

8. 木粉類ダスト層の最小発火エネルギーの検討*

松 田 東 栄**
内 藤 道 夫**

An Investigation of Minimum Ignition Energies for the Layers of Some Wood Dusts

by Toei MATSUDA
and
Michio NAITO

In wood process industries, values of minimum ignition energies are required for safety standards in relation to possible explosion hazards of wood dust clouds. A mass of data on the ignition energy are available for dust clouds, but the data for the ignition energies of dusts as deposits, heaps or their layers and the accuracy of the values are limited.

In this paper the method to determine the minimum ignition energy of dust layers is reported with measurements of the values for some wood dusts. Spark electrodes were located in tight contact with the surface of the dust layers and the stored energy in a condenser was discharged at the spark gap. The energy released in the spark was determined by computer-aided integration of voltage and current traces on a digitized synchroscope.

On the release of sufficient energy at the gap, flaming of dust particles could be possible above the layer (Photo 8-1), but it would become difficult to recognize the ignition as criticality for ignition is approached (Photo 8-2). The photocell positioned above the electrode gap was then employed in order to facilitate the finding of ignition with naked eyes. An ignition criterion near the critical value was that glowing particles were discernible at the spark.

Experiments have also been carried out to study the influence of electrode configuration, electrode separation, bulk density of the dust layer and particle size on the minimum ignition energy of lycopodium and wood dusts. The results show that particle size has a strong influence on the minimum ignition energy, and that optimum spark gap width is in similar order of values to those of gaseous or dust/air mixtures. The spark discharge induces dispersion of dust particles around the electrode gap (Photo 8-4), and subsequent ignition of the particles could be given if sufficient energy is dissipated. It seems likely that dispersability of dust particles due to the ignition spark may have an important effect in determination of minimum ignition energies of dust layers. The dispersion mechanism is likely that the dust is denuded, i.e. an earpickfull of dust is removed suddenly from the dust surface.

The minimum ignition energies obtained for eleven different wood dusts with mean particle diameters ranging from 10 to 22 microns are summarized in Table 1. It will be of interest to compare these with results for dust clouds of the same samples and we expect that the method described here for dust layers can be useful in place of the testing method for dust/air mixtures.

* 第14回安全工学研究発表会 (1981, 12月3日) で講演。

** 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

8.1 まえがき

木材は我国では燃料としての重要性を失っているが、化石燃料とともに天然資源の代表的な可燃物の一つであり、これを加工あるいは利用する多くの状況で、その燃焼現象に基づく災害の発生が過去無限に経験されてきた。従って、その災害予防と防止対策の確立は人類の悲願でもある。

特に、各種木材を扱う木工工場では、切削、切断などの作業に伴って多くの木粉が生成される。また、パーティクル・ボード製造工場などでは木粉が多量に利用されるなど、産業界での使用用途は思いのほか広い。微粉化された木粉は全体の粒子表面積が著しく増大し、空気中において酸化反応を受けやすく、堆積ダスト(粉じん：以下ダストという)層の自然発火や粉じん爆発を起こす危険性がある。それ故、これらの危険性の評価は災害予防の立場からも大切である。

木粉類の火災・爆発の危険性評価のために、自己発火危険を示す値として発火温度が最も意義があり、かつ広く利用される所以であるが、外部の点火源からの発火し易さを示す値(示量値)として発火エネルギーを測定することも意義があると考えられる。もとより発火温度にせよ発火エネルギーにしても物質固有の定数とは考え難く、危険性評価に使用する上で問題がないわけではないが、限定条件下での比較の目安になることは明らかである。また、木工工場でもバグフィルター内の沪布上に捕集、堆積したダスト層上における静電気放電による発火などにみられるように、層状ダストの発火エネルギーの把握は重要である。原因不明の爆発の解明にも有用であろう。

これまで、可燃性ダストの発火エネルギーとして浮遊ダスト(ダスト/空気・混合物、またはダスト雲)に対する値が多く測定されてきた。しかし、空間中に均一な濃度のダスト雲を形成し難いという実験上の制約もあって、浮遊ダストの最小発火エネルギーを測定することはかなりの労力を必要とする。そこで、ここでは木粉の堆積ダスト層の発火エネルギーの測定方法を検討して、木粉の発火危険性を調べてみた。

最小発火エネルギーは電気火花法によって測定される。電気火花は短時間に集中的にエネルギーを与える、エネルギー密度の高い発火源である。堆積ダスト層の最小発火エネルギーの測定方法は、容量電気火花によ

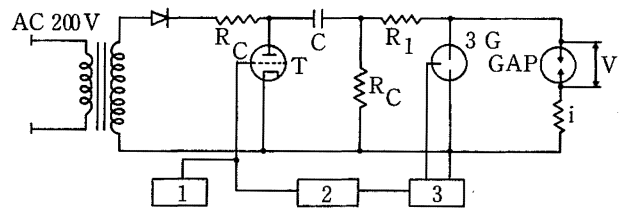
る発火を観察して、可燃性ダストの種類・粒子径、外部条件などによって定まった限界の放電エネルギーを見出すことに他ならないが、これまで米国鉱山局(U.S. Bureau of Mines)の可燃性ダスト試験方法¹⁾のなかの一つが知られている。その方法は次のようなものである。すなわち、ダスト層を鋼板上に形成して、この鋼板をコンデンサの負極側に接続する。次に、コンデンサの正極側に接続した針電極を放電する距離までダスト層に接近させる、というものである。コンデンサの容量および充電電圧をそれぞれC、Vとした場合、放電エネルギーEは、

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

によって与えられる、としている。一方、火薬類粉末の感度試験の一つとしても同類の方法が使用されている。²⁾しかし、簡便な試験方法として有用であるかもしれないが、これらは放電条件が一定にならず、発火エネルギーの精密な測定はなし得ないと考えられ、信頼できるデータもあまり報告されていないので、以下その改良法について述べる。

8.2 実験装置および試料

放電火花発生装置の概略を Fig. 8-1 に示す。交流電圧をダイオードと充電抵抗 R_c を通してコンデンサ C を充電する。コンデンサ C に蓄えられたエネルギーは、サイラトロン T を導通状態にすることによって着火電極 GAP 間に放電火花として放出させる。この



- 1. Power and switches.
- 2. Discharge-time setting unit.
- 3. Trigger unit.
- C : Condenser
- T : Thyatron
- 3 G : Three points gaps
- GAP : Electrodes for ignition tests
- v, i : Spark voltage and current.

Fig. 8-1 Schematic diagram of ignition unit.
放電火花発生回路

装置の特徴は、 $10\mu\text{s}$ 単位で火花放電時間を $10\mu\text{s}$ から 9.99ms まで放電波形を裁断する方式で変化できることにある。裁断の目的のため、火花持続時間設定回路およびトリガー回路を使用している。すなわち、これらの回路からのパルスで裁断後の電気エネルギーの一部は、三点ギャップ 3 G において別個の放電火花として放出される構成になっている。

主電極間での放電時の電極間電圧 $v(t)$ は高圧分圧器 (1:1000) により、放電時の電流 $i(t)$ は電流測定用抵抗 R_1 の両端電圧降下としてそれぞれ検出し、両者をデジタル式メモリスコープ (12bit, 500ns/point) に記録した。なお、無誘導の低抵抗値を得るため、線径 0.26mm , $8.26\Omega/\text{m}$ のマンガニン線を電流測定用抵抗として使用した。かくして得られる放電エネルギー E' は、放電時間を t_d 、時間を t として、

$$E' = \int_0^{t_d} v(t) \cdot i(t) dt$$

によって求まる。メモリスコープにパソコン (HP85, YHP) を接続することにより上記の積分をオンラインで計算させ、以後のデータ管理を行った。

焼焼容器として、Fig. 8-2に示すように、透明アクリル板製の閉固箱 ($11 \times 16 \times 15\text{cm}$) を用意した。プラスチック平箱 (試料容器; $5 \times 8 \times 1.7\text{cm}$) に可燃性ダストを堆積ダスト層となるように成形して、焼焼容器内で放電電極とダスト層表面を密着させて置く*。放電電極はマイクロメーター先端に電極棒を固定したもので、電極間隙を精度よく変化させることができる。理想的には、電極とダスト層の接触は Fig. 8-2のようになる。

