は工業用電気雷管の最重要構成部分で、その内部の電気抵抗線が通電により加熱されると、これを包んでいる点火玉は化学反応を起し発熱し、高温の気体又は固体粒子を発生し、そのエネルギーを延時薬又は起爆薬に与え、次段階の反応を起させるものである。

従つて通電による点火玉の変化は、延時薬又は起爆薬の着火を支配し、ひいては電気雷管の電流電圧発火感度、斉発感度、起爆能等に連なるものである。従来より高速度写真等^{1) 2)}による研究はあるが、発生する高温物質の性状、温度等に就ては何ら知見がない。これはその測定が困難なため、重要であるに拘らず実施されなかつたのであろう。我々はこれを Na-D 線反転法で測定したので報告する。

2. 実験

2.1 点火玉の性状

点火玉は中央に直径 0.032 mm、長さ 2 mm の抵抗約 0.7 Ω の白金イリジウム合金 (Pt 88% Ir 12%) 線が通してあり、その両端は直径 0.42 mm の 2 本の

銅線の両端に鉚着してある。この 2 本の銅線は透明プラスチックブロック (塞栓) を通じて保持されて居り、その先は軟質塩化ビニール被覆脚線となつている。

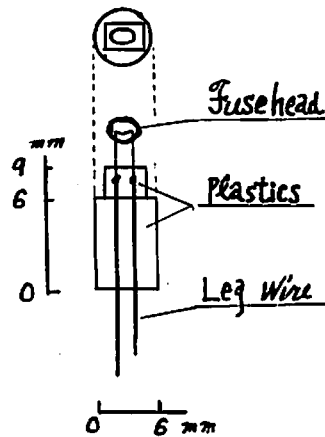


Fig. 1 Construction of the fuse heads assembly

点火玉の化学組成は Table 1 に示す。

Table 1 Construction of the fuse head

Kind of the fuse head	Composition and constituent		Weight (mg)
DDNP system (One layer)	Homogeneous	DDNP 90%, aerosil 10%, nitrocellulose+5%	4.5~5.5
Rohodanate system (Two layer)	Inner part	Lead dinitrosoresorcinate 100%, nitrocellulose+10%	7~9
	Outer part	Lead rhodanate 50%, } kaliumchlorate 50% } nitrocellulose +5%	

2.2 発火状況

通電により発火する時は、空中開放状態で、ロダン鉛系は高さ 20~30 mm の黄色炎をあげ、且固体粒子の飛散をともないつつ、爆音を発することなく燃焼

し、DDNP 系では高さ 10~20 mm の火花燄光茫を発生し、且小爆音をともなう。実用雷管内の空間と等しい形の空間を有するメタアクリルパイプ中では、双方共炎が瞬間的に管内に充満する。これは肉眼観察及び Fastax 16 mm 高速度カメラによる撮影で明らかである。この際爆轟状態になつているかどうかは不明で

* 昭和40年12月4日受理
東京工農試験所第7部 神奈川県平塚市新宿
日本化薬仁倉野作業所 兵庫県姫路市豊富町

ある。

2. 3 発光スペクトル

点火玉炎の温度測定法としては遠隔測定が可能な光学的方法が最も望ましいが、実施するためには先づその発火の本性を知らなければならぬ。このため英弘製

中型石英分光器で発火スペクトルを撮影した。点火玉は一端開放の銅管に入れ通電し開放端より噴出する炎の光をレンズでスリット上に集光し、数発から10発の重複露光を行ない、スペクトル表³⁾を参照して Table 2 の結果を得た。

Table 2 Observed spectrum of the burning flames of fuse heads

Fuse heads	Species	Upper part of the flame	Lower part of the flame
DDNP system		Continuous band (very weak)	
Rhodanate System	CN	Red (5, 2), (4, 1), (6, 1)	(4, 1), (8, 2)
	CuO	6161Å	6161Å
	C ₂	Swan (2, 4), (4, 6), (3, 4)	Swan (0, 1)
	PbO	A (0, 4), (0, 3), B (0, 3), (0, 2), (1, 1), (1, 2)	B (0, 2), (1, 1)
	S ₂	5419Å, 4989Å
	Na	D	D
	Pb	4058Å	4058Å
	K	4047Å, 4044Å	4047Å, 4044Å
		Continuous band	Continuousband

この結果でログン系では発光体は気体であり、且強い Na-D 線を発散するので、測温に Na-D 線反転法が適用出来ることがわかる。大気中 DDNP 系では肉眼視測で炎を発生せず、スペクトルの性質からも、発光は加熱した固体炭素粒子の熱放射と考えられるので、反転法はそのままでは適用出来ない。

