

点 火 玉 の 発 火 特 性

秋 葉 鯨 二 郎・加 勇 田 清 勇*

1. 序 論

筆者らが点火玉をロケットに関係して使いだしてから約10年になる。その間ロケット技術も進歩し、最初1機につきせいぜい数個という程度の点火玉使用数であつたが、最近では1機につき50個以上使用する場合もでてきた。しかも最初のうちはそれらの点火がすべて地上電源をもつて行なわれてきたのが、機上につまえたタイマーと電源をもつて点火する数がふえてきた。そこでできるだけ小さい電源重量で点火が行なわれねばならないので、むやみに大きな安全率をとるわけにいかず、また実際時折点火玉不発の要因にもあつたことから、もう一度点火玉の発火特性を認識しなおす必要が出てきたのが本研究の発端である。

点火玉の歴史がいつに始まるかよく知らないが、その点火特性に関する最初の研究は1936年頃 Dreko¹⁾による点火玉の発火条件に関するもので、平たくいえば、点火玉が発火するためには、電源からある一定値E以上のエネルギーを供給すればよく、その電圧の如何にはよらないというものである。

この理論は1949年頃幾人かの研究者¹⁾²⁾によりそのあやまりが指摘され、これは次のように excitation time t と一次関係にあると修正された。すなわち

$$E = A + Bt_e \quad (1)$$

ここに excitation time t_e の定義はある一定の電流を加えて点火玉が確率的に50%発火するに必要な通電時間である。これを点火時間と記してある論文もあるが、点火玉が実際に火を発する時間のような印象を与えるので、やはり原語に忠実にここでは励起時間と呼ぶこととする。この定義の励起時間は統計的に定義されたものであるが、個々の点火玉についてみればそれぞれ一定の電流により点火するための必要最少限の通電時間が存在するから、これを個々の点火玉についての励起時間とすれば、上の定義による励起時間は平均励起時間といふことができる。

後の定義による励起時間の通電により励起状態にもたらされた点火玉が実際に火を発するまでには更に時

間を必要とする。この励起時間より発火時間までの時間を点火おくれ (induction time) とよぶ。

直列に結線された点火玉に電流を通じたとき、すべての点火玉が発火するための条件、すなわち斉発性の問題は電気発破に関連して古くから問題とされてきたが、定性的に言えば回路が切断される前にすべての点火玉が励起状態にもたらされていれば、発火時間にバラツキはあつても、たとえば第3図の写真にみるように電流カット後にともかくすべての点火玉が発火することになる。

Jones 等はこのような考えに基づいて統計学的に斉発の条件を求めた。

すなわち、励起時間 t_e は分散が σ_e 、発火時間 t_b は分散が σ_b の正規分布であると仮定する。一般に二つの正規分布に従う n 個の確率変数の最大と最小の差が R である確率は $R/\sigma = w$ とおくと w によりきまり、また当然この確率は n をパラメタとしてもつ。今 n 個の点火玉の励起時間の最大と最小の中心より同じく発火時間の最大と最小の中心迄の時間が平均点火おくれ t_i であるとして

$$w \leq \frac{2\tau_i}{\sigma_e + \sigma_b} \quad (2)$$

が斉発条件であり、前述の通りこの条件は確率的に満足され n をパラメタとして含む。

以上の理論は一見完全であり全く問題とする点がないかのように思われるが、なお以下のいくつかの点について疑問が残されている。

1. 発火時間の分布は正規分布であるか。
2. 断線は果して発火と同時に起こるか。
3. 励起状態になつた点火玉が通電停止後(直列接続の場合は断線後)いかなる時間おくれをもつて発火するか。
4. 断線後直ちに電流が遮断するか。