ホトトランジスタ (PD31H, NEC, 6 V 印加) は発火の判定のため、シリカゲルはダスト層を放置しておく場合の吸湿予防などのため使用した。

木粉試料は、供試木材を糸鋸 (バンドソー) で数ミリの小片に細断後、超遠心粉砕機 (Retsch 製・三田村理研工業扱) で製粉して更にふるい分けして使用した。供試木材は木材工場現場で採取したもので、粉砕機中でほとんど脱湿されて、微粉化された木粉の水分は約 5~6 (重量) % の範囲にあった。

8.3 放電波形の観察

火花放電回路は、コンデンサ C と放電抵抗 R_1 から成る。コンデンサの容量を C 、放電抵抗を R 、コンデンサの充電電圧を E とすれば、放電電流、 i_d は次式で表わされる。ただし、 E は放電電流 vd より充分小さいものとする。

$$i_d = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (E \ll v_d)$$

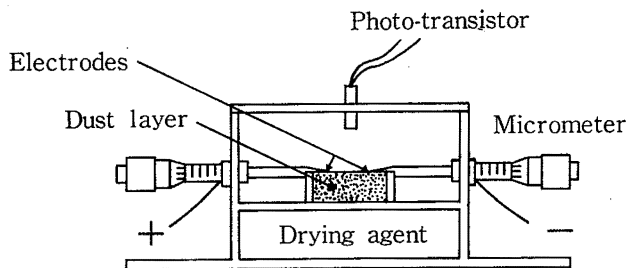
更に、放電電圧を v_d とすれば、放電電力 W_d ならびに放電エネルギー E_d について次式が成立する。

$$W_d = v_d \cdot i_d = v_d \cdot \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

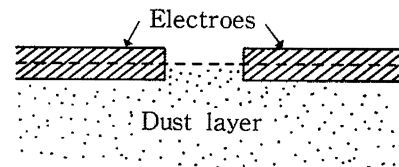
$$E_d = \int_0^{\infty} W_d dt = -v_d \cdot E \cdot C e^{-\frac{t}{RC}} + \text{const.}$$

$$= v_d \cdot E \cdot C (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (t=0 \text{ のとき, } E_d=0)$$

すなわち、時間 t に対して放電電流、放電エネルギーともに指数関数的に変化する。ここでは R , C の適切



(a)



(b)

Fig. 8-2 Ignition test box (a), and proposed idealized arrangement of electrodes (b).
発火試験容器と電極の新しい配列

* 繰出しノブ付スタンド (例えば、接写用ベローズユニットなど) を使用すると良い。

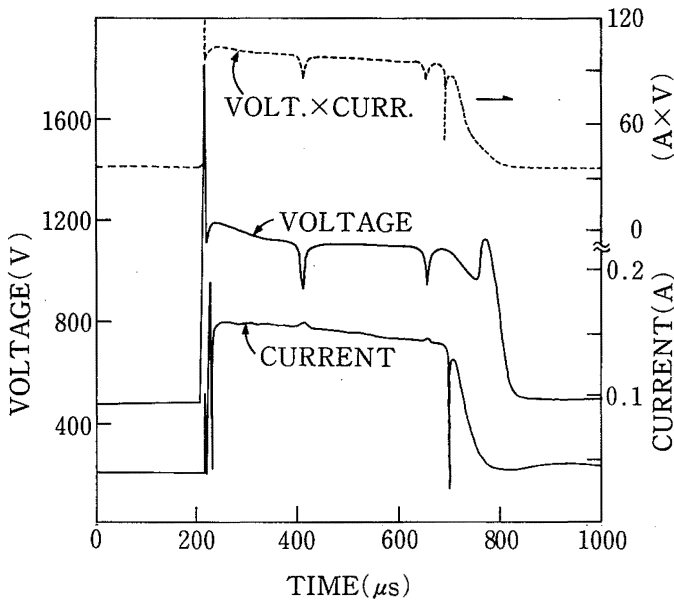


Fig. 8-3 Typical spark voltage and current traces. Gap width: 2 mm, 100K Ω , 0.5 μ F, Discharge time: 500 μ s. Spark energy: 29.6 mJ (non-ignition).
火花電圧と同電流の典型的な波型の例

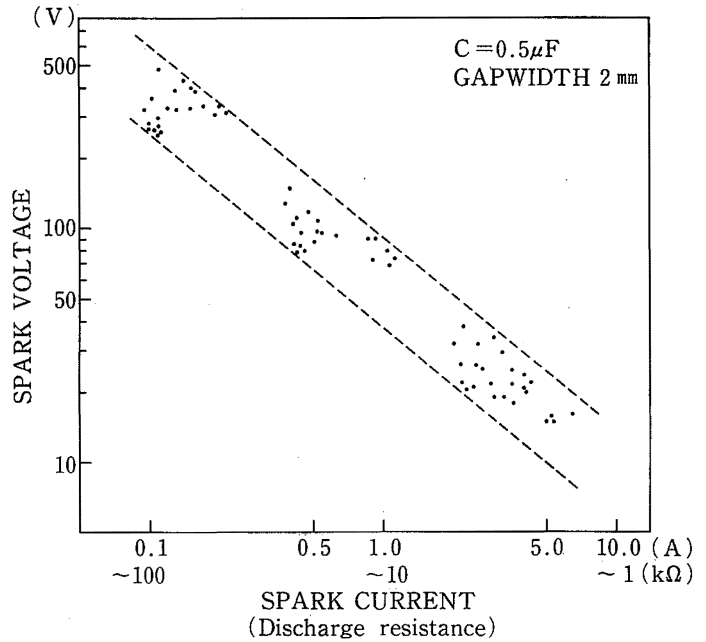


Fig. 8-4 Average voltage-current variations during spark discharges.
火花放電時の平均の電圧-電流の変化

な組合せを選ぶとともに、それによって得られる波形を任意の短時間で裁断することにより、矩形波に近い放電波形を形成して、利用した。Fig. 8-3にその例を示す。放電波形は同一条件下でも詳細にはかなりの変動があった。燃焼によって電極先端にすすが付着することによっても放電電圧波形は変動するようである。その点同一条件下でも各放電毎にパソコンによる積分操作を行って、エネルギーを算出する方法は有効である³⁾。

Fig. 8-4は空気中における火花放電時の電流と電圧の各平均値の関係の一例を示す。放電波形はコンデンサ容量、放電抵抗あるいは放電時間などによっては矩形波とは異なる放電波形が生ずるので、各波高値の平均値を取ってもあまり意味がないが、ここでは使用した装置回路の概略的な特性を示す上で利用した。ばらつきは大きいですが、コンデンサ容量を一定として放電抵抗約100K Ω では高電圧、低電流、放電抵抗約1 K Ω では低電圧、高電流の各放電波形が与えられることが明らかである。これらの一部はアーク放電およびグロー放電に相当するが、明確な区分はし難い。