2. 4 発火時間と通電々流値

次に予備実験として点火玉の発光遅れ時間、強度、継続時間等を測定した。

2. 4. 1

測定試料の点火玉と受光光電管(マツダ MS-9S 増倍管)箱の窓との間隔は 967 ± 2 mm にした。光電管箱の窓にはオパール乳白ガラスをつけ方向性を減じた。但しこのガラスの分光透光率は測定していない。標準光源には電気試験所検定済のガス入単平面シングルコイルフィラメント電球を $2,848^\circ\text{K}$ (色)(781cd.) に点じ $2,070 \pm 2$ mm 光電管箱窓より離して置く。装置全体は暗室に置いたが、壁面は黒色塗装でないので、反射による誤差はあり得る。光電流による $30 \text{ k}\Omega$ 負荷抵抗の電圧降下は Tektronix オシロスコープ 535-CA に導き、光跡はライカ型カメラで記録した。光電管の電源は自作の定電圧放電管を基準にした直結 2 段増幅電子安定化回路より供給した。成るべく電源インピーダンスを低くし、光電管回路の抵抗は総て高周波用のものを用いた。この系の時間レスポンスが $2 \mu\text{sec}$ より早いことは次のようにして確めた。Tektronix オシロスコープ 555-DA-K の一方の電子ビー

ム駆動入力に信号を加えず自由反復掃引をさせて置き、ブラウン管面上に黒紙を半分張り、軌跡の右半分のみ現われるようにし、成るべく離れた光電管箱(前述のもの)の窓に正対させる。光電管出力は同じブラウン管の他の電子ビーム駆動入力端子に加え、双方の電子ビームを上記の同一時間掃引信号で掃引させる。この時後者のビームのフレの開始位置は、信号の遅れを示し、傾斜(ライズタイム)はこの光電系の高周波特性を表わす。Fig. 2 参照、この時ブラウン管

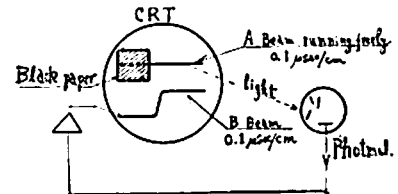


Fig. 2 Measuring method of the time response of the electro-optical system

ムの発光物質が電子ビームを受けてから発光する迄に時間を要する筈で、この時間は信号のズレ及びライズ時間に含まれるから真の電気光学系に於ける遅れはこの実測遅れ時間より小さい筈である。実測のズレ時間は $0.2 \mu\text{sec}$ 程度であり、ライズタイムは $2 \mu\text{sec}$ である。従つて本電気光学系はこの値より遙かに悪くてよいのであるから、そのためには充分な性能である。通電回路には可変抵抗の外に 0.01Ω の横河電機製標準抵抗を挿入しここに発生する電圧降下を上記オシロ

スコープで記録することにより電流値を求めた。電源は大容量(120AH)の鉛蓄電池である。

2. 4. 2 試料の状態

ロダン鉛系点火玉と DDNP 系点火玉(主として 4~6 mg, 時には 14~16 mg のものも用う)の脚線を固定した硝子管を通じて保持し、(イ)空中で(ロ)実用雷管と同じ容積、形状を有するようにメタアクリル管に入れ(ハ)同じ管体であるが底を開放したものに入れ(ニ)実用銅雷管管体に納め、但し葉面に相当する面を解放したもの、に直流 10.2A を通じた。測定の方法は常に管軸に直角とした。

2. 4. 3 測定結果

結果は Table 3, Fig. 3 に示す。

Table 3 Duration and maximum intensity of light emission from burning fuse heads

Condition	Sample (mg)	Duration (msec)	Intensity (cd)
In open air	DDNP 5	6.6	0.7
	DDNP 10	10	0.6
	DDNP 15	15	1.0
	Rhodanate 8	17	43
In Cu cap without bottom	DDNP 5	2.5	12
	Rhodanate 8	11	150
In plastic pipe without bottom	DDNP 5	3.7	10
	Rhodanate 8	16	238
In closed plastic pipe	DDNP 5	6	210
	Rhodanate 8	9.7	180

両点火玉共密閉されると明くなる。DDNP 系は特にその傾向が強い。

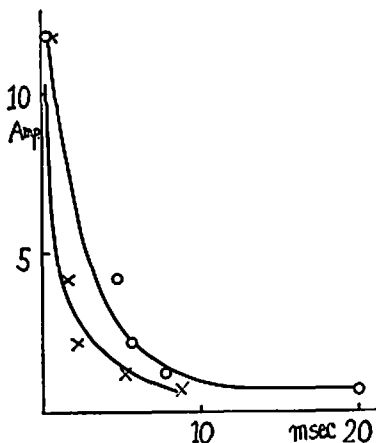


Fig. 3 Initial current through bridge wire vs. time of beginning of light emission; x.....DDNP fuse head, o.....Rhodanate fuse head

2. 5 温度測定

2. 5. 1 原理

詳細な一般論は前に述べたので省略する。そこで述べたように、Na-D 線反転測温法実施の際にたとえ、Na-D 線が炎の発散スペクトル中に無くても、媒粒子による熱放射があれば測温に差支えなく、これは媒の反射率を無視出来るからであると述べたが、反射率が無視出来ない場合は検討を要する。2.3 項に述べたように DDNP 系の場合固体粒子の熱放射とも見られるので、最悪の条件で全く気体又は媒が無く、固体粒子のみと考えられる。その時は DDNP の粒子は褐色で、黒体で無いから、その有限の反射率のため次項の補正計算を要する。見掛けの温度 T_1 と真温度 T_2 の間には次の Wien 式が成立する。

$$\ln e_2 = \frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

茲に e_2 は温度 T_1, T_2 附近での放射率=1-反射率である。

室温の DDNP (純度は不明, 97~98%)の粉末の分光反射率を GE 分光度計⁵⁾で測定した処次の結果を得た。但し標準試料にバライト紙を用い 100% としたので、得た反射率は僅か大きく出ている筈である。