この論文はこれらの点を明らかにするために行なつた一連の実験結果を示すものである。

2. 実 験 装 置

励起時間の測定は点火玉に矩形波電圧を印加することによりなされる。

昭和41年11月2日受理
* 東京大学宇宙航空研究所 東京都目黒区駒場町856

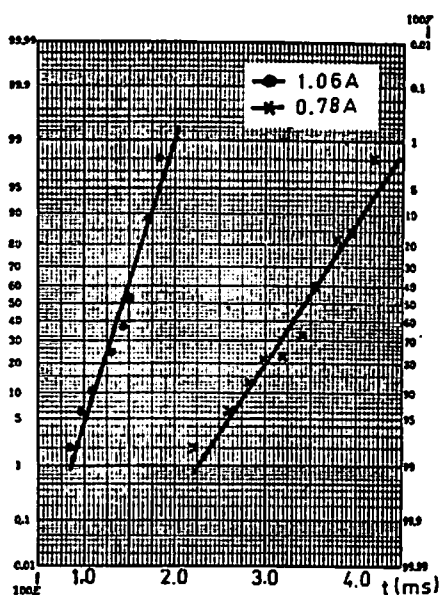


Fig. 2 Distribution of Excitation time

が成立つ。

ところで励起時間の分散 σ_e について

$$\sigma_e = ct_e \quad (4)$$

が成立つことが認められている*。正規分布だから

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_e}{\sigma_e}\right)^2} dt$$

これと (4) から

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$$

$$\text{ここで } \xi = \frac{t-t_e}{c}$$

$$\text{したがって } t_a = (C\xi_a + 1)t_e \quad (5)$$

一方、同じ電圧を加えて与えるエネルギーは点火玉の抵抗変化を無視すれば印加時間に比例するから

$$\frac{E_a}{E} = \frac{t_a}{t_e} \quad (6)$$

(1), (3), (5), (6) より

$$E_a = (C\xi_a + 1)A + Bt_a$$

$$\text{すなわち } A_a = (C\xi_a + 1)A, B_a = B$$

後者は係数の物理的意味からしても予想されることである。また最小発火電流は $\alpha \rightarrow 1$ の場合を考え $E_a = i^2 r t_a$ を入れればわかるように $i_m = \sqrt{\frac{B}{r}}$ となり、この理論からすればある点火率を得る電流というものはな

* この実験では $c=0.15$ であった。

く、全然点火しないか 100% 点火するかのいずれかということになる。勿論実際にはこのようなことはないが、最小発火電流がかなり判然としたものであることは確かである。この例からは $i_m = 0.48A$ と計算されるが、これは実測値 $0.50A$ とかなりよく一致する。

励起エネルギーは当然点火玉の初期温度に依存する現在のところ定量的に詳しくしらべていないが、たとえば50個の試料について $5^\circ C$ でパルスを加え、25個が発火し25個が不発として残ったその不発の25個を $30^\circ C$ にて同一パルスを加え全数を点火することができた。大体においてこの効果は発火温度と常温との差を θ_i とすれば、温度変動を $\Delta\theta$ として $\Delta\theta/\theta_i$ の程度で発火エネルギーに効いてくると思われるので無視できないであろう。

なお蛇足であるが、本実験の範囲では抵抗値と発火率との相関は認められなかった。

4. 発火時間に関する実験

次の二つの場合の発火時間に関する検討を行なつた。

一つは矩形波パルス電圧を加え、パルス終了後発火する時間について、他は普通の意味での発火時間で直流電圧を加えた時に発火するまでの時間に関するものである。

i) パルス電圧による場合

この場合は前記齊発理論によれば、直列結線された点火玉が一つ発火し断線したときに残りの点火玉がいかなる時間に発火するかということで、この発火時間の分布についての測定は従来なされていなかった。

図3はこの場合の典型的なオシロ写真で、上の線

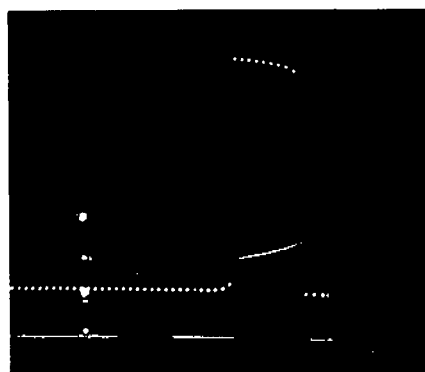


Fig. 3 Typical oscillograph record of Fig. 1 circuit output.