なお、本実験で使用したコンデンサ容量は0.5 μ F、直流抵抗(高圧放電用)は1~200K Ω で、測定電流(波高平均値)は0.05~7 A、同電圧(同平均値)は10~600

Vの範囲にあった。ここでは、放電時間(裁断時間)は放電エネルギーの制御のために利用したもので、放電エネルギーの与え方に影響する放電時間や電流・電圧レベルでの検討は行っていない。

8.4 発火の判定

十分な放電エネルギーが電極間に付与されて、その結果ダスト粒子あるいはダスト層が燃焼状態に移行した場合、この放電エネルギーを発火エネルギーという。また、一定条件のもとでの発火エネルギーの最小値を最小発火エネルギーと呼ぶことにする。発火に必要な大きいエネルギーを与えた場合、木粉ではPhoto 8-1に示すように電極附近に小火炎が形成され燃焼状態が達成される。あるいは、焦げ跡がみられる場合もある。小火炎は一瞬にして消滅してしまうが、産業状況でダスト層表面上の空間に十分な濃度で浮遊ダストが存在すれば、この場合小火炎、というよりは放電火花は粉塵爆発の発火源となるであろう。従って、ダスト層上での継続した燃焼状態(火炎伝播)が得られなくとも、小火炎の形成をもって発火に至ったと判定できる理由が存在する。実験に供した木粉でみる限り、少なくと

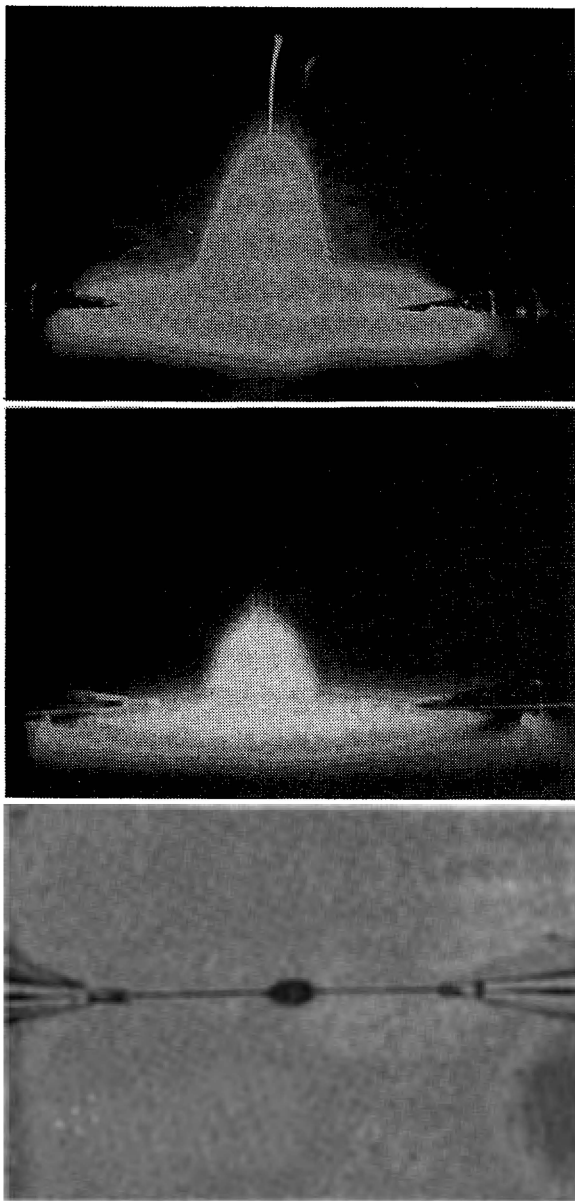


Photo 8-1 Flame formation on the dust layer with a spark discharge (a, b) and a burnt ring around the electrode gap (c). The photographs of a) and b) were taken in long-open shutter, and then show the bright dust layer. 火花放電によるダスト層の火災の形成と電極間隔周囲の焼け跡（開放写真で取ったため、ダスト層も明るく見える）

も小火炎の形成に引き続いてダスト層上を伝播する火炎は観察されなかった。しかし、エネルギー量やダストの種類によっては当然可能であろう。

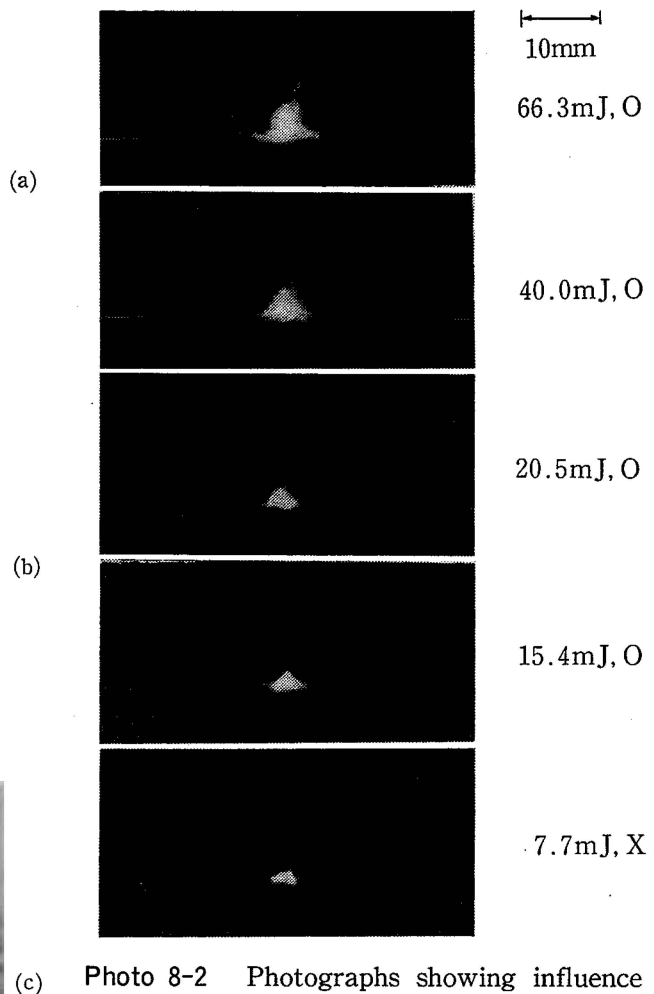


Photo 8-2 Photographs showing influence of discharge energies on the ignition of a lauan dust layer. Electrode separation : 3.0mm. ○ : ignition, × : non-ignition
ラワン・ダスト層の発火に及ぼす放電エネルギーの影響

一方、同一条件で放電エネルギーを次第に低下すると、Photo 8-2に示したように小火炎も小さくなり、発火の判定は困難になる。このような場合は、空間での放電火花とダスト層上でのそれを比較することによって、火花によるダスト粒子の発火および燃焼が観察できる。どの程度の粒子数が発火に関与するかは明らかではないが、放電エネルギーが十分小さくなると、ダスト層を取り除いた場合の放電と区別し難くなる。この場合をもって発火に至らない限界の場合とする。

このように、火花中でダスト粒子の発火が肉眼観察される場合を発火したものと見なすことにするが、限

界値に近づくにしたいが、発火に関与する粒子数が少なくなり、肉眼判定は困難になるので、ホトトランジスターによる発火の検出を試みた。検出例を Fig. 8-5 に示す。光感度特性は赤外部で高いので放電直後も出力はすぐには低下しないが、これらの波形と火花発生状況を考慮すれば発火の検知は可能である。当然、これは肉眼観察の結果と一致するが、エネルギーが小さい発火限界での検出は感度増幅などを十分行う必要がある。しかし、それでも放電エネルギーが数 mJ の場合などは、出力波形にそれ程明確な差がでるわけではないので、慎重に判断せざるを得ない。結局、これらの検討と肉眼観察との比較から、熟練すれば肉眼観察によっても十分判断できることがわかったので、以後この方法によった。

