

## 電気雷管の電流発火感度に関する考察

空地公二\*・吉田 勲 夫\*

### 1. 緒 言

電気雷管の発火感度については従来より多くの研究者によつて論ぜられてきたが、取扱う対象が非常に細い電橋線と、わずかの量の点火薬であるという条件から各部位における温度の計測とか、発火の瞬間の検出とか、その測定技術において非常に困難性があり主として理論計算によらざるを得なかつた。わが国においても木下は熱的過度現象を静的なエネルギーの積分値に転換した Jones のモデル (E-T 曲線として知られている) を用いて電気雷管の発火感度や斉発性について検討した<sup>1)</sup>。一方、赤崎<sup>2)</sup>、加藤<sup>3)</sup>らは雷橋線の抵抗増加から温度を逆算し、実験的に点火の瞬間の温度を求めた。われわれはコンピューターを利用することによつて熱的過度現象を解析し、かつ適当な仮定をたててミリ秒領域における点火薬の発火特性を求め、電橋線および点火薬の種々の組合せにおいても容易にその発火感度を推定し得る手法の開発にとり組んだ。

### 2. 電橋上の温度分布について

#### 2.1 電橋の温度上昇

電気雷管の電橋に一定の電流を通電することによつて発生するジュール熱は電橋温度を上昇させ、発生熱量の相当量は点火薬の発火のために有効に消費されるものと思われるが、電気雷管の脚線部に熱伝導によつて移行する熱量も無視することはできない。これは、Jones や木下らが E-T 曲線と称して電気雷管の起爆

に必要な熱エネルギーと発火待時間 (Excitation time) との関係を研究した結果からも明らかである。しかし電橋から脚線に移行する熱量の正確な値は明らかではない。これは現象が微小部分のことなので測定が不可能に近いことと鉚着部分の状態が把握し難いことの理由によるものと思われる。このことは理論的に説明する場合でも同様であるが、ここでは熱伝導論<sup>4)</sup>の教えるところに従い簡単なモデルを考え、仮定をたてて一般式を導びくことにした。

まずモデルとして第1図に示すようなものを考え次の仮定をおく。

- i) 電橋表面からの自然放熱 (対流輻射) は無視する。
- ii) 脚線は温度 0° の無限熱容量をもつものとする。
- iii) 熱伝導率の温度依存性はないものとする。

この様にすれば次の熱伝導方程式が成立する。

$$-\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{\lambda S} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + w = SC\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

$$w = 0.24 I^2 R_0 (1 + \alpha \theta) / 2l \quad (3)$$

ただし各記号は次のものを表わすものとする。

- $\theta$  : 電橋温度
- $Q$  : 電橋  $x$  部への流入熱量
- $\lambda$  : 電橋の熱伝導率
- $C$  : 電橋の比熱
- $\rho$  : 電橋の密度
- $S$  : 電橋の断面積
- $\alpha$  : 電橋の抵抗温度係数
- $l$  : 電橋の  $1/2$  長さ
- $R_0$  : 電橋の初期抵抗
- $d$  : 電橋の直径
- $I$  : 通電電流

(1), (2) より  $Q$  を消去し、 $\kappa = \lambda / C\rho$ 、 $\nu = 0.24 I^2 R_0 / SC\rho$  において整理すると次の (4) 式が成立する

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \nu (1 + \alpha \theta) \quad (4)$$

