RIIS-TN-77-7 **UDC** 536.463:541.182:614.833

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1978

浮遊粉じん中における層流火炎伝ば

の実験的研究(Ⅱ)

―コルク粉じん火炎―

松田東栄

労働省産業安全研究所

浮遊粉じん中における層流火炎伝ば

の実験的研究(Ⅱ)*

― コルク粉じん火炎―

松田東栄**

Experimental Studies of Laminar Flame Propagation in Dust Suspensions (II)

— Cork Dust-Air Flame —

by Toei Matsuda

The previous paper described the observation of flame propagation in suspension of polyethylene dust which, chosen as a representative industrial dust having relatively simple chemical composition and structure, was dispersed in a vertical tube, 75 mm in diameter. In this paper, experimental results on the propagation of laminar cork flame in the same tube with open-end ignition and the top closed is reported and then its propagation mechanism is examined by comparison with that of the above dust. Cork dust is of high flammability and high dispersability, and R. H. Essenhigh et al. have reported the nature of flame propagation in clouds of the cork dust showing some distribution of particle sizes (1958).

Here, the dust was sieved strictly into five samples, of which mean particle diameters were, respectively, 90, 125, 180, 255 and 360 μ m. Thermal gravimetric analysis of the dust samples showed 65.7% weight loss and 34.3% carbon residue on heating to about 600°C in nitrogen atmosphere. The lower limit of flammability (0.037 mg/l) and the limiting flame speed at that limit (about 40 cm/s) were ascertained to be independent of dust fineness. This characteristics is contrary to the general tendency for the flammability of dusts to increase as the particle sizes become smaller. Then, measurement of the mean dust falling velocity on the limit was made at the base of the tube, and their values were shown to be within a relatively narrow range for these samples. This may imply that the propagation mechanism is common to all the samples at the limit.

Direct photographs of near-limit flames propagating upwards showed many independent spherical diffusion flames of individual particles, irrespective of dust fineness and except for the sample of mean particle diameter 90 μ m formed agglomeration, and that the flame length was between about 2

^{*} 第15回燃焼シンポジウム(昭 52.12 月)において一部発表。

^{**} 化学研究部 (Chemical Engineering Research Division)

産業安全研究

- 2 -

and 10 cm. The burning process of a particle at the flame front could be followed on cine-filming with application of a Mach-Zehnder interferometer. It showed the two stage burning for individual particles corresponding to the first stage of the combustion of volatile matters and pyrolysates, and then the second stage of the surface combustion of carbon residues of the particle. The increasing ratios of the maximum visible flame diameter to initial particle mean diameter were obtained with decreasing particle diameters for the flame of a single particle near the flame front. They appear to be comparable with that of combustion of fuel drops in suspensions.

Photomicrographs of the particles quenched on the tube wall while burning indicated that the material around the particle contained needle-like crystallines in some cases. They were probably celin or friedelin involved in the cork, as predicted from TGA.

The motion of particles ahead of the flame was analysed in the records on films of silhouettes of unburned particles against the back-illuminating light, where the distribution of particle velocities was gained for downward and upward movements. As expected, the ratio of number of particles travelling upwards to that for falling down was increased with increasing dust fineness at the limit, and also dependent on flame speed, or dust concentration. The particles moving up were likely easy to ignite in the flame front, as they would have to reverse their direction of falling for upward propagating flames. These movement of particles could be attributed to the flow of air in front of the flame, similar to that of laminar propagation of gaseous premixed flame in a tube.

From the above observation, the mechanism that the flame propagates discontinuously from one particle to the another is considered to apply to cork dusts of all the particle sizes near the limit. However, the burning particles became to merge forming a continuous yellow flame front with separate burning particles in the coherent underside of the flame, with increasing dust concentration above the limit for the particle sizes over 180 μ m. This showes that the flame propagation mechanism transfers to that of the whole upward diffusion flame, like that observed previously in one of the polyethylene dust flames.