Table 4 Reflectance of DDNP by GE spectrophotometer

Wave length (m μ)	400	450	500	550
Reflectance	2.5	6.0	8.8	11.6
Wave length (m μ)	589	600	650	700
Reflectance	16.3	17.0	21.4	33.0

この Na-D 線に於ける反射率を用い前式で計算し、DDNP 粒子の真温度値 T_2 と輝度温度値 T_1 の関係を求め、Table 5 の結果を得た。

Table 5 True ($T_2^\circ\text{K}$) and brightness ($T_1^\circ\text{K}$) temperature of DDNP

T_1	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
T_2	1,007	1,109	1,210	1,312	1,414	1,516
T_1	1,600	1,700	1,800	1,900	2,000	
T_2	1,618	1,721	1,823	1,923	2,029	

一般に加熱により反射率は小さくなる。換言すれば放射率は大きくなるが、DDNP が酸素不足の組成であるから一部で炭化すれば尚この傾向は大きくなる。

従つて加熱時には T_1 と T_2 の差は尚小さい筈である。併し一応 Table 5 の値を採用し、これを曲線化して置き、測定値は総て真値 (T_2) に換えて記載することにす。

2. 5. 2 測定法の光学系

比較光源は 2,000°K 以下では東芝製バンドランプ、より高温ではタングステンアークランプを(30W)用い、その電流輝度温度関係を求めて置き、且赤色フィルターの有効波長と Na-D 線波長に於けるタングステンの放射率の差と集光用単玉レンズの透過率が 100% でないことによる補正を計算して、曲線にして置き、総ての測定値に就て補正することは前報⁹⁾同様である。又時にはセロファン膜 (Na-D 線での透過率 73%) や石英窓が存在することによる見掛けの比較光源の温度低下に就ても同じ取扱いをした。この透過率は GE 分光光度計で実測した。

集光レンズで比較光源の実像を測定空間に作り、この像を更にリレーレンズでモノクロメーターの入射スリット上に結ばせる。集光レンズは単玉のため、分光透過率が波長の複雑な両数とならないので計算が容易である。そのため色収差は存在するが、像の中心部のみを用いて周辺の色分離を避けた。測定場所は光束の通路即ち直径 3 mm の水平の円柱状空間で点火玉との間隔は 3~10 mm である。モノクロメーターは Kipp-Zohnen 製全反射系ダブルモノクロメーターでナトリウムランプで波長校正をした。スリット幅は常に 0.5mm とした。

モノクロメーター出口スリットに密接させた光電子増倍管の出力電流を 30 k Ω の負荷抵抗に通じ発生する電圧降下を Tektronix オシロスコープ 555-DA (バンド幅 DC~20 Mc) に導き、光跡をカメラで記録する。掃引速度は 1 msec~10 msec/cm である。この時の検出限度は光電管ノイズで決まり、前置増幅器の増幅度によるものでないことは実際に認められた。使用した光電系は 2.4 項の光度測定に使用したものと略々同じだが、オパール硝子窓は除去した。

一方通電々流を知るため 2.4 と同様の方法で記録し参考にした。全体の略図を Fig. 4 に示す。

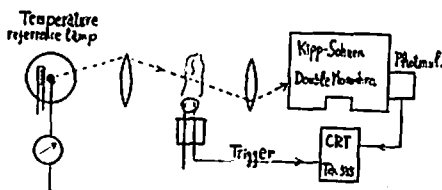


Fig. 4 Schema of the temperature-measuring system

2. 5. 3 試料と測定条件

保持法は 2.4 光度測定と同様であるが、これを次の 6 条件下で測定した。装置全体は室内に在るので、温度は室温である。Fig. 5 参照

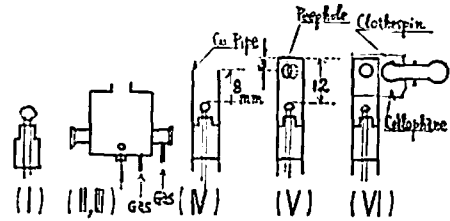


Fig. 5 Condition of ignition

(I) 大気中自由燃焼：ロダグ系は炎大きく、測温は容易であつた。DDNP では炎と云うより火の粉の飛散で、光量小で測定極めて困難であつたが、2 個を合わせ、同時発火で測定可能となつた。

(II) 大容器中で酸素内：容積 6 l, 石英窓 2 個を有し中心部を見透せる構造の自作銅板製蓋付円筒容器を用い、ポンベの酸素を流しながら測定した。測定視野、スリット、レンズの相互関係位置は発火毎に必ず点検した。

(III) 大容器中でアルゴン内：(II) と同様でアルゴンを流した。DDNP では発火回数が少く、又光が弱いため信頼出来る数値を得るに到らなかつた。

(IV) 一端開放の銅雷管々体使用：試料は管体に取り、開放端より点火玉頭部迄の距離を 8 mm とした。測定箇所は管体に近い空間とした。この点は略々葉面に相当する。この方法ではロダグ系、DDNP 系共に大きな (炎高さ 2~3 cm) を発生する。