今、(4) 式を解くため  $\theta$  の真函数を  $\theta$  としたラプ

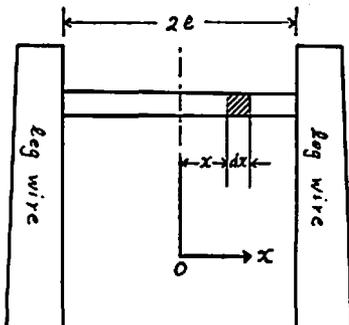


Fig. 1 Heating model of bridge wire

昭和45年2月2日受理

\* 日本化薬株式会社 火薬部火工品研究所

ラス変換を行なうと次のようになる。

$$p\theta = \kappa \frac{d^2\theta}{dx^2} + \nu(1 + \alpha\theta) \quad (5)$$

ただし  $p$  はヘビサイド演算子である。

(5) 式において境界条件として

$$x=0, \frac{d\theta}{dx}=0; \quad x=l, \theta=0$$

を考慮すれば次の解を得ることができる。

$$\theta = \frac{\nu}{p - \nu\alpha} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \left\{ \exp(-\sqrt{(2n+1) \cdot l+x} q) + \exp(-\sqrt{(2n+1) \cdot l-x} q) \right\} \right] \quad (6)$$

$$q = \sqrt{(p - \nu\alpha)/\kappa}$$

(電橋温度を陰ずる場合には時間の極めて短いところが問題となるので  $p$  は非常に大きいと考えて展開を行なった)。

(6) の  $p$ - 関数領域から表関数の  $t$ - 関数領域にもどすためにはプロムウイッチ積分を行なうのが通常であるが、ラプラスの対数表<sup>3)</sup>から

$$\begin{aligned} \hbar \frac{1}{p} &= t, \quad \hbar \left[ \frac{1}{p} \cdot \exp(-\alpha\sqrt{p}) \right] \\ &= (t + \alpha^2/2) \operatorname{erfc}(\alpha/2\sqrt{t}) \\ &\quad - \alpha\sqrt{t/\pi} \exp(-\alpha^2/4t) \end{aligned}$$

$$\hbar F(p \pm \alpha) = \left( 1 \pm \alpha \int_0^t dt \right) \left\{ \exp(\mp \alpha t) \cdot f(t) \right\}$$

が得られているのでこれらを用いることにより (6) 式の表関数は次の形で得ることができる。

$$\begin{aligned} \theta &= 1/\alpha (\varphi(t) - 1) + \nu\varphi(t) \cdot \Psi(t) \\ &\quad - \nu^2 \alpha \int_0^t \varphi(t) \cdot \Psi(t) dt \quad (7) \end{aligned}$$

ここに  $\varphi(t) = \exp(\nu\alpha t)$

$$\Psi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (f_1(t) + f_2(t))$$

であり

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \left\{ t + \frac{(2n+1) \cdot l+x}{2\kappa} \right\} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1) \cdot l+x}{2\sqrt{\kappa t}} \right\} \\ &\quad - \frac{(2n+1) \cdot l+x}{\sqrt{\pi\kappa}} \sqrt{t} \\ &\quad \times \exp \left\{ -\frac{(2n+1) \cdot l+x}{4\kappa t} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2(t) &= \left\{ t + \frac{(2n+1) \cdot l-x}{2\kappa} \right\} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1) \cdot l-x}{2\sqrt{\kappa t}} \right\} \\ &\quad - \frac{(2n+1) \cdot l-x}{\sqrt{\pi\kappa}} \sqrt{t} \\ &\quad \times \exp \left\{ -\frac{(2n+1) \cdot l-x}{4\kappa t} \right\} \end{aligned}$$

である。

この (7) 式を用いて現在用いられている白金イリジウム合金線について計算を行なうことにした。なお数値は次のものを使用した。

$$d = 0.032 \text{ mm}, \quad 2l = 1.5 \text{ mm}, \quad \alpha = 0.0024/^\circ\text{C}$$

得られた結果の例を第 2 図に示した。

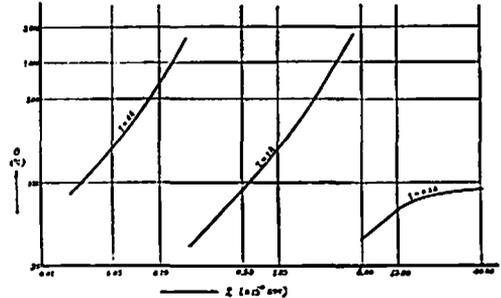


Fig. 2 Temperature-time curve at center point of bridgewire (current flow, temperature up state)

