

MAR. 1976

RIIS-RR-24-9

UDC 662.61 : 534.222

# 産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-24-9

球面ガス爆ごう波の直接起爆限界エネルギー

松 井 英 憲

労働省産業安全研究所  
MINISTRY OF LABOUR  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

# 球面ガス爆ごう波の直接起爆限界エネルギー\*

松 井 英 憲\*\*

## The Critical Energy for Direct Initiation of Spherical Gaseous Detonations

by Hidenori MATSUI

The paper reports experimental results on the critical energies for direct initiation of spherical detonations using electrical sparks under various electrode geometries and spacings. The results indicate that for large spacings the detailed electrode configurations have no influence on initiation energy. The critical energy per unit length reaches a minimum asymptotic value corresponding to the value found previously for cylindrical detonations. For electrode spacing less than the characteristic explosion length, the electrode geometry has an effect on the initiation energy. The flanged and the pointed needle electrodes form the lower and upper bounds respectively for the critical energy for various electrode configurations. The results indicate that the effects of the electrode geometry are essentially those corresponding to the severity of gasdynamic expansion generated. The gasdynamic effects fall between the cylindrical and spherical symmetries. This paper also describes some new results for the critical energy for direct initiation of detonations in acetylene-oxygen mixtures using flanged electrodes. The present spark energies represent the true effective initiation energies, independent on discharge characteristics and electrode configurations and gap spacings.

Comparisons with existing data from exploding wire, laser and electrical sparks, as well as initiation by firing a planar detonation in a larger volume, indicate no qualitative differences in the dependence of the critical energy on mixture composition. As far as pressure dependence is concerned, the present results agree with the previous data on laser sparks and electrical sparks. However, for exploding wire and initiation by a planar detonation, much stronger pressure dependence is obtained. A simple model is proposed for direct initiation of spherical detonation by firing a planar detonation into a larger volume. The model enables critical tube diameter data to be reduced to equivalent energies, and good agreement between the critical diameter data of Matsui and the present critical spark energies is obtained on the basis of this model.

---

\* 第8回安全工学研究発表会 (Dec. 1975) において一部発表

\*\* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

## 1. 緒 言

近年可燃性ガスや液体の大量輸送、貯蔵、取扱い時においてパイプラインやタンク、反応容器などからの漏洩や噴出の結果、大量のガスや液体の蒸気が空間に拡がっている状態で着火が起り、大きな爆発事故を生じた例が数多く報告されている。この内の幾つかは衝撃波を伴ったはげしい爆発である爆ごう波が生じたものと推定されている\*。広い空間の中ほどで爆ごうが生じた場合には、その波面が球状に拡がってゆくのでこれを球面ガス爆ごう波と呼んでいる。爆ごうが生ずる過程には2種類の型がある。1つは、まず火炎が生じそれが徐々に加速して燃焼から爆ごうへと転移する型であり、もう1つは、点火源の近傍で点火源から直接に爆ごうが生じてしまう型である。広い空間における爆ごうの発生の場合、火炎の加速はなかなか起りにくいので後者の直接起爆過程が安全上重要になってくる。

爆ごう波を直接起爆させるためには強い衝撃波を生ずるような強力な点火源が必要である。この直接起爆の過程は点火源から発生した衝撃波の気体力学的流れ構造と化学反応過程との相関に依存している。従って点火源の特性や形状によって影響されることが考えられる。この球面ガス爆ごう波の直接起爆過程を明らかにし、その限界エネルギーを正しく評価することはこの種の爆発災害を未然に防ぐ手段を講ずる上で意義があるものと思われる。

従来起爆限界エネルギーは多くの研究者によって、種々点火源を用いて測定されている<sup>1-6)</sup>。例えば点火源としては電管、イクスプローディングワイヤ\*\*、電気スパーク、爆ごう波管やレーザ光線を用いたものなどがある。しかしながらほとんどの場合、点火源の特性（例えば電気スパークの場合のL-R-C）や形状が無視されているため、お互いの結果には数値もの差異が見られる。

本研究の目的は球面ガス爆ごう波の直接起爆過程を明らかにし、真に有効な起爆限界エネルギーを求めることである。今回の実験では点火源としてエネルギー放出の時間変化を比較的測定し易い電気スパークを用

い、電極形状および電極距離を種々変化させ、放電特性をも考慮した起爆限界エネルギーを求めた。更に従来得られている他の結果との比較検討を行い、異なる実験条件における結果の相互の関連を明らかにしたものである。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置

使用した爆発性ガスは主として化学量論組成のアセチレン・酸素混合ガス、初圧 100 Torr のものを用いた。一部の電極については初圧を 50 Torr から 300 Torr 迄変化させ、酸素中のアセチレン濃度を20%から60%迄変化させた。爆発容器には内径 12cm、長さ 12cm のスチール製円筒容器を用いた。直接起爆の過程は点火源近傍だけの問題であるから、実験的には小型の容器内で行っても器壁等の影響は無視することができる。この容器の中心で5つの異なる形状の電極を用いて電気容量火花を飛ばし、爆ごうが直接起爆されたか