(V) 底の在る管体使用：点火玉頭部先端と管底との距離を 12 mm とし、実用雷管での葉面との距離に等しくし、底部より 3 mm の処に直径 3 mm の孔を 2 個設け、比較光束が通過するようにした。モノクロメーターの入口スリット上にこの孔の実像を作る。

(VI) (V) と同様であるが、管体をセロファンで一重に巻き、実用雷管の密閉状態を実現させた。比較光束はセロファン窓を通る。点火後このセロファン窓は破れずに残るが、点火玉の分解生成物が付着し、光の通過を妨げているのがわかる。但しオシログラム上では (V) の場合と時間的強度的に大差がなく、従つて測定炎の在る時には未だ汚染されず、炎が冷却してから、セロファン窓の汚染が起ると考えられる。Table 6 参照。化学変化が略完了した頃から後、生成物の沈着が始ると考えるのは常識的である。従つて汚染は測温値に大きな影響を及ぼさないと推定される。DDNP

Table 6 Ignition of fuse head in copper capsule with small peepholes

Fuse head	Current through bridge wire		Cellophane on peepholes	Time of darkening of sight through peepholes (msec)		Self-luminosity			
	Amp.*	Duration (msec)		Beginning	Rise time	Beginning (msec)	Duration (msec)	Max. intensity (arbitrary unit)	
DDNP System	5~6	0.5	None	0.65	0.05	1.	0.2~0.3	7.	
				0.65	0.05	1.			
	0.65	35 37	None	7.	1.	10.	1~2	3.	
				8.	1.				
				Yes	8.	1.	8.	0.5	20.
					8.	1.	7.5		
Rhodanate System	5.6	0.5	None	1.0		12.	5.	19.	
				0.8	0.4	7.5	10.	48.	
				0.7	0.5	7.5	12.	40.	
	5.6	0.6	Yes	1.	0.4	5.	5.	3.	
				1.	0.6	9.	7.	5.	
	Ca. 0.65	26.	None	7.5	1.5	17.	12.	34.	
				7.5	1.0	15.	10.	75.	
				50.		14.	10.	38.	
				25.		13.	15.	85.	
		56.	Yes	7.	0.5	18.	3.	12.	
40.				0.5	13.	4.	11.		
55.					13.	5.	15.		

* Initial values are shown, actually they dropped to their half values at the end of duration.

系ではセロファン窓は薄く煤で、ロダン系では濃く金属鉛層で汚染する。

Table 6 に示された特徴は次のようである。

通電々流の大きさ(数 A より 0.5A 迄)は光通過阻止物質発生と自発光の開始時間(1msec~10msec)に直接関係している。この時セロファン膜の有無は関係しない。セロファン膜が窓に有る時は無い時に比して、ロダン系では自発光の発生時期には影響ないが、継続時間が短くなる。

DDNP 系では影響がない。自発光の最大強度は、セロファン膜があると、DDNP 系では大となり、ロダン系では小となる。これは両者の反応様式が異なることを示している。ロダン系では反応が完全に終了しない前にセロファン窓が汚染されるか、又はセロファン膜の存在で反応終了が早くなったことを示す。前者の場合は測温結果に影響することも有り得るが、前述の

ように少くとも化学反応の後で汚染する筈であるから、その可能性は少い。

2. 6 測定結果

2. 6. 1 再現性

本法によると基準にする温度既知の比較光源温度より高いか、低いかの判定が1回の炎で得られるのみで、測定としては比較光源の温度を変えつつ数回の発火を行ない、上下限の間隔を狭く後結果が得られる。この温度間隔を或限度以上小さくすると上下限の判定結果が逆になる場合が生ずる。これは同一の炎で繰返し実験することが出来ず、常に異なる炎の測温をしているため、炎の温度差は有り得るし、又炎の形状が必ずしも同一でないで、異なる場所に就て測温する可能性も大きい。従つて測温法としては成るべく同じ条件で数回~数十回発火し、上下限を成るべく狭くするよう努める外はない。

オシログラムの1例を Fig. 6 に示す。

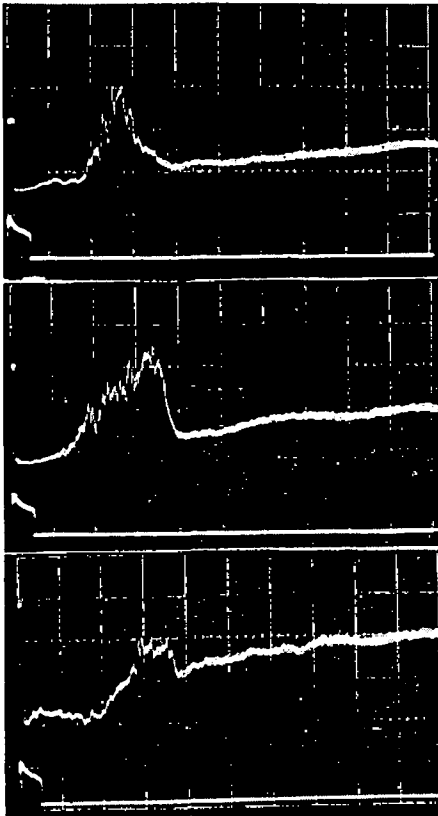


Fig. 6 Examples of oscillogram; upper beam trace indicates temperature difference between that of the flame of the rhodanate fuse head and that of reference lamp (5 msec/div.). The lower trace indicates the current through the bridge wire (1 msec/div.). The temperature of the reference lamp are 1,690°K in the case of (a), 1,730°K in the case of (b), and 1,784°K in the case of (c). The flame temperature is proved to be nearly 1,730°K.