upper trace: B beam, modulated by 10kc time marker (right to left)

lower trace: A beam, modulated by PD3L output

max. current 1.42A, bridge wire left unbroken

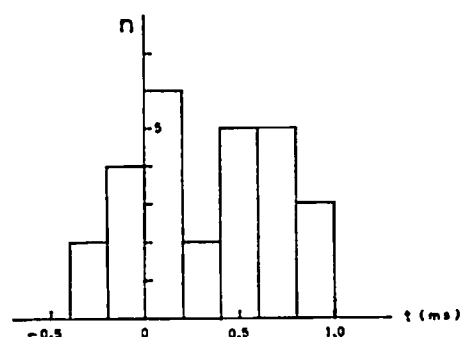


Fig. 4 Histogram of firing time
(Applied current: Square wave)
 $I=0.88A$ total 32
 $T=3.5ms$ no ignition 5

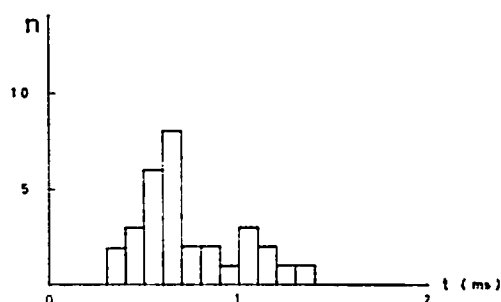


Fig. 5 Histogram of firing time
(Applied current: Square wave)
 $I=3.7A$
 $T=0.25ms$
 $\theta=29^{\circ}C$
total 31 no ignition 0

が電圧，下の線が電流をあらわし，下の線が消えている点が発火に相当する。

図4，図5は発火時間の頻度分布の例で， t はパルス終了後よりとつた。その分布は正規分布とはみなし難く， t の小さい方に最大値をもつ分布であり，多くの場合分布の極大値が2つあらわれるようで，第2の極大は小さく t のかなり大きい方にある。

図4の場合は不発があり，しかも t が負の領域にまで分布している。後の断線時間に関する検討にあるように多くの場合発火と同時に断線がおこるので，この電流値では直列結線の場合不発が出る可能性があるといえる。第5図は t がすべて正で不発なしの場合であるから斉発する場合である。もつとも，この試料は少数であるから，このパルス巾が100%に近い何%の発火率を与えるかという点，および発火時間の分布がさらに負にのびる確率があるという点を考慮する必要がある。

発火までの時間はパルスの電圧，時間によつて異な

るが，同じ電圧なら時間がひろがるほど分布の範囲は狭くなる。おくれは最も大きいものでパルス終了後4msec程度であつた。

分布が正規分布でないことは，さらに理論的証明をまたねばならないが，第一のピークは熱線よりの伝達による発火，第二のピークは火薬の自己発熱によるものではなからうか。

また，この発火時間おくれと点火玉の抵抗値の関係は電源の性質にもよることと思うが，図6にみるように相関はないとみてよい。

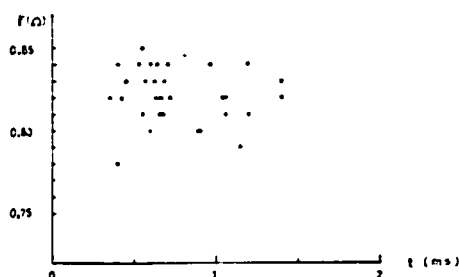


Fig. 6 Correlation between bridge wire resistance and firing time
 $I=3.7A$
 $T=0.25ms$
total 31 no ignition 0

ii) 直流による発火時間分布

ここにあらたに発火時間の分布を求めてみたのは次の二つの理由による。

第一は前の結果より類推して，従来いわれてきたような正規分布からのずれが認められるではなからうかと考えられたこと，第二には細い針金をまいた雷管を使用し，針金の断線より発火時間の測定を行なうという方法による今までの測定では，発火時間の分散が大略励起時間と同程度の値となつてゐるが，このようなことは，もし両者が正規分布にしたがうなら，点火おくれが一定のようなごく特殊な場合にいえることで，点火おくれがもしたたとえば分散 σ_t の正規分布をもっている場合には，発火時間は分散 $\sigma_0 \cong \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_e^2}$ の正規分布でなければならないが，必ずもとの σ_e より大きな分散をもつはずであるが，従来の測定結果は $\sigma_0 < \sigma_e$ のようなものもあり，測定誤差でなければその分布が複雑なためではなからうかと考えられたからである。