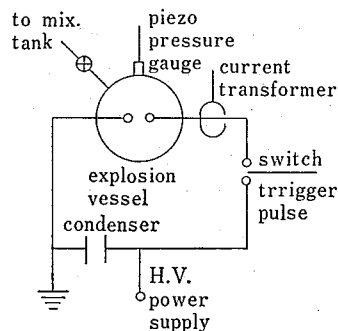


Fig.1 Schematic of the apparatus. 実験装置の概略

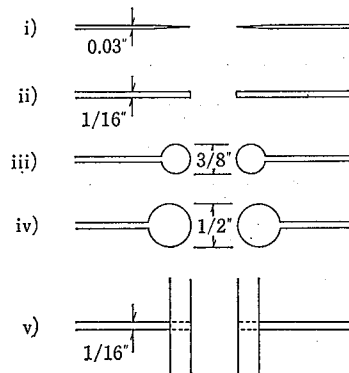


Fig.2 A sketch of the five electrode geometries. 電極の形状

\* 1970, 4/8, 大阪地下鉄工事現場での都市ガスの爆発  
1973, 10/18, 千葉ポリプロピレン工場でのプロピレンの爆発  
1973, 10/28, 新潟塩ビ工場での塩ビモノマーの爆発

\*\* (金属)細線爆発ともいう。

どうかは器壁に取り付けたピエゾ圧力変換器の出力から判定した。同時に放電電流を電流計でモニターしてシンクロスコープ上に記録した。Fig.1 に実験装置の概略を示した。

## 2.2 電極の形状および距離

Fig.2 に使用した5種類の電極形状を図示した。夫々の電極について、電極距離を最小0.25 cm から最大3.5 cm 迄変化させた。

- i) 外径0.8 mm の縫針を用いた先の尖った電極
- ii) 外径1.6 mm のステンレススチール製の端面がフラットな電極
- iii) ii)の電極の先端に外径9.5 mm のクロムメッキした真鍮製球を取り付けた電極
- iv) iii)と同様に外径12.7 mm の球を取付けた電極
- v) ii)の電極の先端にプラスチック製フランジを容器内にいっぱい大きさに取り付けた電極

## 2.3 放電エネルギーの測定

Photo. 1 に電気スパークの電流波形ならびにピエゾ

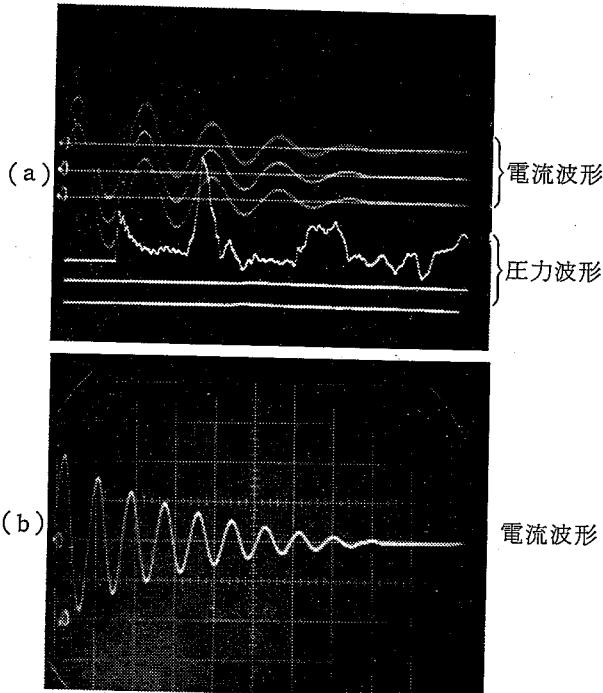


Photo. 1 discharge current and pressure traces.

- (a) : 25 V/div., 1 μs/div. for current, 5 V/div., 20 μs/div. for pressure.
- (b) : 25 V/div., 2 μs/div., for current in shunted.

電流および圧力波形

圧力変換器による圧力波形の一例を示した。起爆限界エネルギーの測定の方法は、それぞれの点火条件について電流と圧力の出力を同時にシンクロスコープ上に取り、ポラロイドカメラで記録した後に波形の解析を行った。すなわちコンデンサの容量を一定にしておいて徐々に放電電圧を上げてゆき、爆ごうが生ずる最低の電圧を求めた。Photo. 1 (a) の下3つの圧力波形を見ると、下の2つは爆ごうが生じなかった時の波形で、スパークによって生じた衝撃波が減衰して壁面の圧力素子に到達してわずかな圧力の立上がりが見られるのみである。圧力波形の一番上では電極近傍で爆ごうが生じたため、このように早い時間にするほど高い圧力の立上がりが見られる。従って爆ごうが生じたかどうかの判定は極めて容易である。(a)の上の3つの波形は対応する電流波形の例である。爆ごうが生ずる最低の電圧における放電エネルギーを測定すれば、その実験条件における起爆限界エネルギーが求まる。この放電エネルギーは放電電流  $i$  とスパークギャップの抵抗値  $R_S$  から計算した。

放電電流  $i$  は

$$i(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t)$$

で表わされる。ここで、 $A = V_0 \sqrt{C/L}$ ,  $\alpha = R/2L$ ,  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  である。

まず電流波形の周波数から角速度  $\omega$  が求まる。 $\omega$  とコンデンサの容量  $C$  から回路のインダクタンス  $L$  が求まる。 $L$  が求まれば減衰率  $\alpha$  と  $L$  から回路の全抵抗値  $R_T$  が求まる。 $R_S$  は限界実験条件における  $R_T$  とスパークギャップを短絡した時の回路抵抗  $R_C$  との差から求めた。Photo. 1 (b) にスパークギャップを短絡した時の電流波形の一例を示した。この波形から  $R_C$  が求まる。従って、

$$R_S = R_T - R_C = (\alpha_T - \alpha_C) \cdot 2L$$

一旦  $R_S$  が求まれば放電エネルギー  $E$  は

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_0^t i^2 R_S dt \\ &= \frac{A^2 R_S \omega}{4(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ \frac{\omega}{\alpha} - e^{-2\alpha t} \left( \sin 2\omega t - \frac{\alpha}{\omega} \cos 2\omega t + \frac{\alpha^2 + \omega^2}{\alpha \omega} \right) \right\} \end{aligned}$$

から容易に計算できる。

本実験においては直接起爆に要するエネルギーを決定するために、平均出力  $\bar{P}(t) = E(t)/t$  なる量をパラ

\* これは放出されるエネルギーの時間的密度を意味している (average power).