上限下限を狭ばめて測定値を決定する1例を Fig. 7 に示す。

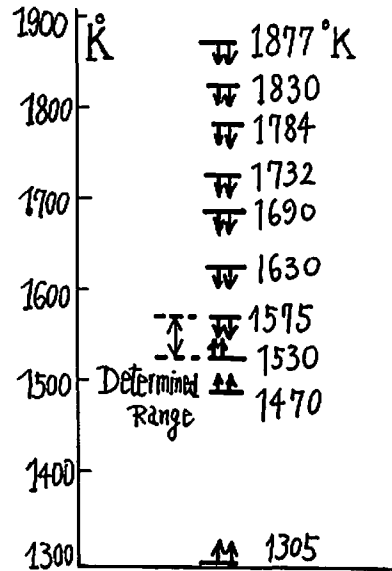


Fig. 7 An Example of determining temperature; rhodante fuse heads burning in air, (current was 0.61A). Each arrow means one ignition.

2. 6. 2 電流値と炎温度の関係

電流値の大小によつて炎温度に差が生ずるか否か検討した結果の一部を Table 7, 8 に示す。

これらの表は電流値変化による温度の変化が殆どないことを示す。

表中の僅かな差は 2.6.1 項で述べた再現性及び本測定法固有の測定精度によるものと考えるのが妥当である。

2.5.3 項の各場合に就ての測定結果を Fig. 8 に示す。

Table 7 Independency of temperature from current (1)
(Frc burning in air) °K

Current A	0.6~0.7	Ca. 1	1.7~2.0	4.0~4.8	6.8~8.0
DDNP system	130 ₆ ~139 ₆ (7)	139 ₆ ~146 ₆ (4)	130 ₆ ~139 ₆ (6)	139 ₇ ~153 ₆ (8)	139 ₇ ~146 ₆ (9)
Rhodanate system	153 ₆ ~157 ₃ (8)	157 ₇ ~163 ₆ (21)	157 ₃ ~163 ₆ (20)	153 ₆ ~157 ₃ (14)	157 ₃ ~163 ₆ (21)

Figures in parentheses are numbers of firing.

Table 8 Independency of temperature from current (II)
(Burning in capsule) °K

Current through bridge wire		0.74 A	9.8 A
Burnt in cap. with peephole	DDNP rhodanate	139 ₆ ~147 ₆	139 ₄ ~147 ₆
		163 ₀ ~173 ₃	173 ₃ ~175 ₈
Burnt in cap. with peephole covered with cellophane	DDNP rhodanate	144 ₀ ~149 ₃	149 ₃ ~152 ₄
		144 ₀ ~149 ₃	144 ₀ ~149 ₃

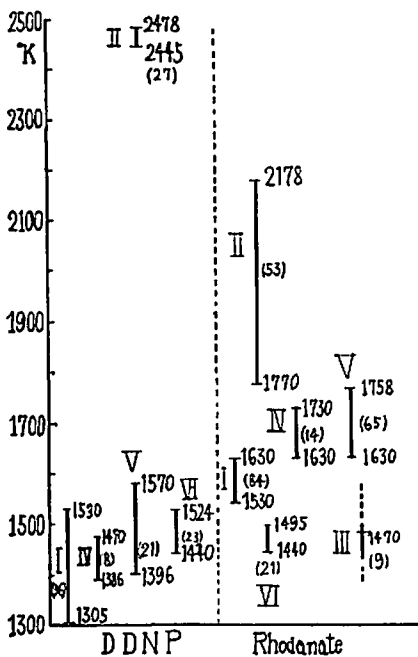


Fig. 8 Measured temperatures of burning fuse heads; I in air, II in oxygen, III in argon, IV in copper capsule without bottom, V in copper capsule with peepholes near the end of bottom, VI same as V with cellophane-covered peepholes

縦線は範囲、()内数字は発火回数(即ち測定回数)を示す。この場合通電々流値はその都度測定したが、上述のように温度値には影響しないことが判明したので、区別せずに取扱った。

3. 考 察

3.1 測 定

1回の発火では値を決定出来ないこと、被測定体の両側に装置を要すること等の欠点があるが、本温度測

定法は従来より最も精度よく信頼出来る数値を与える光学法として利用されて来た。点火点の炎の温度は従来測定されたことがなかつたが、この方法で始めて測定値が得られた。その値に伴う誤差は10°程度から大きくても20°と思われる。但しセロファン窓で密閉された管内温度測定では一応最高温度を測定していると予想は出来るけれども、断定は出来ない。(2.5.3(I)項) DDNPの空中自由点火では火花状の光跡が認められるのみで炎らしいものは発生しない。この場合でも測定は可能でその温度値は得られたが、反応自身は完結していないようであるので反応温度とは直接関係がない。その他の場合は何れも正しく反応温度が測定出来たと思われる。特に目立つ点はDDNP系は酸素中では特に高温であること、その他の場合は大差がないこと、ロダゲン系では酸素中でも特に高温でないこと、その他の場合は比較的高温であることでこれはその組成から定性的には無理なく説明出来る。