1. まえがき

粉じん爆発とその火災における火炎の燃え拡がりの 機構を明らかにする目的から,前報1)では燃焼下限濃 度の小さいポリエチレン粉じんを 可燃性粉じんとし て、最も単純な形式での浮遊粉じん中の層流火炎伝ば について実験的に調べて報告した。ここでは、同一形 式での層流火炎伝ばをコルク粉じんについて検討し, 前報での結果などと比較しながらコルク浮遊粉じん中 での火炎伝ばの機構について考察することにする。そ もそも、可燃性浮遊粉じん中での火炎伝ばを調べる上 で、数多くの可燃性粉じんについて取り上げる必要は なく,その代表的な二,三の粉じんについて検討すれ ば十分であると考えられるが、 コルク粉じんを選択し た理由は幾つかある。すなわち、可燃性粉じん中では 取り分け比重(絶対乾燥 0.12g/cm³)が小さく浮遊性 に優れており、また本文中で詳述するように粒子の燃 焼性にも優れているため、浮遊粉じん中での火炎伝ば が微視的に観察し易いだろうということに依る。 ま た, コルク粉じんは上記のポリエチレンなどの合成化



Fig.1 Water contents of sample dusts for different particle sizes 平均粒径と粉じん試料中の水分含有量

学品に属する可燃性粉じんの種類とは異なる天然有機物(農産物)粉じんに分類でき,それらの代表的な可燃性粉じんとみなすことができることも一つの理由となった。

一方, コルク粉じん雲の燃焼について, Essenhigh ら²⁾ はその伝ば形式の違いによる火炎の観察や火炎速 度の測定を行なうことによって検討した。それらの結 論は興味あるもので, 燃焼特性のあるものは前報で述 べたポリエチレンの場合とはなはだ異なる。しかし, 彼らが使用した粉じん試料はやや粒度分布を有するも のであったので, 燃焼特性に及ぼす粒度の影響に関す る明確な結論は得られていないと考えて, ここでは同 一粉じん試料を幾つかの目開きの標準篩でふるい分け して調整した試料のみを, 燃焼実験に供し粒子径の影 響を調べることにした。

なお,この場合も火炎伝ばの視覚化を試みる立場か ら,主に燃焼下限界近傍での燃焼に限定して観察し





 Table 1
 Lower limits of flammability and mean velocities of falling dusts at the limits, with change of particle mean diameters

 ふるいメッシュ及び平均粒径 dm による燃焼下限界 C と下限界における 粉じん雲平均落下速度 Vgo の変化

through-stop mesh of sieves	particle mean diameter, $d_m(\mu m)$	lower limit, $C(g/l)$	mean velocity of falling dusts, $V_{g0}(\text{cm/s})$
40~50	360	0.037 ± 0.003	46
50~70	255	0.037 //	42
70~100	180	0.036 //	40
$100 \sim 150$	125	0.038 //	38
$150 \sim 200$	90	0.037 //	37

- 4 -

た。実験装置及び実験手法は前報のものを踏襲したの で記述をさける。

2. 燃 焼 下 限 界

2.1 粉じん粒子径の影響

コルク粉じん試料は市販のコルク粒(N工業(株), DPA)を標準篩で分級し、各粉じんの平均粒径(d_m) は篩の検定目開きのそれぞれの平均値で表した。各平 均粒径における試料の水分含有量は Fig.1 に示したよ うに測定された。すなわち、平均粒径が小さいほど僅 かながら水分量が多いことがわかるが、これは表面吸 着によるものと思われる。

内径 7.5 cm, 高さ約 2m の円筒状燃焼管中で測定 した燃焼下限界を各粒径ごとに **Table** 1 に示す。こ れらの結果は粒径にかかわらず燃焼下限界は約 0.037 g/l で一定になる事を示し, Essenhigh 6^{2} の結論と 一致する。しかし,彼らの示した下限界は 0.05 g/l で 多少の相違がみられるが,ここでの値はむしろ Hartmann 型の爆発試験装置による 測定値, 0.035 g/l^{3}) に近い。