メーターに取り、これが最大になるまでに放出されたエネルギーのみがスパークによって生ずる衝撃波の強さを決定することから、このエネルギーを実際の起爆に有効に働いたエネルギーとして採用した。この値は  $\bar{P}(t^*) = (E(t^*)/t^*)_{\max}$  になる  $t^*$  が反応誘導時間に匹敵する位短い場合には放電特性 (L-R-C) には依存しないということが先に認められている<sup>7)</sup>。今回の実験でもコンデンサの容量を種々に変化させて放電周波数を変えて実験を行い、限界エネルギーは放電特性に依存しないことを確認した短い放電時間の回路を用いて測定した。

ここで具体的なエネルギーの測定方法について述べる。まずスパークギャップの抵抗値  $R_S$  を決定するためには放電電流の減衰率  $\alpha$  を求めなければならない。Fig.3 は振動電流のピーク値を時間に対してプロットした図の一例である。下のプロットは起爆限界条件で放電させた時、上のプロットはそれと同一条件でスパークギャップを銅棒で短絡した時の  $\ln i \sim t$  の曲

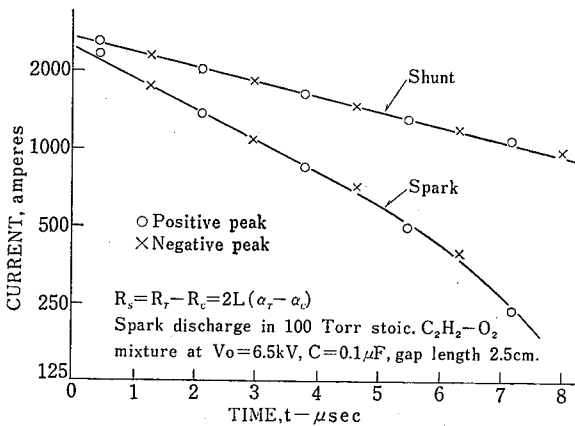


Fig.3 Variation of peak current with time respect to spark discharge and shunted discharge.  
ピーク電流の時間変化

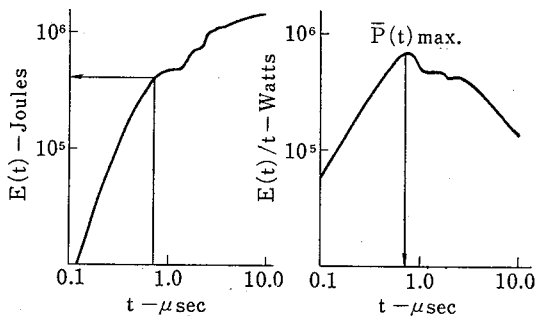


Fig.4 Time history of discharge energy and average power.  
放電エネルギーおよび平均出力の時間変化

線である。この図より放電の初期の時間ではプロットは直線となり、その傾きが減衰率  $\alpha$  を示していることが分る。この事は問題となる放電の初期の時間では回路の抵抗が一定であることを示している。従ってこれらの  $\alpha_T, \alpha_C$  から容易に  $R_S$  が求まるわけである。

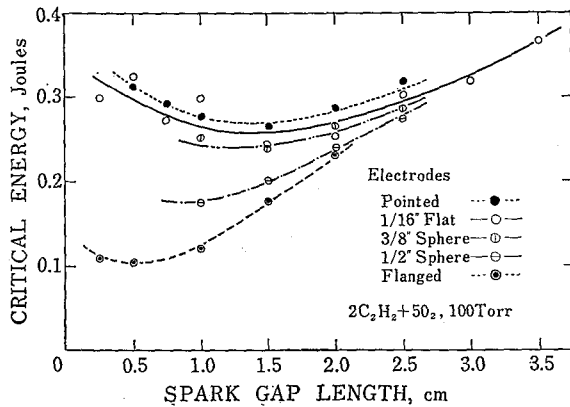
次にこの  $R_S$  を用いて  $\int_0^t i^2 R_S dt$  から求めた放電エネルギーおよび平均出力の時間変化を Fig.4 に示した。座標はどちらも両対数で表示した。この図より放電エネルギーの方は最初の短い時間では時間の3乗に比例して急激に増大し、平均出力が最大になる時間\*を過ぎた頃から周期的に緩慢な増大を続け、コンデンサの全電荷が放出されたところで最大値に達することが分る。一方平均出力の方は最初の短い時間では時間の2乗に比例して増大し、ある時間で最大値を示し、その後は徐々に減少してゆくことがわかる。この最大値までに放出されたエネルギーが、生ずる衝撃波の強さに対して有効なものであり、それ以後に放出されたエネルギーは起爆過程に対して何ら寄与しない<sup>7)</sup>。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 起爆限界エネルギーに対する電極の形状および距離の影響