3.2 エネルギー及び温度

点火玉内を通っているブリッジ線で発生する電熱エネルギーは次のようにして求めた。上述の测温操作では、殆んど常に通電々流を同時に記録しているので、そのオシログラムより電流の時間的变化を知ることが出来る。電流は時間と共に減少し初期値の1/2~2/3程度となり後急激に0となるのが普通であつた。この過程は外部回路の抵抗によつて変わるが、実験時の状態でのエネルギーを大略次の方法で求めた。ブリッジ線の初期抵抗を0.8Ω(実測値の平均)とし、これが通電後直線的に増加し後断線するとして夫々数発の平均で計算しTable 9を得た。

Table 9 Electric energy consumed at bridge wire

Fuse head	Initial current(A)	Energy (mJ)
DDNP	2	16
	4	28
	10	42
Rhodanate	3	11
	6	20
	8	30

この値の誤差は個々のバラツキから10%程度と推測される。このエネルギーの一部は点火玉の反応開始のための活性化エネルギーに消費され、他は点火玉の余分の加熱、支持銅線、管体等に移行する。尚点火玉の反応開始に必要な最小エネルギーは、その種類によつて異ると想像されるが、約1mJ⁰⁾と思われる。

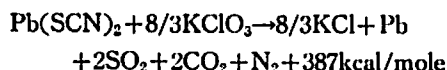
Fastax 高速度カメラで Fig. 5 (IV) の状態の点火玉の燃焼を 5,000 コマ/秒で拡大撮影した結果によると、先づ点火玉は破壊され粒子を発生しこれが相当多数となり前方に飛行移動するのが認められた。これは山田¹⁾外も既に述べている。この場合各粒子が既に着火発火しているかどうかは確認することが困難であったが、この粒子群が 1 msec 後には大きな炎の塊となることにより恐らく点火していると推測される。この粒子群の初期速度はフィルムを解析した結果 DDNP 系の場合 10 m/sec と実測された。点火玉が全部粒子となり、同じこの速度で飛行するとすると、その運動エネルギーは 30 mJ となる。

この運動エネルギー値は上記の反応開始に必要なエネルギー 1 mJ よりも大きい。点火玉粒子 0.2 mg の運動エネルギーが 1 mJ に等しい。

尚 DDNP 系の分散粒子はロダン系よりも径が小さく、数が多いことも認められた。

点火玉の成分の化学変化により遊離するエネルギーは次のようにして求めた。

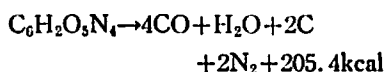
(i) ロダン系点火玉に就ては Table 1 によらず他の成分を含まずロダン鉛 50%、塩素酸カリ 50% のみの組成、即ち完全酸化の組成とし、次式のみが完全に進むとして発熱量を計算した。



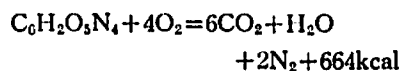
各化合物の生成熱は文献²⁾のものを用いたが、この際標準状態での値をそのまま採用し、実験時の室温に換算しなかつたが大差は生じない。点火玉 1 個 (8mg) に就き発熱量は 20 J となる。

結局電流エネルギーと運動エネルギーを無視出来る程化学エネルギーは大きい。この反応熱が総て生成物に与えられるとし、且解離が起らぬとし、全生成物の熱含量を 2,500°K より 3,000°K 迄計算して置き、殆ど直線に近いが曲線に表示し上の反応式の熱量に等しい点を求めた結果 2,662°K を得た。熱含量の計算は文献²⁾により、Pb は単原子気体であるから [O] の値を用い、これに融解熱と蒸発熱の和 47.9 kcal/mole を加え、SO₂ は表にないので 3 原子分子の CO₂ の値を用いた。

(ii) DDNP 点火玉に就ては 100% DDNP のみより成つているとして、その生成熱は筆者の実測値³⁾ -42 kcal/mole を用い、(i) と同様熱解離を考ずえ、簡単に次式によるとして計算して次式の最後の項に示した反応熱を得た。



点火玉 1 個 (5mg) の発熱量は 4.9 cal = 21 J と計算した。若し完全酸化が起るとすると、



となるが、組立てた雷管内の残存空気量は 0.1~0.2 ml でその中の酸素に相当する DDNP 量は 0.03~0.07mg であり DDNP 全量に対しては略々 1% であるから、この反応は無視し得る。(i) と同様に計算した結果反応生成物の温度は 3,780°K となる。(i) と (ii) の計算温度を実測値 Fig. 7 と比較すると計算温度の方が遙かに高温である。これは計算値の算出のとき熱解離を考えていないので当然高く出過ぎたものと考えられる。