測定結果の代表的な例を図7に示す。発火時間の分布はパルスによる場合と類似しており，ピークが二つあり，第一の大きなピークは t の小の側に偏つてゐる。これを図8のように確率紙の上にかいても直線とみなすには相当の無理がある。また分布のひろがりについても励起時間の分布の約2倍程度で，時間おくれ t

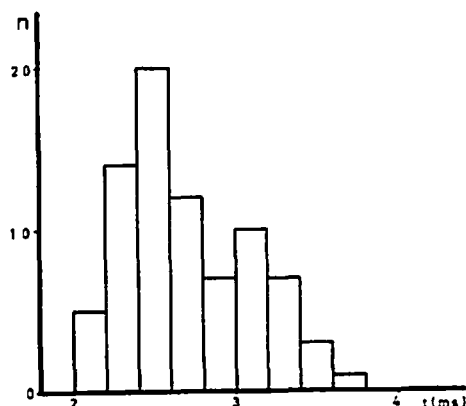


Fig. 7 Histogram of firing time
(Applied current: DC)
 $I=1.06A$
total 79

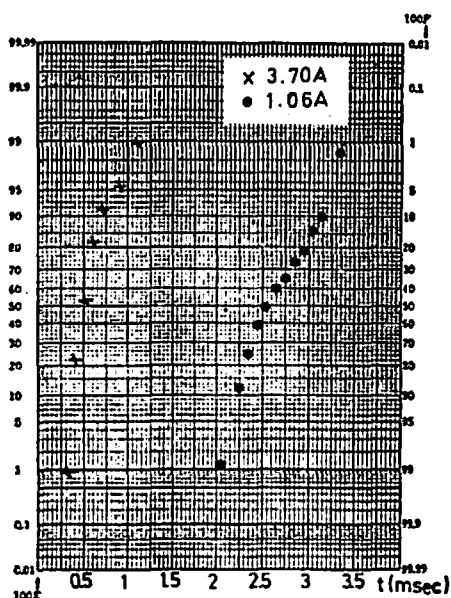


Fig. 8 Distribution of firing time

を一定とみなすのも合理的と思われる。

電圧をあげていくと後述のように電橋の切断が発火より先におこることがあり、この場合は実質的にはパルスによる点火に相当する。

この様に発火時間の分布が正規分布からかなりかけ離れていることは、不発の確率の高いところでは、強引に正規分布で近似した結果でも確率的議論の析致が異なるほどのことはないと思われるが、特に問題となる不発の確率の小であるところでは、分布の裾の方が問題となるため、非常に不正確な結論を与えることとなろう。したがって従来の斉発理論に何らかの修正を施すか、あるいは全く異なったアプローチが必要で、た

とえば $f(t)$, $g(t)$ をそれぞれ励起時間と発火時間の分布密度関数、また $F(t)$, $G(t)$ をそれらの $-\infty$ から t 迄の積分とすれば斉発の確率 α として

$$\alpha \geq n \int_{-\infty}^{\infty} g(t) [1-G(t)]^{n-1} [F(t)]^{n-1} dt$$

で推定するのも一方法であろう。勿論 f , g , 特に後者を実験よりいかに推定するかは未だ残された問題である。また、この様な数学的理論も大切であるが、実際問題としては点火玉がすべて同じ状態（たとえば温度）にあるかどうかともまた注意すべき点である。

実際の観点よりすれば、励起時間分布にしろ発火時間分布にしろ無限のひろがりをもつわけでないので、 f と g が重ならないような電流値を用いれば、直列点火の個数に関係せず斉発するはずである。この観点よりすれば図2と図7より電流1.06Aは斉発のために少し不十分であると思われる。