化学量論組成のアセチレン・酸素混合ガス、初圧 100 Torr について得られた直接起爆限界エネルギーをそれぞれの電極形状について電極距離に対してプロットした結果を Fig.5 に示した。この図からわかるように、球面爆ごう波の直接起爆には針状電極の場合が最も大きなエネルギーを必要とし、フランジ型電極の場合が最も小さなエネルギーで済むことがわかる。これは針状電極の場合はスパークによって生じた衝撃波は3次元に拡がるために減衰が最も大きく、フランジ型になるにつれて空間の拡がり方が2次元に近づくため衝撃波の減衰が小さくなるからである。一方電極距離が短くなると起爆限界エネルギーが大きくなるのは電極によるエネルギーの損失が増大するためと思われる。電極距離が長くなると単位スパーク長さ当りのエネルギーを一定に保つためには限界エネルギーの全体値は直線的に増大することとなる。

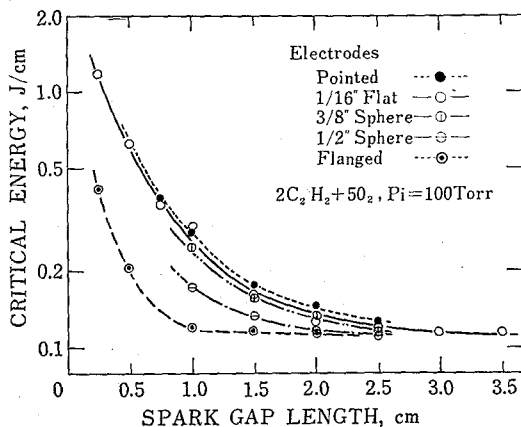
\* この時間は出力  $i^2 R_S$  が最大になる時間 ( $t = \pi/2\omega$ ) よりやや遅れる。



**Fig. 5** Critical energy for direct initiation of detonation with respect to electrode spacing for various electrode geometries in stoichiometric oxy-acetylene mixture at 100 torr initial pressure.

電極距離および電極形状と起爆限界エネルギー

ここで点火源が線状の電気スパークであることから全体を比較し易くするために単位電極距離当りのエネルギーを取って結果を再プロットしてみると Fig. 6 の結果が得られる。この図から次のことがわかる。すなわち、電極距離が約 2cm より長くなると起爆限界エネルギーは電極の形状に関係なく約 0.1 Joule/cm という値に漸近する。直接起爆の過程においては爆ごうが生ずる最小の距離が存在するはずである。なぜならスパークによって生じた衝撃波によってガスが加温、加圧されても化学反応はすぐには起らず、ある反応誘導時間の後に反応が始まるからである。従ってこの距離は化学反応性の異なるガスに対しては異なる距離に



**Fig. 6** Critical energy per unit length for direct initiation of detonation.

電極距離および電極形状と単位電極距離当りの起爆限界エネルギー

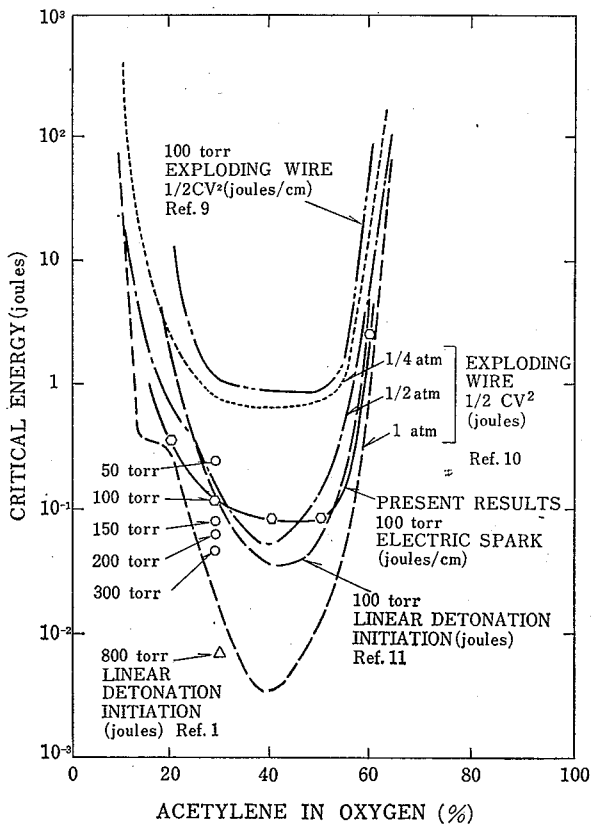
なり、起爆限界エネルギーも当然別のガスに対しては違ってくる。当該ガスの場合、この起爆最小径は約 2cm と推定される。電極距離が 2cm より短い場合には爆ごうが生ずるよりも早く電極端から生じた擾乱が先に電極の中心面近くへ到達するので電極形状が起爆過程へ影響を与えることとなる。従って電極距離が起爆最小径より大きい場合には電極形状は起爆過程に何ら影響を与えず、たとえ広い空間における起爆の場合 (Spherical) でも最小起爆限界エネルギーは二つの平面に狭まれた円筒空間 (Cylindrical) における単位電極距離当りの起爆限界エネルギーが普遍的なものであると見ることができる。フランジ形電極を用いた場合の起爆過程は、この円筒空間におけるものに相当している。この場合単位電極距離当りの起爆限界エネルギーは常に一定になるはずであるが実際には電極距離が 1cm より短くなると増大し始め、0.5 cm 以下では急激に増大している。この長さは当該ガスのトランスバースウェーブの大きさに相当しており<sup>8)</sup>、フランジ型電極に狭まれた空間の厚さがこの長さより小さくなるとフランジによる境界層や熱伝達の影響が大きく効いてくることを示している。この電極距離をさらに小さくしてゆけば爆ごう伝播の限界距離に至り、起爆限界エネルギーは無限大となるべきものである。