一般に,粉じん爆発の爆発特性に及ぼす粉じん粒度 の影響はすでに多くの実験的研究において明らかにさ れており,粒径が小さくなるにつれその燃焼(爆発) 性は増すという傾向がみられ³⁾,下限界もその例外で はない。しかるに,上記のようにコルク粉じん分散系

ではこれらの傾向とまったく異なり、粒径に関係なく 下限界は一定であるという結果を示した。すなわち、 粒子の比表面積に必ずしも依存しない。その原因とし て、コルク粒子が大変軽く浮遊性に富むことがまず第 一に考えられる。そこで、 燃焼管下端における粉じん の平均落下速度を次に測定した。Table 1 に下限濃度 におけるこれらの落下速度を併せて示したが、それに よると大きな差はなく大きい粒子の粉じんで僅かに平 均落下速度が大きい事がわかる程度である。これは、 重複するが Fig.2 によって更に 明らかになるであろ う。すなわち、ポリエチレン粉じんについて前報で求 めた同様の測定値と上記の値を比較した。粉じん雲の 落下速度は平均値で測定したもので多少のばらつきは 免れ得ないが,かくして Fig.2 からコルク粉じん分散 系における一定の下限界は粉じん雲の沈降ないしは落 下速度が粒径によって大きく変らないためと推測でき る。その場合には、ポリエチレン粉じんの下限界と平 均落下速度について前報で求めた関係は、定数は異な るとしてもコルク粉じんに対しても適用できるものと 考えられる。しかしながら、これらの論拠は総括的な 火炎伝ば機構によって十分説明できるものでなければ ならないだろう。

2.2 限界火炎の直接写真

できるだけ燃焼下限界に近い粉じん濃度における火炎(限界火炎)の直接写真を,各平均粒径別に Photo. 1に示した。これによると,ポリエチレン粉じんの場



Tube dia. 75mm

Photo.1 Photographs of cork-dust flames close to the lower limits (time of exposure: 1/250s) 平均粒径別による下限界極近傍のコルク粉じん火炎写真(露出 時間, 1/250 秒)

 $\Delta = \{1, \dots, n_{n-1}\}$



Fig.3 Flame speed trace (L: flame length, t': apparent burning time) 火炎速度トレースの例 (L:火炎の長さ, t': 見かけの燃焼時間)





合とは少なからず異なるもので、いずれの粒径におい ても独立した球状拡散火炎あるいはそれらの融合した ものが火炎先端で集合して多数みられる特徴がある。 しかし、それらは火炎下方ではかなりまばらに存在 し、いわゆる火の粉のような軌跡もみられる。火炎は 全体に黄橙色で、一部不連続ながら明確な外縁を示し 写真映りが良い。また、平均粒径の差による火炎外観 の相違も余り顕著でなく、いずれも粒子状に独立した 火炎が主体で、粒径が増すにつれ一部に長く尾を引い た小火炎や球状火炎の間に拡がった拡散火炎が見られ るようになる。火炎の長さは、平均粒径が最も大きい 場合で約 10 cm で、以下粒径が小さくなるにつれ 2~ 3 cm までにも短くなる。しかし、 $d_m = 90 \, \mu m$ の場合 には逆に長くなってしかもまばらな火炎を示す。これ は、後述するように未燃粒子が凝集して浮遊するため であった。

これらの火炎の構造については,後に光学的方法を 適用して更に詳しく調べることにする。

2.3 限界火炎速度

コルク粉じんの燃焼下限界は粒径に依存しないとい う場合,火炎伝ば機構から考えてはたして燃焼下限界 における火炎伝ば速度(限界火炎速度)は粒径に関係 しないのかどうかという事が問題になる。しかし,限 界火炎速度は直接的には測定し得ないので,前報同様 粉じん濃度と火炎速度の測定結果から外挿して調べ た。