5. 断線時間について

断線が発火と同時に起こるとした従来の斉発理論の仮定は大体において正しいが、なおいくらか補足すれば、斉発性が問題になる程度の電流値では割合からいって大略3個のうち1個が発火と同時に断線し、あと2個はほとんどの場合最後迄断線せずに残る。

電流値を増していくとほとんどが発火と同時に断線するようになるが、パルスによる点火では与えられたエネルギーが励起エネルギーよりあまり大きくないと、やはり3個中2個程度断線しないものが残る。

さらに電流値を増していくと、図9に示すように

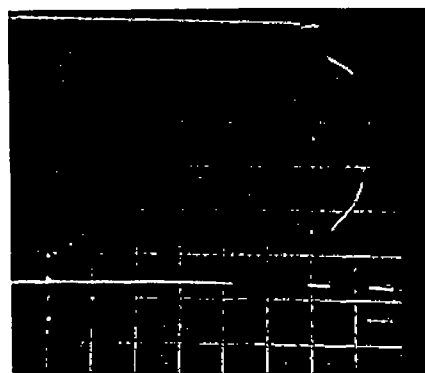


Fig. 9 An oscillograph record showing
bridewire melts before firing.
upper trace : B beam
lower trace : A beam

発火前に断線する様になる。この様なときは、断線する時には既に発火に必要なエネルギーが点火玉に蓄えられているので斉発について考察する必要はないかもしれないが、必要があるとすれば前記発火時間の分布

の代りに断線時間の分布を問題とせねばなるまい。

また、さらに電流をますと、断線後の放電現象が見られ、爆発電橋型 (Exploding Bridge Wire 略して EBW) 点火頭と類似の現象がみられるはずであるが、この辺の確認はまだ行なっていない。

ところで電流、電圧波形から発火時または断線時の電橋抵抗が知れ、これより電橋温度が推定される。パルスの立ち上りの時の値を添数 1、発火時または断線時の値に添数 2 をつけると

$$R_2 = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} (r + R_1) - r$$

ここで R は白金線電橋の抵抗値、 V : 電圧、 I : 電流で r は電圧を測定している部分中白金線電橋以外の部分の抵抗である。

これより電流 1.1A では発火時 $R_2/R_1 = 1.3 \sim 1.7$ 、電流 3.7A で 2.8~3.7 程度、電流 6A で 3.0~3.7 程度である。最後の場合は断線が発火より先の場合もある。これから電流 1.1A の場合の温度上昇は 100°C ないし、200°C、後の二つの場合は 600~900°C 程度とみなせる。最後の場合、このような温度では白金線は溶解するわけではないが、この値はあくまで白金線の平均温度を与えるもので、部分的にたとえば脚線との溶接で変形した部分などで温度が融点以上になっていることは十分考えられる。

6. 結 び

この論文は従来すでに可成りよく理解されていた点火玉の発火特性を反省的な意味でしらべてみたもの

で、数学的モデルを扱いやすくするために黙殺されていたと思われるいくつかの現象を拾い出すことができた。

すなわち、

- i) 励起時間はほぼ正規分布をするが、温度による影響は無視できない。
- ii) 発火時間の分布は全く正規分布と異つたものである。
- iii) パルスによる発火時間の分布 (直列結線の際の断線後におけるそれと同じ) 特性が知れた。
- iv) 断線は必ずしも発火と同時にではない。
- v) 断線時または発火時の白金線温度が推定された。

またここに使用した実験装置は今までのものにくらべれば取扱いが簡便であり、点火玉の特性をしらべる上に有用であつた。

点火玉をさらに合理的に使うために、まだ検討し残したことが多々あるが、それについては今後研究を重ねていきたい。この小文が多少でも点火玉発火特性の物理的イメージを判然させ得たならば幸いである。

終りに、本実験を行なうに当つてお世話になつた帝國火工品中和氏に謝意を表する。

文 献

- 1) Elwyn Jones, Proc. Roy. Soc. A 198, pp. 523~539 (1949)
- 2) 木下四郎, 工業火薬協会誌, 15, No. 1, 15, No. 3 および 16, No. 1

Ignition Characteristics of Squibheads

by

R. Akiba and S. Kayuta

Ignition phenomena of squibheads are studied experimentally in connection with the theory of simultaneous ignition of squibheads connected in series, by use of a specially designed trigger circuit.