### 3.2 種々点火源による従来の結果との比較

円筒空間における放電時間がある限界値より短い電気スパークを用いて測定した単位電極距離当りの起爆限界エネルギー値は電極形状、電極距離や放電特性 (例えば L-R-C) に依存しない真に有効な限界エネルギーであることがわかった。従ってこの考え方に基いた限界エネルギーの測定結果は爆発性混合ガスの化学的、物理的特性に対する起爆限界エネルギーの真の依存性を反映したものとみることができる。

フランジ型電極を用いて、アセチレン・酸素混合ガスについて初圧 100 Torr でアセチレン濃度を 20% から 60% まで変化させた結果および化学量論組成において初圧を 50 Torr から 300 Torr まで変化させた時の結果と従来から得られている種々点火源を用いた他の結果との比較、検討を行った。それぞれの結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示した。

Fig. 7 はアセチレンの濃度変化に対する起爆限界エネルギーの依存性についての結果を示したものである。同時に他の測定法による結果と比較するために、

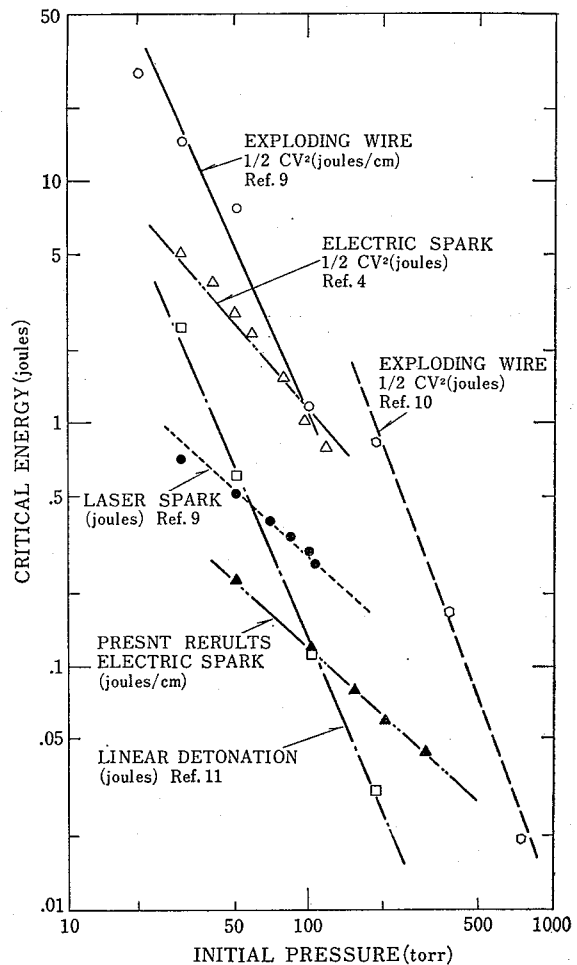


**Fig. 7** Variation of the critical energy for direct initiation versus acetylene concentration. アセチレン濃度に対する起爆限界エネルギーの種々測定値

イクスプローディングワイヤを用いたLeeらの結果<sup>9)</sup>, Litchfield らの結果<sup>10)</sup> および細い管での爆こう波によって広い空間の同じ混合ガスを起爆させた時の細い管の起爆限界径のデータ<sup>11)</sup>から計算した結果をプロットしたものである。イクスプローディングワイヤによるLeeおよびLitchfieldの結果は最初にコンデンサーに貯えた全エネルギー値 ( $E_T=1/2 \cdot CV^2$ ) で報告している。

Leeの結果は円筒空間において初圧 100 Torr で測定した値を単位電極長さ当りのエネルギー値で示している。Leeの結果は本実験の結果より約1桁エネルギー値が大きくなっているが、これはエネルギーを有効エネルギーでなくコンデンサーに当初に貯えた全エネルギー ( $E_T=1/2 \cdot CV^2$ ) で示したためであり、本実験の結果とは定性的には良く一致しており、定量的にも矛盾するものではない。

Litchfieldのイクスプローディングワイヤの結果<sup>10)</sup> は初圧 0.25, 0.5 および 1 気圧で測定されたものであ



**Fig. 8** Dependence of the critical energy for direct initiation on the initial pressure for stoichiometric acetylene-oxygen mixtures. 初圧に対する起爆限界エネルギーの種々の測定値

るが、イクスプローディングワイヤの長さはエネルギー効率が最適になるように 1cm から 4.5cm まで変化させたものである。従ってこの結果を単位電極距離当りのエネルギー値に換算して本実験の結果と直接に比較することはできない。しかしながら定性的にはLeeの結果とも本実験の結果とも一致しているといえる。これらの結果はすべてアセチレン濃度30~50%の範囲で最小値を取り、その両側で急激に増大し、特有のU字形の曲線となる。このような電気スパークとイクスプローディングワイヤの結果の定性的および半定量的結果の一致は、この二種の点火源に対して起爆機構が極端には違わないことを示唆している。この種の起爆過程は爆風起爆 (blast initiation) と呼ばれる。