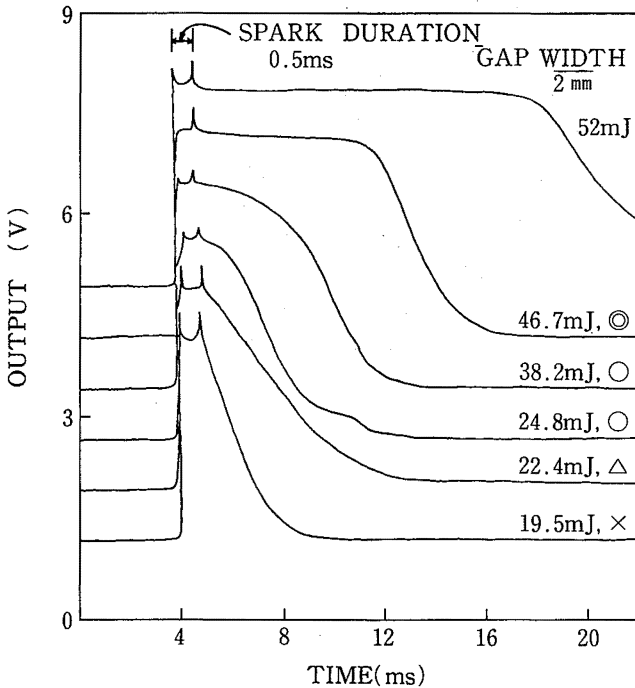


Fig. 8-5 Output patterns of a photo-transistor during and after ignition sparks on the dust layer of American white cedar. Results observed by the naked eye: small flame (●), ignition (○), non-ignition (×), unclear (△).
米ヒバ・ダスト層の火花発火の際のホトトランジスター出力例。

8.5 発火エネルギーに及ぼす影響と測定法

電極間のダスト粒子に放電の形でエネルギーが付与される結果、ダスト粒子の加熱・熱分解が起きる。発火が起きるためには、その後の化学反応による発熱と周囲への放熱の均衡が達成されるかどうかによって考えられる。従って、混合気の場合に明らかになっているように、発火エネルギーは外部条件によって影響される。ここでは、木粉ダスト層の最小発火エネルギーを測定する上で重要と考えられる電極条件、ダスト層密度、粒子径などについて検討して測定法を定めた。

8.5.1 電極条件

放電着火実験にはタングステン電極材料が高沸点、耐久性などの点から最も適当であると言われている⁴⁾。ここでは、タングステン棒直径3.0, 1.0および0.2mmのもの並びに先端を針状にしたステンレス棒をそれぞれ同じ対向電極対として検討した。Fig. 8-6に標準粉体試料（日本粉体工業協会）の一つである石松子 (lycopodium)ダスト層の発火エネルギーに及ぼす上記電極形状の影響を示した。これにより、タングステン線

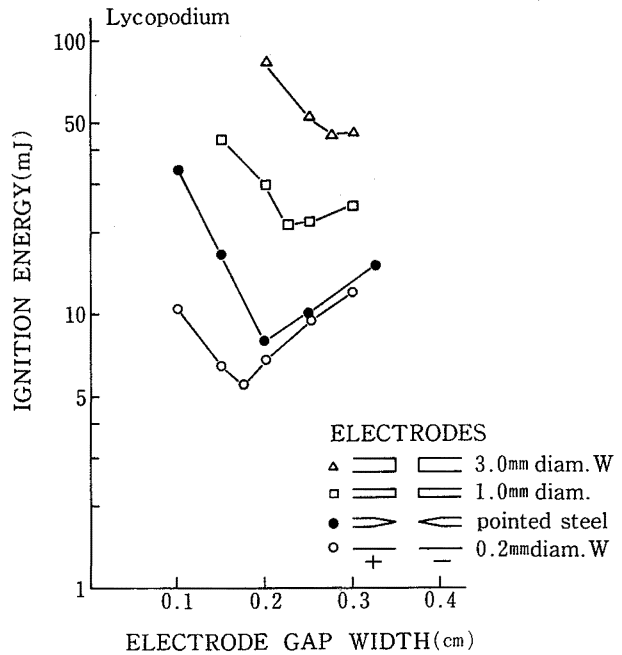


Fig. 8-6 Effect of electrode configuration on ignition energy.
電極形状の発火エネルギーに及ぼす影響

(0.2mm) の場合に最も小さい発火エネルギーを与え、電極部分での放熱効果が大きく影響することがわかる。また、発火エネルギーは電極間隙にも大きく依存して、最少発火エネルギーを与える最適電極間隔が存在する。最適電極間隔より電極間距離が小さくなるにつれ、あるいは大きくなるにつれ、発火エネルギーは増大する。混合気の場合のような消炎距離を与える電極間隔を求めることは、この場合不可能である。以上のような結果から、以後の実験ではタングステン線を使用電極と定めた。0.2mm より細い線径では、先端が屈曲し易く対向させることが困難になるし、最小発火エネルギー測定値に差が認められないようである。また、細くなると放電時の衝撃波によるものかどうかはわからないが、電極が振動する現象——ダスト層表面で水平方向——が生ずる。

Fig. 8-6に示したように、ダスト層の最小発火エネルギーは電極間隔の影響を受けるので、測定結果は発火エネルギーと電極間隔の座標軸で表わすことにした。しかし、木粉では同一放電エネルギー・レベルでも発火したり、発火が認められなかったりするバラツキが大きく、同一条件で繰り返し観測することがどうしても必要であった。Fig. 8-7にラワン・ダスト層における、(a)小火炎の形成に基づく発火の判定と、(b)放電火花によるダスト粒子の発火の観察に基づく判定の結果を比較して示す。なお、バラツキを考慮して、最適電極間隔では最少発火エネルギーよりその約10%低い値までの範囲で少なくとも10回の不発火をかぞえる必要がある。最少発火エネルギーは、以下このような方法で求めた。Fig. 8-7での(a)、(b)の判定基準では50%程の差がみられるが、通常ダスト粒径によっては更に大きい差を示す。ここでは、既に述べたように(b)に依っている。

8.5.2 ダスト層の形成

試料のダスト特性は最小発火エネルギーに大きな影響を与えるものと思われる。そこで、試料の調整などはできるだけ同一条件で行うことによって、ダストの種類による最小発火エネルギーを測定することが当面の目的である。ほぼ同一条件のダスト試料が与えられた場合、ダスト層の形成がまず問題になる。そこで、ダスト層の試料容器中への充填密度(かさ密度)による影響を調べた。ダスト層の充填密度は粒子形状に依存するが、木粉ダストでは粒径が大きい場合充填密度