火炎速度の測定は,視野範囲が燃焼管に対して仰角 (同じく俯角)9度となる位置に 16 ミリカメラを設置 して定常伝ば火炎を 50 コマ/秒の定速度で撮影して解 析した。解析に際して仰角観察に対する距離補正を行 なった。Fig.3 はかかる火炎速度の測定に使用した伝 ば火炎の配列トレースの例を示す。

このようにして求めた各平均粒径別の粉じん濃度と 火炎速度の関係を **Fig.4**に示す。これによると、限界



* 炭じんの揮発分にならう。



Photo.2 A-C Photographs of (A) particles and (B・C) condenced materials around the particles quenched on the tube wall. Direct (A・B) & microphotograph (C) コ ルク粒子 (A) および管壁で消炎した粒子周囲の羨縮物質(B及びC)。(A・B) は直 接写真, (C)は顕發鏡写真 (←→ 20 µm)

火炎速度は約40 cm/s でやはり粒度に関係なく一定値 を取るようである。Essenhigh 6⁴)は長さ約5mの燃 焼管を使用して下限濃度は異なるがこの値を,35±1 cm/s と求めた。本実験では下限界近傍の粉じん濃度 に限定したので,彼らの述べるような火炎の長さと見 かけの燃焼時間から限界火炎速度を決定することはで きなかったが,この場合,すなわち比較的薄い火炎の みの場合も火炎の長さと見かけの燃焼時間は明らかに 比例関係を示した(グラフ省略)。これらのことは、下 限界近くでは火炎の長さが長い程伝ば速度が早く、火 炎の長さが次第に短くなって消炎に至ることを示す。

上記の展界火炎の見かけの燃焼時間は, 平均 粒 径 125~360 μm に対して約 0.05~0.25 秒を取るが, こ れらは後述する単一粒子の 燃焼時 間よりかなり大き く, 粒子径が大きい程その差は著しい。火炎内部で は, 粒子相互間の干渉や沈降などの影響が複雑に作用 するためと考えられる。

コルクの熱分解特性と粒子の観察

3.1 熱分解特性

コルク粒子は約 90% に及ぶ孔隙率を示す多数の細 胞から成り特異なコルク特性を示すことが知られてい る。元素分析によるとその化学組成は C₅H₇O₂ で表さ れるという³⁷。ここでは、揮発分や熱分解特性を調べ る目的で各粒 径 別の乾燥 試料について熱 重量 分析 (TGA) を行なった。**Fig.5** に窒素気流中(100 cc/分) における測定結果の代表的な例を示す。これによると 主なパイロリシス (Pyrolysis, 熱分解)反応が起こる 前に、重量減少速度 (DTG) が一定になる温度領域が みちれる。しかも、この温度領域は減量曲線の 50% 以上にも及び全重量減 (揮発分*)の約 50% を占め る。これらの領域では反応速度次数が零次と考えられ るので、コルク成分からみてフリーデリン ($C_{10}H_{50}O$) やセリン ($C_{10}H_{50}O_{2}$) などの揮発化が主として進行す るものと推測される。実際、粒子の燃焼においてこれ らの物質が観察された例を次項で示す。一方、この場 合 400°C 前後の急激な重量減少は、コルク細胞のパイ ロリシス反応によるものであろう。なお熱重量分析の 結果、約 600°C までの加熱で求められるコルク粒子の 輝発分は、試料の粒径に係わりなく 65.7% (炭化 残 渣 34.3%, ただし灰分 3.0% を含む) であった。

(B)

(A)

Photo. 4 A-B Microphotographs of (A) a quenched particle and (B) carbon residue of cork particle (←→ 100 µm) コルク粒子の消炎粒子 (A)と夢.ニ肉渣(B) の類散鏡写真