## 2.2 電流遮断後の温度低下

ここでは一定電流を一定時間通電した後、通電を止めた場合の電橋線の温度降下について考える (もちろん電橋熔断後の温度降下も同一に扱う)。モデルは第 1 図のものを考えると次の方程式が成立する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (8)$$

2.1 と同様の考え方で  $\theta$  の裏関数を  $\Theta$  とし (8) 式を書き換えるときは次の (9) 式が得られる。ただし  $\theta_0$  は電橋の初期温度 (通電を停止したときの温度) を表すものとする。

$$p\Theta - p\theta_0 = \kappa \frac{d^2\Theta}{dx^2}$$

(9) 式において境界条件として

$$x=l, \theta=0; \quad x=0, \frac{d\theta}{dx}=0$$

を考慮すれば、次の解が得られる。

$$\begin{aligned} \Theta &= \theta_0 \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \left\{ \exp(-\sqrt{(2n+1) \cdot l+x} q) + \exp(-\sqrt{(2n+1) \cdot l-x} q) \right\} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

$$q = \sqrt{p/\kappa}$$

ラプラスの対数表より

$$\hbar \exp(-\alpha\sqrt{p}) = \operatorname{erfc}(\alpha/2\sqrt{t})$$

が与えられているのでこれを用いて (10) 式を表関数に書きなおすときには

$$\theta = \theta_0 \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{2n+1 \cdot l+x}{2\sqrt{kt}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{2n+1 \cdot l-x}{2\sqrt{kt}} \right) \right\} \right] \quad (11)$$

白金-イリジウム合金線について得られた結果を第3図に示す。

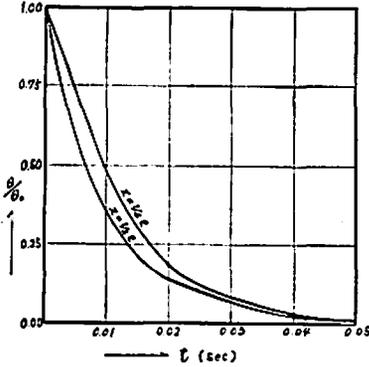


Fig. 3 Temperature-time curve at center point of bridge wire (current off, temperature down state)

### 3. 発火感度の推定

2.1において通電時の電橋部の温度-時間曲線が得られたが電気雷管の一特性である発火感度を推定する場合には使用される点火薬に関する情報が必要である。加藤は電橋抵抗の実測からいろいろな太さの電橋線と点火電流の大きさで発火時間および発火温度がどのように異なるかを検討した。しかし点火電流が大きくなると発火温度が上昇することが納得できないとしている。また電橋線が太くなると発火温度が上昇するというデータも得た。今回われわれは、最も普通で得られる点火薬の発火特性を用いることにした。

現在一般的な点火薬の発火特性として、クルップ発火点、示差熱分析による発火点およびそれから計算で得られる活性化エネルギー等の値は実測されているが、雷管の発火の際必要となるミリ秒領域内における発火点の情報は余り見受けられない。この点を解決するために次の簡便法を採用することにした。すなわちクルップ発火点試験から得られる4秒発火点温度とその領域における活性化エネルギーを基とし、電橋線による点火の時間領域にまで一次反応として拡張仮定することにより、ミリ秒領域における発火温度と待時間の関係を計算から求めた。一例として粒状DDNPの特性を第4図に示した。

さてこの情報を電気雷管の発火特性に結びつける場合に考慮しなければならないことは、クルップ発火点

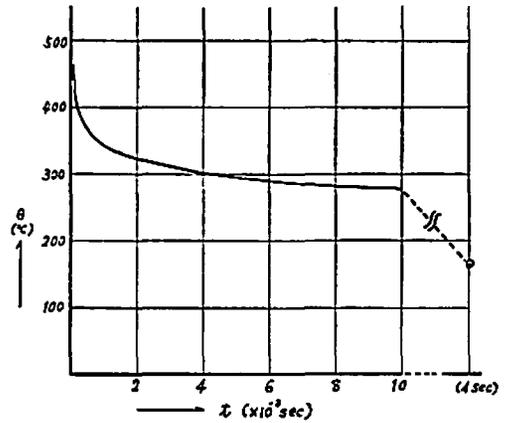


Fig. 4 Temperature-ignition time curve of DDNP (by crupp test)