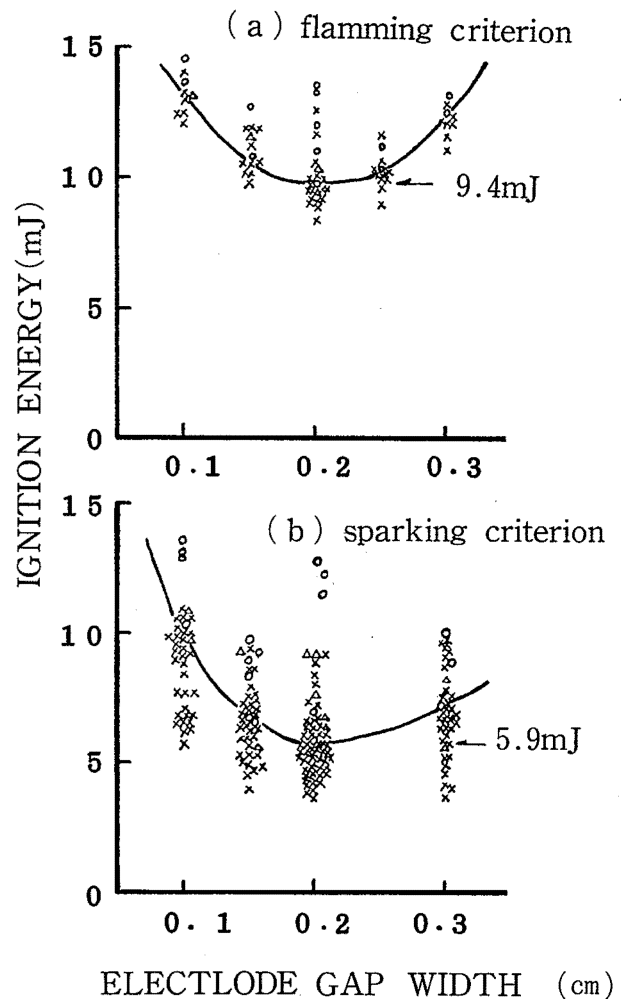


Fig. 8-7 Ignition diagrams for lauan dust layer ($D_1 = 14 \mu\text{m}$).

電極間隔、発火基準と発火エネルギーの関係

を大きく変えることは難しい。木粉の比重が小さく、繊維組織を持つからである。ダスト層を圧縮すれば弾力性がある。しかし、平均粒径 $14 \mu\text{m}$ のラワンについて、かさ密度 $0.087 \sim 0.176 \text{g/cm}^3$ (最大は層形成限界密度)の範囲で検討した結果は、予想に反して最小発火エネルギー値に5%以上の差はみられなかった。その理由は、後に詳述するように、この発火の機構が火花衝撃によるダスト粒子の飛散に基づくためと考えられる。すなわち、かさ密度が小さい場合放電後電極間に粒子の飛散による窪みがみられるが、かさ密度が大きいと筋状になり(Photo 8-4(a)),電極間に分散されるダスト数は同じエネルギー・レベルではあまり変わらないためと思われる。しかし、かさ密度が小さい程粒子は飛散しやすいと思われるので、あまり圧縮しない方がよ

い。そこで、ダスト層を試料容器内に形成させる場合、安息角を測定する場合の要領で沈降させ、それを水平板などでならすようにした。しかし、木粉では流動性があまりなく、微粉では凝集していたので、そのまま使用した。これらの表面をたらししたダスト層を電極下方より持ち上げて層表面で軽く電極に接触するように固定する(p.139脚註参照)。電極をダスト中に埋没させると放電しても発火に至らない。放電後は、電極周辺のダストのみを一部排除して、試料をつけ加える。木粉では、先端を切り揃えた小さい絵筆で電極近傍を掃き均す方法も、実験を繰り返すうえで便利であった。これらの実験技術と細心の注意およびある程度の熟練によって、ダスト層の最小発火エネルギーを求めることができる。

8.5.3 粒子径の影響

発火エネルギーに及ぼす粒子径の影響は木粉の種類によっては非常に大きく、複雑である。ラワンの場合を Fig. 8-8に、米ヒバの場合を Fig. 8-9に示す。前者では粒子径が増しても発火エネルギーはあまり変わらず、約200 μm 以上ではかえって低くなる、というやや

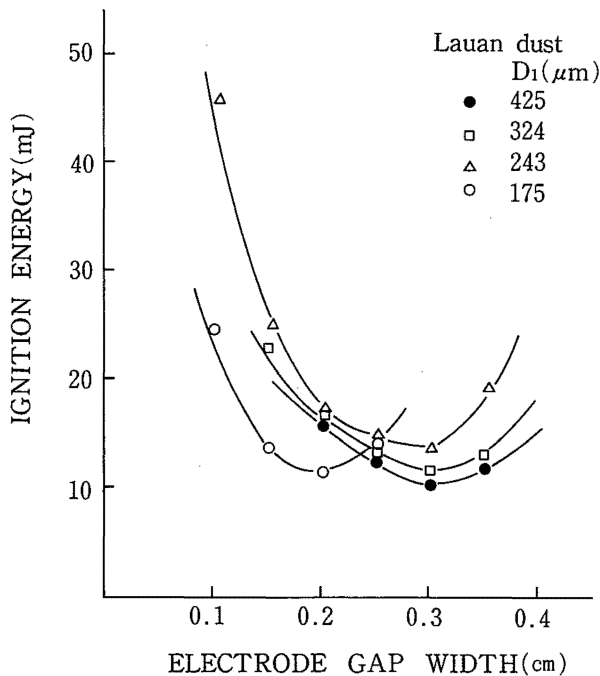


Fig. 8-8 Ignition diagrams for effect of average particle size of lauan dust layer. 発火エネルギーに及ぼすラワン・ダスト層の平均粒径の影響

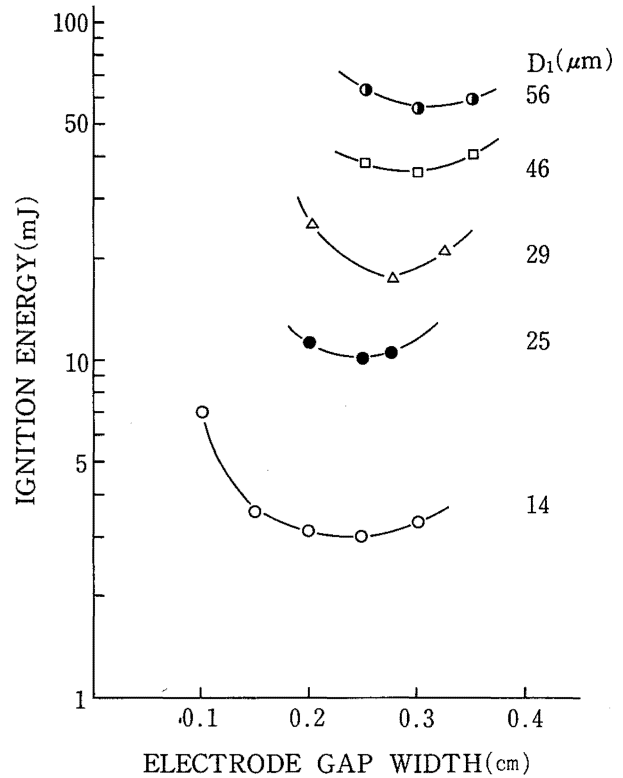


Fig. 8-9 Effect of average particle size of American white cedar dust layer on ignition energy. 発火エネルギーに及ぼす米ヒバ・ダスト層の平均粒径の影響

奇異な結果を示した。これに対して、後者では平均粒径約10~60 μm の範囲で、最小発火エネルギー E_0 は実験式、

$$E_0 = k D_1^2 \quad (k; \text{定数})$$

で旨く表すことができる。ここで、 D_1 は個数基準幾何平均粒径(メディアン値)である。コルク・ダスト層のデータと合せて、Fig. 8-10に両対数軸でこれらの最小発火エネルギーに及ぼす平均粒径の影響を纏めた。いずれも、平均粒径(<200 μm)が小さい程、低い最小発火エネルギーを与えるが、その変化の様子は三者とも異なる。これらの結果がどのようなダスト特性に依存するかすぐには明らかでないが、Photo 8-3に、米ヒバおよびラワンの粒径別粒子形状を比較してみた。それによると、約100 μm 以下の試料では粒子形状に著しい相違は認め難いが、ラワンでは粉碎時にち切れたような不定形の繊維状粒子が多く見え、層状ではこれがからまり分散度に差がでるためとも考えられ