- 6 -

3.2 粒子の観察

Photo.2 A, B の写真は、コルクの未燃焼粒子と燃 焼管壁で消炎した粒子及びその周囲の凝縮物質の形跡 を示したものである。粉じん試料の粒子シルエットは 円形から隔たったものでやや長形粒子が目立つが、一 部の消炎粒子とその周囲物質の形跡は、粒子を中心と した典型的な球状拡散燃焼の形態を良く示している。 一方、凝縮物質の顕敞鏡写真 (Photo. 2 C) ではその 中に多数の針状結晶が観察されることがあった。これ は、熱分析において上述したフリーデリンやセリンは このような結晶を示すことから、それらの物質が気 化、凝縮したものと思われる。

上記の熱分析における加熱速度はたかだか 10℃/分 のオーダーにすぎないが、粉じん火炎に取り込まれる 粉じん粒子の加熱速度は一般に102℃/秒以上のオーダ ーと言われる³⁾。更に,加熱速度がこのように桁違い に大きくなると当然その粒子固体の熱分解特性が変化 することが考えられる。従って、このような観点から も通常の加熱速度による熱分析の結果を固体の燃焼へ 適用することは疑問視されることになる³⁾。しかし、 Photo.2B で示した消炎粒子は燃焼の過程で凍結され たものであり、中心粒子が粒子形状を維持しているこ となどから粒子は燃料成分で包囲された状態で加熱さ れるという、よく知られた単一液滴燃焼モデル5 の形 態を取ることは明らかで、少なくともこの場合のよう に弱い火炎中ではこれに類似した状況にある不活性ガ ス中での熱分析で示されるいろいろな段階を経て燃焼 して行くものと推定される。逆に、コルク粒子の加熱 速度はこの場合、著しく小さい場合であろうと思われ る。これはまた、主にコルク粒子の熱分解特性や低熱 伝導性が大きく影響している結果であって、パイロリ シスのみを主とする熱分解特性を示す粒子ではその状 況が異なってくるかもしれない。

Photo.3 A, B は, それぞれ消炎粒子および炭化残 渣の顕微鏡写真を示す。 前 者 では 粒子の多孔質構造 (独立細胞の集合体)を示し,後者では不規則に延び 縮みすることを示している。これは後述するように粒 子の燃焼と関連するものであろう。

4. 伝ば火炎の観察

4.1 伝ば火炎の構造

前報同様, 燃焼管下端から 95 cm の位置で対に設け



(A) 90 µm



(B) 125 µm

(C) 180 µm



 (D) 255 µm
 (E) 360 µm
 Photo. 4 A-E Effect of particle mean diameter on the front structure of propagating flame
 先端火炎に及ぼす平均粒子径の影響

た観察窓において, 上向伝ばする粉じん火炎にマッ ハ・ツェンダー干渉計およびシュリーレン法を適用し てそれぞれ高速度写真撮影(500コマ/秒)した。コル ク粉じん火炎は比較的明るい黄橙色であったので, そ れをフィルム上に捕えることは容易であったと思われ る。

かくして撮影した多数の干渉図等のフィルムから, Photo.4 には火炎構造に及ぼす粉じんの平 均 粒径の 影響を表す写真をまず示す。干渉縞はかなり乱れたも のも含まれるが,ここでは火炎先端の微視的な構造を 比較する。粉じん濃度は,いずれも下限界より僅かに 高く,限界火炎 (Photo.1) と較べて粒子径による相

- 7 ---



d_m: (A) 125 (B) 255 (C) 360 μm Photo.5 A-C Schlieren pictures of propagating cork-dust flames *コルク粉*じん伝ば火炎のシェリーレン像