さらに管中の爆ごう波によって広い空間のガスを起爆させた時の管の限界径のデータ<sup>11)</sup>を本実験の結果と比較するために、等価の限界エネルギー値に変換する必要がある。そのために以下のモデルを仮定して計算を行った。爆ごう波が管端から出る時に広い空間のガスへ与えられるエネルギーは、管路から噴出する爆ごう生成ガスと広い空間のガスとの接合面によってなされる仕事で評価される。すなわち

$$E = \int_0^t P U A dt$$

ここで、 $P$ は圧力、 $U$ は生成ガス粒子速度、 $A$ は接合面の面積を表わす。実験的に限界条件下では球面爆ごう波はほとんど常に管の中心軸上、管端から管径の距離だけ離れた位置で発生することが観測されている<sup>12)</sup>。管中の平面爆ごう波は急に広い空間に出るため、管壁から管の半径方向へ進む希薄波\*によって減衰させられる。従ってこの希薄波が管の中心へ到達するまでに管端から放出されたエネルギーのみが起爆に有効に働くものを見ることが出来る。すなわち  $t \approx d_c/2c$  となる。ここで  $d_c$ は起爆限界径、 $c$ は爆ごう波背後の音速である。ここで  $P$ は  $P_{C-J}$ 、 $U$ は  $U_{C-J}$  で与えられる。添字 C-J は Chapman-Jouguet 爆ごう波に相当する値であることを示す。任意の時間  $t$  において管軸付近の平面爆ごう波の未減衰面積  $A$ は、 $A = \pi R^2 = \pi(ct)^2$  で示される。従って妥当と思われる有効な起爆限界エネルギーは以下の如くなる。

$$E = \int_0^{d_c/2c} P_{C-J} \cdot U_{C-J} \cdot \pi(ct)^2 dt$$

$$= \frac{\pi P_{C-J} \cdot U_{C-J} \cdot d_c^3}{24 c} \quad (1)$$

この式によって起爆限界径  $d_c$  をエネルギー値に変換することができる。これらの結果は本実験結果と比較して、点火源が円錐形であることを考慮すれば、かなり良い一致を示しており、式(1)の妥当性が推定される。

Zeldovich らの起爆限界径のデータ<sup>1)</sup>では、初圧 800 Torr において化学量論組成のアセチレン・酸素混合ガスで、 $d_c = 2.5 \text{ mm}$  という結果が得られている。この値を式(1)を使って限界エネルギーに変換してみると  $5.9 \times 10^{-3} \text{ joules}$  という値が得られる\*\*。この値は Litchfield らの初圧 1 気圧での結果<sup>10)</sup>を外挿した値約  $10 \times 10^{-3} \text{ joules}$  とかなり良く一致している。

起爆限界エネルギーの初圧への依存性についての結果を Fig.8 に示した。いずれも化学量論組成のアセチレン・酸素混合ガスにおける測定値である。本実験の結果と Bach らのレーザースパークおよび電気スパークを用いて得られた結果<sup>4)</sup>とを比較してみると、いずれも同じ圧力依存性を示していることがわかる。すなわち測定エネルギーは初圧の逆数に比例している ( $E \sim 1/P$ )。反応の誘導時間  $\tau$  が同様に  $1/P$  比例することから限界エネルギーは  $\tau$  に比例することが示唆される。定量的に本実験の結果は Bach らの電気スパークの結果<sup>4)</sup>より約 1 桁小さい。これは Bach らの結果がコンデンサに貯えられた全エネルギーで報告されているからである。レーザースパーク\*の結果<sup>4)</sup>と比較すると、本実験の結果は約 1/2 ほどであった。この相異はたぶんレーザースパークの形状がビームの方向へ多少長く伸びるため楕円形になるからであろう。楕円形状の方が円筒形状の場合より速く爆風が減衰するので、より多くのエネルギーが必要となる。

イクスプローディングワイヤによる Lee らの結果<sup>9)</sup>は初圧で 20~100 Torr の測定値であり、一方 Litchfield らの結果<sup>10)</sup>は初圧 0.25, 0.5 および 1 気圧における値である。この両者の結果はいずれも同じ圧力依存性を示しているが、Litchfield の結果の方が約 5 倍ほど大きい。これは Litchfield のイクスプローディングワイヤの長さは一定ではなく、最大で 4.5 cm であることからして単位長さ当りのエネルギー値にすればさらに良い一致を示すものと思われる。両者を本実験結果と比較すると、イクスプローディングワイヤによる測定エネルギー値ははるかに強い圧力依存性を示すことがわかる。すなわち低圧下では起爆には大きなエネルギーを要するが、高圧下では極めて小さなエネルギーで爆ごうを起し得ることを示している。これはイクスプローディングワイヤによるエネルギーのガスへの伝達機構が極めて複雑で、初圧、金属線の材質、太さ、長さ、電圧や L-R-C 等のパラメーターが複雑に関与しているためと思われる。従って単純に限界エネルギーの圧力依存性を説明することは難しいが、この場合は起爆過程では膨張する金属蒸気によってなされる仕事によってエネルギーがガスへ伝達されるものと思われる。さすれば爆風エネルギーは当然圧力依存性を示すことになる。初圧が下がれば放電エネルギーの内、爆

\* 希薄波は局所音速で伝播する。

\*\*  $P_{C-J} = 33.8 \text{ atm}$ ,  $U_{C-J} = 1106 \text{ m/sec}$ ,  $c = 1316 \text{ m/sec}$ .