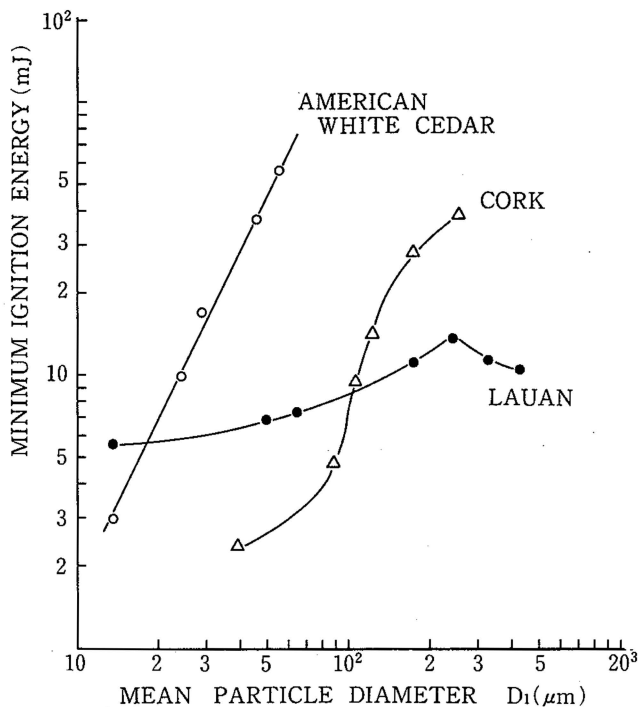


Fig. 8-10 Minimum ignition energy versus average particle size.

最小発火エネルギー対平均粒子径

る。すなわち、火花放電によるダスト粒子の浮遊分散を考えれば、分散が悪いと放電時に層表面近くの電極附近でのみダスト粒子が動いてそこへ集約され、かえって発火しやすくなるのではないかと思う。放電時のダストの飛散については後にとりあげるが、電極近傍でのダスト粒子の分散度は発火を生ずる上で重要であろう。米ヒバのように、狭い粒子径範囲で最小発火エネルギーが粒子径の二乗に比例することは、ダスト粒子が飛散するのに都合が良い形状をとるからであろうか。更に多くの種類のダストについて、発火エネルギーと分散度の関係などを検討する余地がある。なお、浮遊ダストの最小発火エネルギーは粒子径の三乗に比例するという理論的研究もあるが、^{13,14)}放電による粒子の飛散は考慮されていない。

8.6 木粉ダスト層における測定値

前節で述べたように、ダスト層の最小発火エネルギーは、平均粒径に大きく依存する。しかし、すべてのダストに適応できるような最小発火エネルギーと平均粒径の関係は得られていないので、同一粒径で各種木

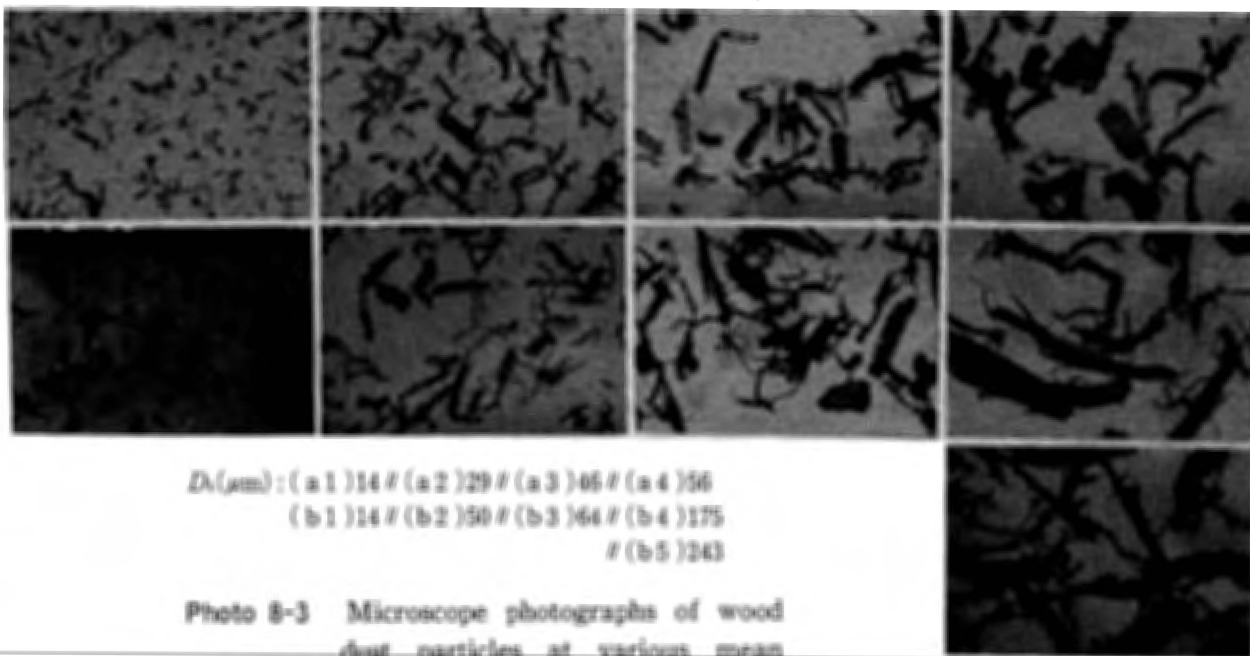


Photo 8-3 Microscope photographs of wood dust particles at various mean

particle diameters. (a 1 ~ a 4) : American white cedar, (b 1 ~ b 5) : lauan.

米ヒバ(a)およびラワン(b)の種々の平均粒径における木粉顕微鏡写真

粉の最小発火エネルギーを比較することができない。ここでは、超遠心粉碎機によって調整できた最小粒径の木粉11種類の最小発火エネルギーを測定して、その結果を Table 8-1に示す。日本スギの場合を除いて平均粒径は相対的に狭い範囲にあり、最小発火エネルギーも3~16mJの範囲でかなり小さい。参照できるデータは他に見い出せないが、二、三の木粉の浮遊ダスト雲の最小発火エネルギーとして20, 50, 60mJの値が報告されているので⁵⁾、Table 8-1の結果は浮遊ダスト雲の最小発火エネルギーと著しくかけ離れたものではない。従来の発火エネルギー測定法の不備を考慮すれば、上記の測定値は妥当な値と考えられる。しかも、概略的には混合ガスのその約10倍にすぎない。測定値が木材樹種別の発火危険性を直接的に示すものかどうかは別にして、産業現場では静電気による発火危険性に対する安全対策が必要になる値である⁶⁾。

8.7 放電によるダストの飛散

Photo 8-4は火花放電によって電極間隙周辺のダス

ト層上に形成される窪みを示す。発火の有無に関係なく観測されるので、放電によってダスト粒子が飛散されることを示す。一般にこれらの窪みの形状は放電エネルギー、ダスト層密度、電極間隙、ダスト粒径などに依存するが、電極間隙が1.0mmの場合は小さく深い窪地を示し、電極間隙が増すにつれて浅く広くなる。ほぼ同じ放電エネルギー・レベルであれば、電極間隙が2~3mmの場合にダスト粒子の飛散が最も大きくなるようである。粒子径にも依存するが、最適電極間隙がこれらの間隙に対応する。従って、飛散ダスト量が最も多い場合に最小発火エネルギーが求まり、この場合層状ダストの発火といえども放電中、すなわち気中でのダスト粒子の発火を観測していると言えるであろう。更に、この場合には、飛散ダストの浮遊ダスト濃度は問題にならず、わずかなダスト粒子でも飛散すれば発火する可能性がある。