セロファン窓付着物質による遮光効果が起り得ない酸素中自由燃焼の実測温度に比しても尚計算値が高いことは解離現象の存在を示している。

3. 3 点火玉の性能と炎温度の関係

点火玉の性能は延時薬や起爆薬を点火、爆発させることで表わされる。そのため必要な条件として次のものが考えられる。

(1) 反応生成物が成るべく高温であること (2) その比熱が大きく従つて熱含量が大きいこと (3) 延時薬起爆薬面等にエネルギーを確実に移行させることが考えられる。

ロダン系点火玉と DDNP 系点火玉では実用雷管に似た状態即ちセロファン窓付の状態の炎温度に大差がないので (1) の条件は双方共に等しいと云つてよい。(2) の条件に就き文献値を用いて大略の計算を試みるにロダン系と DDNP 系の反応生成物に就て殆ど差がない。

(3) の条件の中先づ熱放射によるエネルギーの移行に就ては Stefan-Boltzmann の放射式を用い計算した。

$$E = \sigma T^4, \sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ergsec}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{deg}^{-4}$$

この値は単位面積より 2π の立体角へ発散するエネルギーの時間率であるから、雷管の内部を考え、管内径に等しい断面の黒体発熱体の温度を 1,500°K (実測値) とし、これが 10 mm 離れた薬面 (直径 3 mm とする) に入射するエネルギーを 1 msec に就き求めると 5 × 10² erg を得る。1 msec としたのは例えば実際の瞬発雷管は通電後この程度の時間経過後爆発するからである。このエネルギーは延時薬起爆薬 10⁻⁷ g を発火点 (400°K) に迄加熱することが出来る。10⁻⁷ g の薬量は薬面 (3 mmφ) の表面層厚 10⁻⁶ cm に相当する。燃焼爆発が起るためには相当の厚さ (10⁻³

mm) が必要⁹⁾であるから、この状態では爆発しないことになる。若し炎と薬面層が充分近かければこの層厚は 5×10^{-4} cm となり燃焼爆発の条件を充すようになる。この計算では炎が黒体放射をし、受ける側も黒体と仮定したが、ロダゲン系より DDNP 系の方が黒体に近い状態になることが反応式とスペクトル(2.3 項)より推測出来薬面の着火に就ては DDNP 系の方が有利である。Table 3 中プラスチック密閉管内の発光測定で DDNP 系の方が明るいこともこれを裏付けしている。

(3) の条件の第 2 の様式は直接炎が薬面に接触してエネルギーを与えることである。単純な熱伝導を考え、高速流動している炎の温度を実測値の $1,500^{\circ}\text{K}$ とし、熱伝達係数を $100 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}$ と仮定し薬面 10 mm^2 に就て 0.001 mm^2 迄の深さの層の大約の熱容量を $2 \times 10^{-6} \text{ cal}$ としこの発火点を 400°C と仮定し、これ迄温度上昇させるに要する時間は簡単な計算¹⁰⁾で $160 \mu\text{sec}$ となる。従つてこの様式のエネルギー移行でも延時薬起爆薬の燃焼起爆機構は容易に説明出来る。この外に炎成分と延時薬起爆薬とが化学反応を起す可能性もあり、この時は更にエネルギー移行を助けることに成る。

(3) の条件の第 3 の様式は飛行する点火玉の破片粒子群の運動のエネルギーが薬面への衝突によつて移行し延時薬起爆薬の反応を開始させることである。

エネルギー量的には 0.2 mg の点火玉破片粒子で反応を開始させることが出来る。(3.2 項) 従つてこのエネルギー移行型式による雷管爆発の可能性もある。推測されるように飛行中の粒子群が既に着火しているならば、その炎よりエネルギーが接触によつて移行することも同時に起る。通電時間と雷管々体破裂時間との間隔は別種の雷管ではあるが数 msec より $200 \mu\text{sec}$ の間の結果¹¹⁾が得られている。

遅い場合は他の様式でも説明可能であるが 1 msec より早い爆発では、時間的に矛盾なく説明出来るのは上記の第 3 様式によつて行なわれる。Table 6 で観察出来るように、この装置で捕捉出来る程度の大きさに

成長した炎の発生の時間は通電後 1 msec 以後であるが、数 $100 \mu\text{sec}$ で爆発している時は充分な炎の発生を待っていないわけである。

併しこの機構に就ては雷管の種類の違いもあることであり断言出来ない。更に詳細な研究を行なわねば明かにすることが出来ない。

4. 総 括

ロダゲン鉛及び DDNP を主成分とした点火玉に就き、(1) 発光スペクトルを撮影 (2) 通電後の発火遅れ時間、発光強度の測定 (3) スペクトル線反転測温法の適用性の検討 (4) 各種燃焼条件での実験 (5) エネルギー関係の検討、測定温度値と計算値の比較、雷管起爆機構の考察を行なつた。

本実験を実施した日本化薬仁豊野作業所青田市郎氏並びに実験に協力された東京工業試験所第 7 部の諸氏に感謝すると共に、点火玉の粒子の飛行と爆発との時間関係に示唆を与えられた京都大学工学部若岡吉一先生に謝意を表わす。