試験が定温加熱を行なっているのに対し、電橋線の場合はその加熱形態が時間とともに上昇してゆくため、この加熱方式の違いをどう補正するかである。点火薬の発火は電橋線からの熱移動によるものであるから正式な計算は(7)式をさらに積分した式を用いなければ熱移動量は求められないが、ここでは温度-時間曲線を一次式で近似し定温加熱方式は電橋線加熱方式に対し $\sqrt{2}$ 倍になっているという考えで考察することにした。このように考えると第5図のように電橋温度-時間曲線と温度-点火待時間曲線を重ね合わせることで、その電橋点火薬の組合せによる電気雷管の発火特性を推定することができ、電橋溶断時間との差を知ることで併発性をも論ずることが可能とな

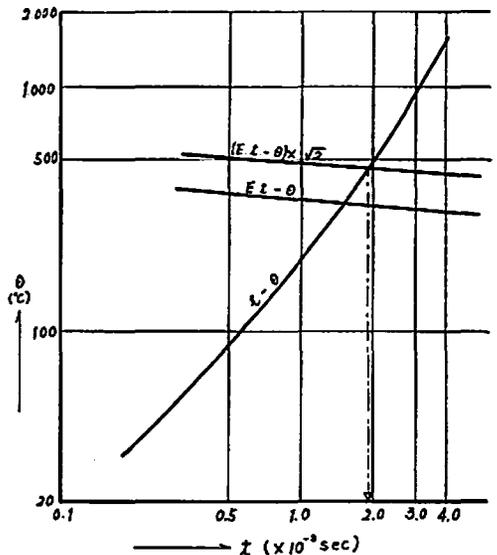


Fig. 5 Graphical method to presume the sensitivity to ignition of electric blasting cap

る。この図式解法の手順を改めて示せば次のとおりである。

- i) 目的とする電橋のある通電電流における温度—時間曲線を描く。
- ii) 目的とする点火薬の温度—点火待時間曲線を描く。
- iii) その曲線に  $\sqrt{2}$  倍の補正を行なう。
- iv) 交わる点の時間軸の読みがその電気雷管の発火待時間となる。

#### 4. 実験

電橋線に通電した時の電橋各部の温度を直接にしかも瞬間的に測定することは不可能に近いことは前述のとおりであるが、電橋抵抗の変化を追跡することによって、その電橋の平均値的なものについてはある程度までの情報を得ることができる。例えば白金—イリジウム合金線電橋に通電したときの抵抗変化のオシログラムは第6図のとおりであるが、電橋の抵抗温度係数が判明すればこのオシログラムより温度—時間曲

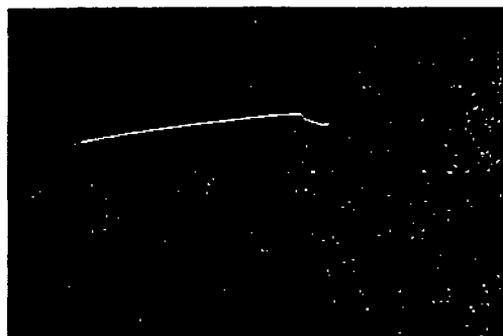


Fig. 6 Oscillogram of bridge wire resistance,  $I=1$  Amp,  $X: 2ms/div$ ,  $Y: 1\Omega/div$ .