混合ガスの放電着火過程の研究⁷⁾によれば、火花放電現象は以下のようなプロセスをとる。高電圧(約10kV、回路条件による；以下同)および大電流(約200A)によって特徴づけられる絶縁破壊(ブレイクダウン)

Table 8.1 Results for the minimum ignition energies of some wood dust layers.
木粉ダスト層の最小発火エネルギー測定結果

ダスト試料	dust samples	water content (wt.%)	layer bulk density (g/cm ³)	Number mean particle diameter D ₁ (μm)	Weight, mean particlediameter D ₁ (μm)	minimum ignition energy (mJ)
1. ラ ウ ン	Philippine lauan	5.9	0.093	14.1	38.2	6.3
2. ベイヒバ	American white cedar	5.8	0.138	14.1	30.5	3.0
3. ベイツガ	Western hemlock	6.0	0.134	15.8	44.3	6.4
4. ベイスギ	Western red cedar	5.6	0.166	14.7	39.5	4.5
5. キ リ	Kiri; paulownia	5.2	0.136	12.1	32.7	11.5
6. サ フ ラ	Sawara cypress	5.8	0.103	14.9	43.0	6.9
7. アカマツ	Japanese red pine	5.5	0.168	14.3	51.9	5.8
8. スプルース	White spruce	5.0	0.117	10.3	34.3	4.5
9. ス ギ	Japan cedar	6.3	0.170	22.4	45.4	8.8
10. エゾマツ	Silver fir	4.2	0.173	11.3	28.6	16.4
11. ケ ヤ キ	Keyaki; zelkova	5.5	0.161	13.5	38.4	13.4

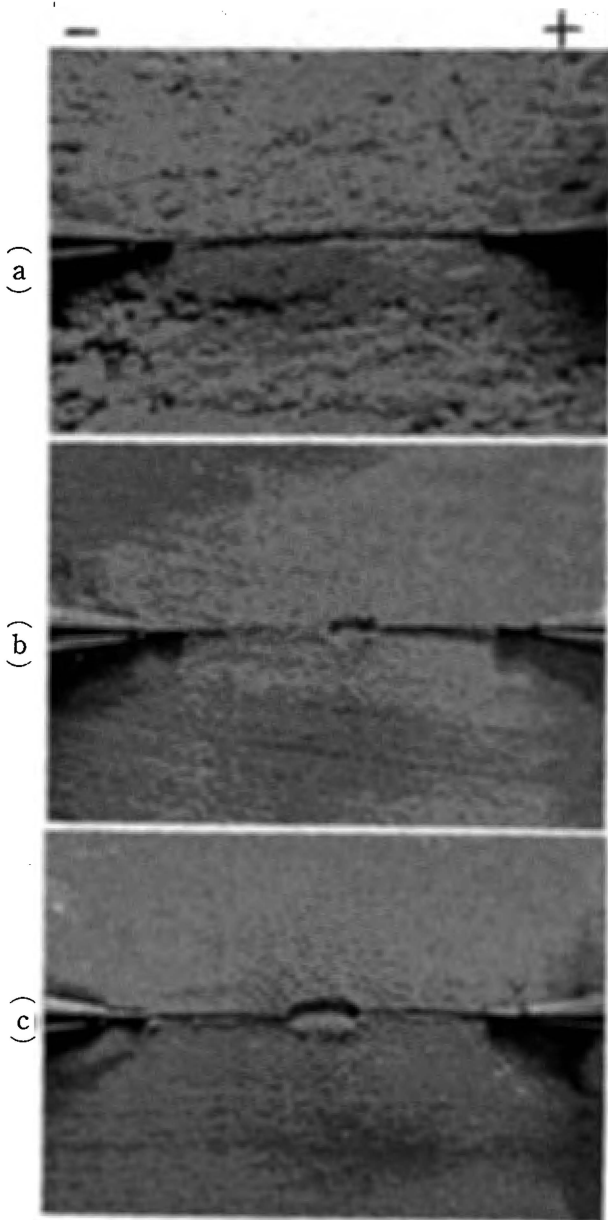


Photo 8-4 Dispersion traces of dust particles after spark discharge.

- a) : lauau, high bulk density of the layer. electrode gap width : 2.0 mm
 b) : lycopodium, e.g.w. : 2.0 mm
 c) : lycopodium, e.g.w. : 4.0 mm
 火花放電後のダスト粒子分散形跡

がアークまたはグロー放電に先立って起こる。その時間は極端に短く(1~10ns)、測定上の困難さからも放電エネルギーの計算において通常無視されるが、最も重要なエネルギー伝達過程でもある。すなわち、電極間に円筒火花径路——最小直径40 μ m、放電エネルギー

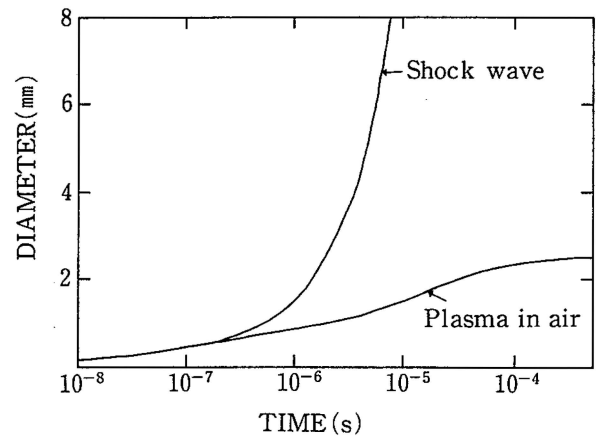


Fig. 8-11 Diameters of volumes activated by a spark discharge (3 mJ, 100 μ s, 1 bar in air)⁷⁾

火花放電によって生じた衝撃波および高温ガス容積径の変化。

—によって直径が増す—が形成され、その中のガス分子は完全に解離およびイオン化され、瞬間的に急激な温度上昇(6 \times 10⁵K)と圧力上昇(約200bar)を引き起こす。その結果、衝撃波が発生する。同時に、高温ガスの圧力と温度も急低下、すなわち熱膨張することにより、分子の解離とイオン化によって貯えられたプラズマ・エネルギーが熱エネルギーに変換される。アーク放電ではイオン化の程度は非常に低く、解離は放電の中心部分で極めて高い。アーク放電時間が長い程、高温ガス核の冷却を遅らせる。すなわち、ブレークダウンで達成されたプラズマ状態がアーク放電によって保持される結果、熱伝達および質量拡散による高温ガス容積の膨張が比較的遅く起こることになる。この場合、熱損失も大きく、ガス温度は約6 \times 10³K以下に限られ、中心軸から離れるにつれ温度および解離の程度も急激に減少する。グロー放電では、全体的な熱損失は更に大きく、高温ガス温度は約3 \times 10³K程度と見積られている。参考までに、衝撃波および高温ガス球の時間的変化の例を Fig. 8-11⁷⁾に示した。これによると、衝撃波と高温ガス球(プラズマ)は約200nsで分離して、前者は109ns後で1600m/s、後者は100 μ s後で10m/sの各速度で伝播して行く。