違が明確である。

すなわち,平均粒径 90 µm (photo.4A) ではそれ より大きい 125 µm などの粒径のものよりもかえって 大きい独立火炎が散在して見える。これは展界火炎に ついても観察されたことであるが,未燃焼粒子のシル エットから分かるように幾つかの粒子の凝集によって 起こる集合粒子(アグロメレート)の燃焼によるもので あった。このような集合粒子の燃焼が以下に述べるよ うな粒径の大きい単独粒子群の燃焼と異なることは、 粒子表面積の影響などを示していると考えられ興味深 い。一方,平均粒径 125 および 180 µm (Photo.4A B, C) では多数の粒子状独立火炎がみちれ,巨視的に は放物形に近い火炎先端を形成している。独立火炎間 では一部融合したり、全体的に拡散している部分もあ る。しかし、粉じん濃度にも依存するのは当然である が、これらの火炎は一般に以下の火炎に軟べて構造上 厚い(すなわち密度の高い)火炎を取ることを示して いる。さらに、平均粒径が 255 から 360 µm へ移行 するにつれ、融合火炎が多くなり全体的な拡散火炎に 近くなる (Photo.4 D, E)。火炎先端や内部では粒子 状の独立火炎が幾つかみえ、総体的に均一なガス炎に は至らず、火炎前縁は連続的ながら粒子状火炎によっ て形成されている。

以上のような火炎構造は、 Photo. 5 に示したシュ リーレン写真によってもほぼ回様のことが言える。シ ュリーレン写真では、この火炎がほとんど乱れなく層



Photo.6 Interferogram sequence of propagating cork-dust flame 伝ば火炎の連続干渉写真 d_m=125 μm

流火炎伝ばすることを示すが、粒径が大きくなると火 炎先端は放物形状からずれてくるようである。これら の写真はまた、未燃焼粒子の動きを示すと同時に、粒 子の発火とそれに続く燃焼過程をも明らかにしてい る。しかし、予熱帯での粒子の揮発成分やパイロリシ ス成分の放出に基づく光学的な変化は認められない。 これらの成分が非常に僅かなため、予熱帯という温度 場の中では変化量は十分でないためと考えられるが、 これに対して Photo.5 C のように粒径の大きい火炎 内部では多くの粒子 周囲で燃料成分の放出がみられ る。

4.2 伝ば火炎に伴う粒子の燃焼

上述のように先端火炎は平均粒子径によってその構造が多少変化する。しかし、Photo.4 で示したように



Fig.6 Change of luminous zones of single particles from ignition till extinction at flame front, obtained from film strips (film speed: 500 f/s)

フィルム各駒ごとの,1個の粉じん粒子の 発火から消滅に至るまでの輝炎部の変化



Fig.7 Variation of luminous zone diameter D_f of single cork particle with time t. (The maximum zone diameters at the 1 st and 2 nd stages of combustion are D'_{f1} and D'_{f2}, respectively)
コルク粒子の輝炎部直径 D_f の時間 変化 (第1及び2第燃焼段階での輝炎部直径の 最大値をそれぞれ D'_{f1}, D'_{f2} とする)

いずれの粒径でも火炎前縁近くでは各粒子に独立した 球状拡散火炎を観察することができる。そこで、多数 の火炎伝ばを撮影したフィルムからコルク粒子の燃焼 を検討してみた。なお、この場合粉じん濃度はいずれ も下限界近傍(約45mg/l以下)としてそれらの薄い 火炎について撮影しその火炎前縁近くでの粒子の燃焼 に限定した。Photo.6 はこのような観察に用いた連 統干渉写真の一部を示したものである。これらの写真 によると, 上記の球状火炎の他にそれらが幾つか集合 したものやいわゆる火の粉のような輝点がみえる。写 **真解析装置でこれらの単独粒子の火炎(輝炎部)及び** 輝点を各フィルム駒ごとに追跡、測定したところFig. 6の例に示すような発火の瞬間から輝点の消滅までの **輝炎輪郭の変化を得ることができた。凝集粒子の場合** には火炎直径や燃焼時間あるいは火の粉の数などによ って単独粒子の燃焼と区別できた。ただし、 dm=90 µm ではほとんどが集合粒子の火炎であったのでここ

- 9 --

では除外する。Fig.6 によると、粒子の発火は蒸気相 しかもかなり大きい直径で起こることがわかる。発火 による粒子の加速、あるいは沈降方向の逆転は必ずし も粒子に共通するものではない。これらの輪郭は球状