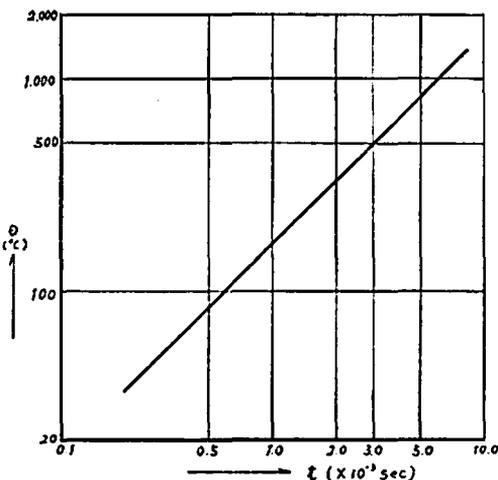


Fig. 7 Actual relation between temperature  $\theta$  and time from oscillogram

線を描くことができる。文献によれば素材についての物理的性質は第1表のように与えられているので、この温度係数を用いて抵抗変化分より温度を逆算してゆくと第7図のようなグラフが得られる。

表 1 電橋線 ( $Pt-Ir$ ) の物理的性質\*

融点 (°C)	密度 ( $g/cm^3$ )	比熱 ( $cal/g \cdot ^\circ C$ )	熱伝導度 ( $cal/cm \cdot S \cdot ^\circ C$ )	比抵抗 ( $\Omega \cdot cm$ )	抵抗温度係数 ( $^\circ C^{-1}$ )
1773	21.4	0.0316	0.144	$10.0 \sim 43.6 \times 10^{-6}$	0.0024

赤崎らはこの方法によつて発火の瞬間における温度を推定した。第2図および第7図の理論式および実測の図を対比して見ると比較的合致する部分と合致しない部分があるが、これは理論式を導びく際に抵抗の温度係数が温度の一次式であるという仮定、熱伝導率の温度依存性がないという仮定が含まれていること、および前提として電橋からの自然放熱を無視していることなどが主な原因と考えられる。したがつて現在のところ正確な実験にとつてかわるべき情報を得ることはなかなか困難であるが、目安を得るためだけのものでは充分実用になるものと考えられる。ちなみに従来の方法で得られた電流発火感度と本手法で得た数値とを比較すれば第2表のとおりである。

表 2 従来法と本手法の比較

電 流 値	0.7A	1.0A
従 来 法	5.1 mS	2.1 mS
本 手 法	4.8 mS	1.9 mS

試験は DDNP 粒状を点火薬とした C 型電気雷管

#### 5. 結言

電橋に通電したときの温度上昇について理論式を導きその利用される一例をあげたが、実際にはその理論式が必ずしも正確に合致しないのもできた。これらを解決するためには前提(仮定)条件をできるだけ少なくしてより現実に近い形で方程式を解かなければならず、今後の研究課題である。ともあれ、直径、長さ、材質などの異なる電橋線について、また種々の点火薬について、その物性に関するデータあるいは測定可能領域における発火特性のデータをインプットするだけで、電気雷管の発火感度のおおよその比較が可能となつた。

#### 文 献

- 1) 木下四郎; 工火協誌, 15, 162 (1954)

\* 遷純についての値を示した。

- 2) 赤崎正則; 昭和33年電気四学会連合大会 No. 737 (1966)  
(1958) 5) 林 重憲; 「演算子法と過度現象」国民科学社  
3) 加藤清視; 工火協誌, 20, 286 (1959) (1965)  
4) 例えば 川下研介; 「熱伝導論」オーム社

---

## Study on the Sensitivity of Ignition of Electric Blasting Cap

by K. Sorachi and I. Yoshida

The ignition characteristics of electric blasting caps have been studied by Jones, Kinoshita, Kato and others the view points of these investigators were on the relation between firing current and excitation time or critical energy for ignition.

However, as subjects are fine bridge-wire and ignition charge of small quantity, the temperature measurement at each points on the subject is very difficult.

In this paper, very complicated thermal transient phenomena are analysed using computer and the ignition characteristics of ignition charge in mili-second range are presumed in conformity with suitable assumption.

Comparing the results obtained, one method was found by the authers that is able to readily presume the sensitivity to ignition of electric blasting cap in any combinations of the bridge-wires and the ignition compositions.  
(Nippon Kayaku Co., Ltd. Orio Factory, Fukuoka, Japan)