First, the excitation time of the squibheads are measured with an application of square voltage wave. It is checked again that the distribution of the excitation time is regarded approximately as a normal distribution. It is also shown that the excitation time is sensitive to the ambient temperature. The minimum firing current which is obtained experimentally coincides well the value which is derived from the parameter of well known formula (1) on the excitation energy.

Second, the firing time of squibheads are not subject to the normal distribution as shown in figures 7, 8, the highest peak of distribution is located at smaller side of time.

The second small peak often appears at longer side of time. It is concluded that the theories in which the normal distribution is assumed for the firing time should be modified especially in the region of low ignition failure probability. Histograms of fired numbers of squibheads vs. time are also shown in figures 4, 5 when the square wave input voltage is applied. The type of the distribution is similar to the previous case. We can guess the firing time of squibheads connected in series after the current cut-off due to the firing of one of them.

Third, observations are made for the cut-off of bridge wires. The bridge wires are usually cut just after firing. But in case of low current input 2/3 remain unbroken after firing. When high current (6A in our experiment) is applied, the bridge wire is often cut (melted) before firing takes place. Temperature of the bridge wire just before cut-off are calculated from the resistance change. Typical deduced temperature rises are 100 to 200°C for 1A input current, and 600°C to 900°C for 3~4A input current.

NG-Ng 溶液の蒸気圧

横川六雄・浦川 孝・増富昭三*

1. 緒 言

産業用爆薬製造における NG 及び Ng に対する作業者の曝露の管理についての CIL の報告¹⁾によると、同製造所では、1936年より1964年迄紀約20年間の長期にわたり、非常に広範囲に Ng 曝露管理計画（測定法の改良、換気系の効率の改良、製造装置の改良）を実施し、NG中のNg量を25%より80%へ増加している。

此の期間中の爆薬製造作業者の病歴についての統計的解析の結果、Ng 中毒に最も影響する有意な要因は季節で、他の要因として、作業法、爆薬の型式、爆薬中の Ng の量をあげているが、病的な異常率は温度に正比例し、爆薬中の Ng の量及び割合については、それ程有意差を認めていない。温度の影響については、NG-Ng 混合物の蒸気圧からその効果を説明している。以上の点から NG-Ng 溶液の蒸気圧について実験を行なった。

先づ爆薬製造作業中の Ng ガスの発生過程を考えると、NG-Ng 溶液より Ng が発生し、次に発生蒸気の大気中への拡散が考えられる。此の場合最初の蒸発は NG-Ng 溶液の蒸気圧により発生し、次に大気中へ拡散した蒸気については、大気温度に相当する NG 及び Ng 単体の蒸気圧を呈し、ガス体として存在するか又大気温度が爆薬の表面温度より低い場合は、その一部は凝縮するものと考えられる。次にこれ等の蒸気圧に

ついて見ると、

1-1. Ng 蒸気単体の蒸気圧は表1に示す様に、過去及び最近の測定値は、何れも良く一致した値を示している。

Table 1 Vapor pressure of ethylene glycol dinitrate according to Brandner²⁾ and Lundborg³⁾

Temp. °C	P mmHg	
	Brandner ²⁾	Lundborg ³⁾
10	0.0185	0.020
15	0.0304	—
20	0.0490	0.052
25	0.0781	—
30	0.125	0.135
35	0.193	—
40	0.295	0.27
45	0.443	—
50	0.655	0.55

1-2. NG-Ng溶液の蒸気圧についても、Brandner²⁾によつて 10~50°C の温度範囲における任意の溶液の蒸気圧の計算式が導かれているが、此の式の誘導は NG-Ng 溶液の温度 40°C 及び 50°C で、20%、40%、60%、80%、Ng 濃度の蒸気濃度を測定し、理論濃度との一致を確認し NG-Ng 混合溶液が完全溶相であるという実験的根拠に基づき、熱力学との関係を求め計

*昭和41年11月19日受理
日本化薬株式会社厚狭製作所 山口県山形町厚狭