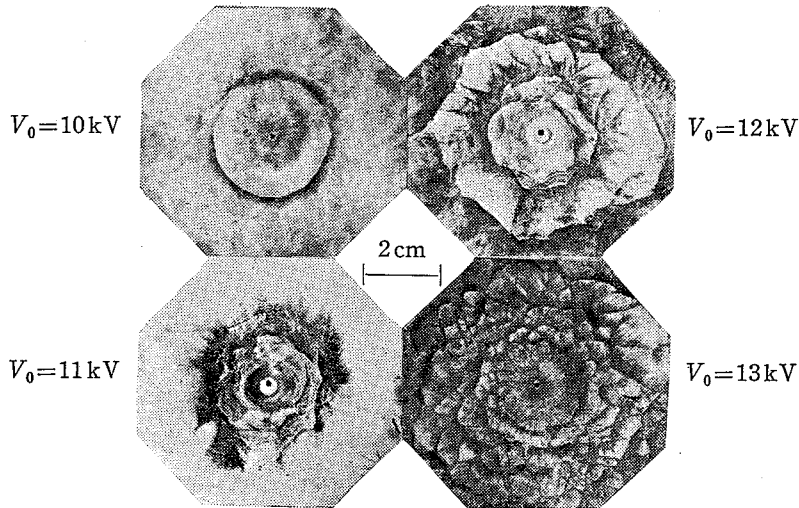
\* レーザースパークの放電時間は極めて短かく、この場合約  $20 \times 10^{-9} \text{ sec}$  である。



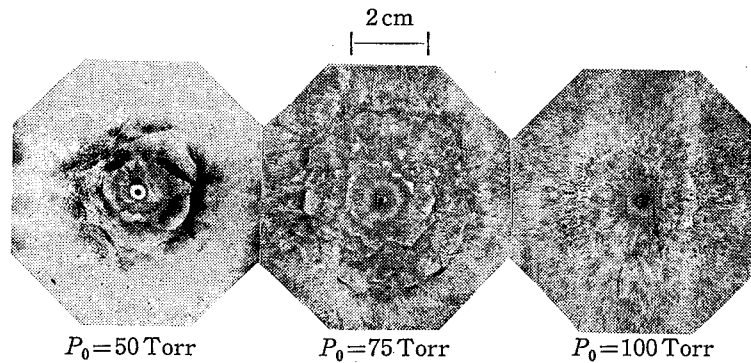
風へ与えられるエネルギーは減少し、金属蒸気の内部エネルギーとして残る割合が増えるからである。起爆過程は爆発性ガスへ伝達されたエネルギーだけに依存するものであるから低圧になるほどその割合が減り、強い圧力の依存性を示すものと思われる。電気スパー

クの場合には、全放電エネルギーは初圧に関係なくガスへ与えられる。従ってこの場合の圧力依存性は起爆機構そのものによる。

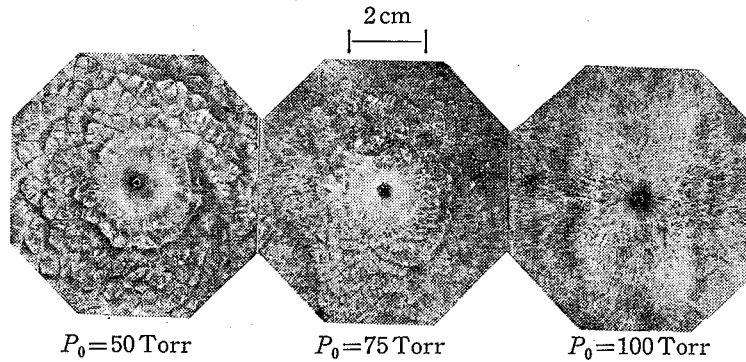
平面爆ごう波による起爆の場合、起爆限界径のデータに<sup>11)</sup>基いて計算した限界エネルギー値は、イクス



(a) ( $2C_2H_2 + 5O_2$ ,  $P_0 = 50$  Torr,  $C = 0.1 \mu F$ )



(b) ( $2C_2H_2 + 5O_2$ ,  $V_0 = 10$  kV,  $C = 0.1 \mu F$ )



(c) ( $2C_2H_2 + 5O_2$ ,  $V_0 = 15$  kV,  $C = 0.1 \mu F$ )

Photo. 2 Soot patterns on a flange of the flanged electrode.  
フランジ型電極のフランジ表面上の煤模様

プローベイングワイヤによる結果と全く同じ圧力依存性を示した。このことはたぶんこれらの2つの起爆過程に対するガスへのエネルギー伝達機構が類似しているからであろう。平面爆ごう波による起爆ではガスへのエネルギーの伝達はやはり広い空間のガスと爆ごう生成ガスの境界面の仕事によってなされる。この仕事はイクスプローベイングワイヤの場合と同様に圧力に依存することとなる。

### 3.3 フランジ型電極における煤模様

Photo. 2にフランジ型電極を用いた場合のフランジ表面で得られた煤模様を示した。いずれも化学量論組成のアセチレン・酸素混合ガスにおけるものである。(a)は初圧を 50 Torr 一定にして放電電圧を変えた時の状況を示している。10kV の場合、電極から約 1.5cm の位置で一回だけトランスバースウェーブの軌跡が見られるが、その後すぐに減衰して爆ごうには至っていない。11kV では幾つかのトランスバースウェーブが見られるがその後やはり減衰してしまっている。これらをいずれも亜限界 (subcritical) の状態と呼んでいる。12kV では初め生じたトランスバースウェーブが一旦減衰するが再び加速されて勢いを盛り返し、爆ごうが再生する過程を示しており、これを限界 (critical) の状態と呼ぶ。この場合の起爆エネルギーが限界エネルギーに相当する。13kV では最初から強い爆ごうが生じており、そのまま爆ごうは継続して伝播して行く。これを超限界 (supercritical) の状態と呼んでいる。(b)では放電電圧を 10kV 一定にして初圧を 50, 75 および 100 Torr と変化させた場合の状況を示しており、この場合にも同様に亜限界、限界および超限界の様子を示している。(c)では放電電圧を 15kV一定にして、初圧を 50, 75 および 100 Torr と変化させた場合であるが、いずれも超限界の状態を示している。ここでは初圧が高くなるとトランスバースウェーブの大きさは小さくなるのがわかる。この写真からも初圧 100 Torr の場合、電極から約 1cm の位置で爆ごうが発生していることが確認できる。