文 献

- 1) 山田, 若園, 藤中: 工火協誌 14, 183, 1953
- 2) 若園, 沢田: 工火協発表 10月, 1961
- 3) R. W. G. Pearse, A. G. Gaydon: The Identification of Molecular Spectra 1950 (Chapman & Hall Ltd., London)
- 4) 水島: 東工試報 55, 23, 1960
- 5) 水島: 東工試報 58, 289, 1963
- 6) 中野, 田中: 未発表
- 7) J. Taylor: Detonation in Condensed Explosives 1952 (Clarendon Press, Oxford); H. G. Wolfhard: Flame Their Structure & Temperature 1953 (Chapman & Hall Ltd., London)
- 8) 水島, 中野, 田中: 工火協誌 24, 253 (1963)
- 9) F. P. Bowden, A. D. Yoffe: Initiation & Growth of Explosion in Liquid & Solid 1952 (Cambridge University Press, London)
- 10) Gröker, Erk 著 坪内, 加藤訳: 熱伝達の基礎 160, 162, 1961 (朝倉書店, 東京)
- 11) 水島, 日下部: 工火協誌 21, 112, 1960

Research on combustion properties of fuse heads of electric detonators

Part I. Temperature measurements of flames of fuse heads

by Yojiro Mizushima & Tsugio Sawada

Data of the flame temperatures of the fuse heads of electric detonators have not been found in literature in spite of their important roles in the behaviors of the deto-

nators. Construction and chemical compositions of the fuse heads studied are shown in Fig. 1 and Table 1. The emission spectra of the flames in air were photographed and species of the bands were assigned. (Table 2). Considering emissivities of DDNP particles and other factors the Na-D line reversal method was applied to the following cases (I) burning in air, (II) burning in oxygen (III) burning in argon, (IV) burning in a copper capsule which has not bottom, (V) burning in a copper copper capsule with small peepholes near the end of the capsule, (VI) the same as (V) except covering the peepholes with a thin sheet of cellophane.

Examples of oscillogram to determine the temperature are shown in Fig. 6. Data obtained are shown in Table 7, 8 and Fig. 8.

Energies input and out-put at the head were estimated, and possibilities of initiation of primary explosive in the detonator by radiation from the burnt gas, conduction of heat from the gas and collision of fragments of the heads were discussed.

抗抵抗法による爆速測定について

佐々宏 —*・G. Larocque**

1. 緒言

爆速測定法にはドートリッシュ法, 高速度写真法, イオン探針法, 抵抗法などの種々の測定法があるが, 装薬室内に装填された爆薬の爆速を測定する場合には

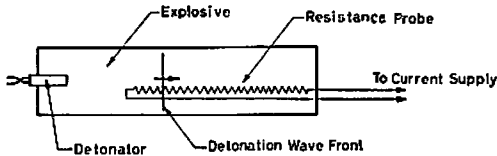


Fig. 1 Principle of Resistance Method

抵抗法¹⁾が有利であると考えられる。そこで本研究においては, 抵抗法を用いて爆速測定を行なう場合にとくに注意しなければならない点について指摘するとともに, 多数の固定抵抗を鎖状に繋ぎ合せた抵抗プローブを試作し, それを用いて装薬室内での爆速測定を行なったので, その結果について報告する。

2. 抵抗プローブおよびその使用に当たりの注意
抵抗法の原理は良く知られているが, Fig. 1 に示

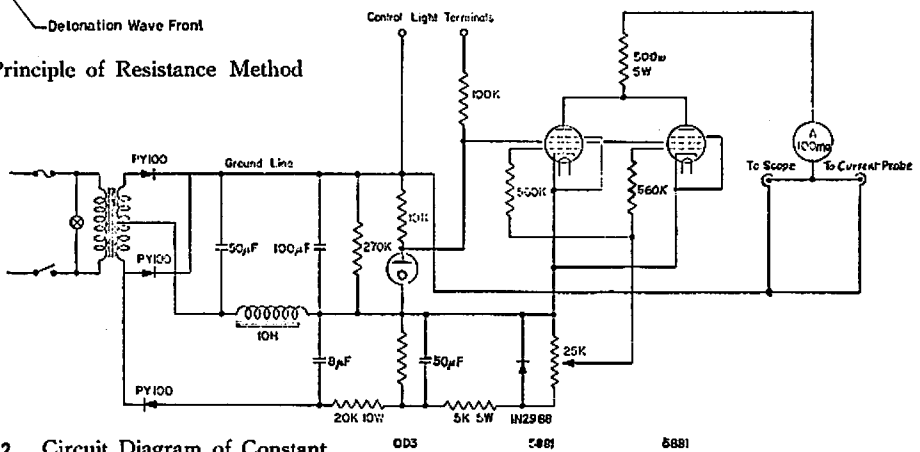


Fig. 2 Circuit Diagram of Constant Current Supply

昭和41年7月4日受理

* 京都大学工学部資源工学教室 京都市左京区吉田本町

** Mines Branch, Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa, Canada.

すように爆薬内に爆轟波の進行方向と並行に抵抗線よりなる抵抗プローブを挿入しておくと, 爆轟波面は高温高压のガス体でイオン化しているために, 爆轟波の