本実験ではダスト層と電極は密着しており、衝撃波の伝播および高温ガス体の膨張はいずれもダスト粒子に波及する。ダスト層粒子と火花放電との干渉は未解

決の問題であるが、上記の知見から放電開始直後、衝撃波の伝播および高温ガス体の膨張により、ダスト層の一部に急激な外力（圧力波）が加わり、その部分の粒子は飛散することになるものと思われる。放電時間は $10\mu\text{s}$ (10^{-5}s)以上であったので、衝撃波が消滅した後、高温ガスの膨張中もガス体は更に加熱されることになる。従って、ダストの飛散は粒子の慣性もあるので、伝播速度の早い衝撃波よりもその後の高温ガスの熱膨張によるものがより大きいだろうと予想される。なお、衝撃波によるエネルギー損失は小さいと考えられている⁴⁾。Photo 8-4の石松子では、電極間の窪みの他にその周辺ダスト層上に多数の凹凸がかすかに見える。これらは放電によって飛散した粒子が落下してきた——隕石による窪み（クレーター）にたとえられる——もので、粒子群（固まり）として分散されたことを示す。個々の粒子に分離して分散された場合には、このような紋様は形成されない。また石松子は流動性、分散性も優れた比較的均一なダストである。これらのことから、分散のメカニズムは、急激な外力によって層の一部——ここでは、例えば耳かき一杯分のダスト——が突然除去されるという削はく作用（denudation）⁹⁾によるものと考えられる。しかし、分散の形態や難易はダスト特性に大きく依存するであろう。

浮遊ダスト雲中での火花放電では、放電時間の長短が最小発火エネルギーの値に影響することが知られている⁹⁾。これは、余り短い火花放電ではダスト粒子が電極部からけ散らされて空白部分が形成されるためと一応説明されている¹⁰⁾。これに対して、ダスト層の最小発火エネルギーを求めるためには粒子の飛散が必要であり、放電によるダスト粒子のけ散らしはかえって都合がよい。このような機構のみからすれば、雲状および層状ダストの最小発火エネルギーを比較した場合、ダスト層の方が小さい値を示すことが想定される。実際、ある種の層状金属ダストの最小発火エネルギーは雲状の場合よりも極端に小さい値が報告されている¹¹⁾。その差については他に理由があるのかもしれないが、これらの測定方法は十分なものではなく、種々の影響因子を考慮した最適条件下では電極間隔と発火エネルギーの関係からみて両者の差はあまりないのではないと思われる。データの見直しが必要であろう。

一方、放電時間が余りに短いと放電火花の放射（光熱）などによるエネルギー損失が大きい。そこで、放電時間を長くすれば良いことになるが、余り長いと放

出されるエネルギーが周囲へ伝達されて効率が悪くなる。従って、最適放電時間がその間に存在するものと期待される。このような事情は、可燃性混合ガスおよびダスト雲の火花放電による着火についてもまったく同様にあてはまり、一部のデータが報告されている¹²⁾。更に、電極間隔と発火エネルギーの関係についても同じことが言える。すなわち、狭い間隙では電極での放熱が大きく発火エネルギーが増し、広い間隙では小さい放電エネルギー密度とダスト層への大きな放熱によりやはり発火しにくくなる。最小発火エネルギーを与える最適電極間隔がある条件で存在する。可燃性混合ガスやダスト雲の場合には、最適電極間隔が火炎伝播を生ずるための最小火炎核に相当して、最適放電時間は最小火炎核の形成時間に対応する¹²⁾。ダスト層の場合には、既に多くの例を示したように各条件において最適電極間隔が存在し、当初述べたようにそれらはダスト粒子が最も多く分散される間隔に相当するようである。これらの間隙において、放電エネルギーの最も有効な変換が高温ガス体になされて、相対的にエネルギー密度の高いガス体が最多の粒子分散を引き起こす結果ではないかと考える。また、当実験でえられた最適電極間隔は2~3 mmの値で、これは可燃性混合気やある種のダスト雲の最小火炎核と近似的に同じ数値に相当する。ダスト層では最小火炎核のようなものは考えにくいだが、木材粒子の発火は熱分解生成ガスが空気と混合して発火に至る経路を取り、数千度K以上の高温ガス中では分解ガスの解離が十分進行するものと思われるので、本質的には均一系の発火という点で共通するものと概略的には考えられる。発火の機構については、まだ不明の点が多い。

なお、当実験では最小発火エネルギーに及ぼす放電時間の影響については検討していないが、放電エネルギー量の調節を放電時間で行ったので、相対的に小さい発火エネルギーは放電時間も短い（50~900 μs ）。これらの放電時間は混合気ダスト雲の最適放電時間と同程度の範囲にあるので、大きな違いは生じないものと思われる。

以上、放電時間や電極間隔を含む放電条件が最小発火エネルギーに関連するとともに、ダスト層では堆積粒子の飛散による発火を観測することになり、可燃性混合ガスや浮遊ダスト雲の放電発火と類似の点が認められることは興味深い。

8.8 あとがき

木粉類堆積ダスト層の最小発火エネルギー測定法について検討し、木粉11種についてその値を求めた。測定方法は発火の判定やばらつきの問題があるが、放電火花によるダスト粒子の発火に対応する最小発火エネルギーを求めることができる。対向電極間での火花放電により、ダスト粒子が飛散して発火に至るので、ダスト試料の粒度分布などは大きな影響因子になる。平均粒径との関係は十分明らかでなく、最小発火エネルギーに及ぼす放電時間の影響や浮遊ダスト雲の発火エネルギーとの関連など、更に検討すべき点も多い。しかし、最適電極間隔などで可燃性混合ガスや浮遊ダスト雲の電気火花による発火と類似する点が見られるので、雲状および層状にかかわらず可燃性ダストの発火危険性を評価するうえで利用することができる可能性がある。

木粉ダスト11種の最小発火エネルギー測定値は、3～16mJの範囲にあった。これらの値は木粉樹種の違いよりも粒子分散性——急激な外力による——の相違に大きく依存する可能性もあるが、バグフィルター等の木粉堆積ダスト層上で放電が起きれば発火できる危険性をも示している。

謝 辞

実験を行うにあたって、燃焼容器の製作を電気研究部市川氏が担当された。また、発火実験の一部を東京理科大学物理科学生、神一良君が行った。両氏に対してここに記して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H.G. Dorsett, M. Jacobson, J. Nagy and R.P. Williams, US Bureau of Mines RI 5624, p. 8 (1960)
- 2) L.W. Collins, L.D. Haws and A. Gibson, Comb. and Flame, 38, 155 (1980)
- 3) 小川輝繁, 福山郁生, 富田浩一, 関豊, 清水民生, 工業火薬協会誌, 42 (3), 170 (1981)
- 4) J. Moorhouse, A. Williams and T.E. Maddison, Comb. and Flame, 23, 203 (1974)
- 5) K.N. Palmer, Dust Explosions and Fires, p. 371, Chapman and Hall, London 1973.
- 6) 同 上, p. 86

- 7) R. Maly and M. Vogel, 17th Symp. (intern.) on Comb. p. 821, The Combustion Institute 1978.
- 8) J.G. Dawes, Safety in Mines Research Establishment, Research Report 36 (1952)
- 9) R.K. Eckhoff, Comb. and Flame, 24, 53 (1975)
- 10) R.K. Eckhoff, VDI-Berichte, Nr. 304, 61 (1978)
- 11) M. Jacobson, A.R. Cooper and J. Nagy, US Bureau of Mines RI 6516 (1964)
- 12) A.T. Erygin, B.P. Yakobleb and B.B. Dabudob, Fiz. Gorn. Vzryva, 11 (1), 144 (1975)
- 13) D.R. Ballal and A.H. Lefebvre, Proc. Roy. Soc. Lond. A. 364, 277 (1978)
- 14) N. Kalkert and H.G. Schecker, Chem.-Ing.-Tech. 51 (12), 1248 (1979)

(昭和57年6月28日受理)