## 4. 結 言

本研究の結果以下のことが明らかとなった。電気スパークによるガス爆ごう波の起爆過程においては最小起爆径 (explosion diameter) が重要なパラメーター

となる。電極距離がこの起爆径に較べて大きい場合には、起爆過程は電極形状には影響されず、たとえば広い球状の空間における起爆の問題でもすべて本質的に円筒空間におけるものに帰結される。電極距離が起爆径より小さい場合には、起爆限界エネルギーは電極形状に影響されることとなり、先の尖った電極の場合が最大値を与え、フランジ型電極の場合最小値となる。これは前者の場合にはスパークによって生じた衝撃波の減衰が最も大きく、後者の場合には空間形状が円筒状に対応しており、衝撃波の減衰が最も小さくなるからである。従って起爆限界エネルギーの測定値を比較する場合には点火源の特性の他に点火源の形状や大きさも十分に考慮されなければならない。

球面ガス爆ごう波に対しても円筒空間における起爆過程が本質的なものであるという結果から、フランジ型電極を用いた起爆限界エネルギーの測定値を他の異なるタイプの点火源の場合の結果との比較の基準にすることができる。電気スパーク、イクスプローベイングワイヤ、レーザースパークおよび管中の平面爆ごう波を用いた他のデーターとの比較、検討を行った結果、特に限界エネルギーの圧力依存性のカーブから、種々タイプの点火源によるガスへのエネルギー伝達機構および起爆過程の効率について有益な知見を得ることができた。

## 5. 謝 辞

本研究は Department of Mechanical Engineering McGill University, Canada において、科学技術庁派遣長期在外研究員として、J. H. Lee 教授の指導のもとに行ったものである。ご指導をいただいた Lee 教授をはじめ、Shock Wave Physics Laboratory の方々および大学院生の Mr. K. Ramamurthi には実験上の技術や有益な助言をいただいたことを深く感謝致します。本研究の機会を与えられた科学技術庁に対しても感謝致します。(51・3・24受理)

## 文 献

- 1) Zel'dovich, Y. B., Kogarko, S. M. and Semonov, N. N., Soviet Physics Technical Physics 1, p.1689 (1957)
- 2) Freiwald, H. and Koch, H. W., Ninth Symposium (International) on Combustion, p.275, Academic Press (1963)

- 3) Litchfield, E. L., Hay, M. H. and Forshey, D. R., Ninth Symposium (International) on Combustion, p.282, Academic Press (1963)
- 4) Bach, G.G., Knystautas, R. and Lee, J. H., Thirteenth Symposium (International) on Combustion, p.1097, The Combustion Institute (1971)
- 5) Lee, J.H., Knystautas, R. and Guirao, C.M., Fifteenth Symposium (International) on Combustion, p.53, The Combustion Institute(1975)
- 6) G. A. Carlson, Combustion and Flame, 21, p.383 (1973).
- 7) Knystautas, R. and Lee, J. H., "On the Effective Spark Energy for Direct Initiation of Gaseous Detonations", (Submitted to Combustion and Flame, September (1975))
- 8) Strehlow, R. and Engel, C. D., AIAA Journal 7, p.492 (1969)
- 9) Lee, J.H., Lee, B.H.H. and Knystautas, R, Phys. Fluids 9, p.221 (1966)
- 10) Litchfield, E. L., Hay, M. H. and Forshey, D.R., US Bureau of Mines Rept. 7061 (1967)
- 11) 松井, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-22-2 (1973)
- 12) 松井, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-20-5 (1972)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-24-9

---

昭和 51 年 6 月 20 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所  
東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号  
電話 (03) 453-3441 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

---

郵便番号 108

UDC 662.61 : 534.222

球面ガス爆ごう波の直接起爆限界エネルギー

松井英憲

産業安全研究所報告 RIIS-RR-24-9, 1~10(1976)

アセチレン・酸素混合ガスについて、球面ガス爆ごう波の電気容量火花による直接起爆限界エネルギーにおよぼす電極形状および電極距離の影響について実験的な研究を行った。その結果電極距離が最小起爆径より大きい場合には、球面ガス爆ごうの起爆過程は円筒空間におけるそれに帰結することがわかった。この本質的な測定値を基準にして概に得られている他の種々の点火源による測定値との比較、検討を行い、種々点火源によるガスへのエネルギー伝達機構および起爆過程での効率について有益な知見を得た。

(図8, 写真2, 参12)



UDC 662.61 : 534.222

The Critical Energy for Direct Initiation of Spherical Gaseous Detonations  
by H. Matsui

Research Report of Research Institute of Industrial Safety RIIS-RR-24-9, 1~10 (1976)

The paper reports experimental results on the critical energies for direct initiation of spherical detonations using electrical sparks under various electrode geometries and spacings in oxy-acetylene mixtures.

The results indicate that for spacings which is larger than the formation distance of detonation wave, the detailed electrode configurations have no influence on initiation energy, then the geometry is essentially cylindrical.

This paper also describes comparisons with existing data from various initiation sources. It is possible to establish the energy transfer mechanisms and the efficiency of the initiation processes with various types of igniters.

(8 figures, 2 photographs, 12 references)