Fig.8 A-D Effect of particle mean diameter (d_m) on (A) the maximum flame diameter of one particle, D'_f , at the first and second stages of combustion, (B) ratio of the max. flame diameter to initial particle diameter at the 1st stage of combustion, D'_{f_1}/d_m , and burning times (C) t_1 and (D) t_2 for the 1st and 2 nd stages, respectively (see Fig. 7)

平均粒子径の影響; (A) 最大輝炎部直径 D'_{f} の変化, (B) 第1燃焼段階における初 期粒子径に対する最大火炎直径の比, (C) 及び(D)第1および第2段階での燃焼時間 t_{1}, t_{2} (いずれも Fig.7 参照) に近似できるものとしてその直径変化を示すと, Fig.7 のようになる。撮影速度はいずれも固定速度に限定し たので燃焼時間には多少の誤差が含まれる。特に,発 火の瞬間は暗い火炎で 1~2 コマの読取り誤差が考え られる。火炎は全燃焼時間を通うして明るい方である が,発火後次第に輝きを増し最大直径近くで最も明る くなる。すなわち,非定常的な燃焼と考えられる。

Fig.7 の火炎直径変化の様子から、コルク粒子の燃 焼を2段階に区別することができる。しかも、第1段 階の燃焼が揮発化及びパイロリシス成分の拡散燃焼に 相当し、第2段階での燃焼が炭化残渣の表面燃焼プロ セスによるものであることは熱分析の結果(3.1.)を 考慮するまでもなく明らかで、これらは炭じん粒子の 燃焼で良く知られている古典的な燃焼形態に属するも のである³⁾。そこで、Fig.13のように前者に要する燃 焼時間を t₁,後者のそれを t₂ 更に最大火炎直径を D'_{f1} 及びその燃焼中にほとんど変化しない後者の輝 点直径の最大値を D'f2 として、 それぞれの値を平均 粒径ごとに測定した。 既に Photo.4 で示したように 粒径が大きくなる程独立球状火炎の数は極端に少なく なるので、1回の火炎伝ばで上記のような輝炎部直径 を測定できる粒子数では不足で何回かの観察結果から 求めた。かくして、各 15~25 個の測定値を求めそれ らの平均値および標準偏差によってこれを Fig.8 に示 す。結果は予想されるようにかなりバラツクものであ ったが、最大火炎直径は平均粒径の減少に伴って僅か な減少を示すのみで,初期平均粒子径に対する割合は 逆に大きくなり、例えば $d_m = 125 \,\mu \text{m}$ で 12 倍にも達 する (Fig.8B)。なお、Burgoyne らかはテトラリン燃 料液滴径 53 µm に対して 19 倍の火炎直径を報告し ているので、上記の結果は液滴群の燃焼と同程度のも のであろうと予想される。炭化残渣の燃焼における輝 点の大きさは平均粒径によっても余り変らず、粒径が 小さくなるにつれて僅かに減少する。これは燃焼粒子 の顕微鏡写真 (Photo.3) で示したようにコルク 粒子 の多孔質構造と関連するもので、粒子外径はパイロリ シス反応の段階で見かけ上かえって増大する炭化残渣 を形成するためと考えられる。

一方,平均粒径に対する燃焼時間の変化(Fig.8 C, D)は拡散燃焼において最大火炎直径と同様の形状を 示し,表面燃焼では粒径の減少に伴って直線的に短く なる傾向がみられる。 $d_m = 360 \, \mu m$ の第2段階での燃 焼時間は大きなバラッキを示したが,これは炭化残渣



Photo.7 Burning particles inside the flame 火炎内部での燃焼粒子 dm=125 μm

間の凝集や分裂によるものと推定される。一般に、燃 料固体(液滴)粒子の単一拡散定常燃焼で全燃焼時間 は初期粒子径の2乗に比例することがわかっている5)。 Fig.8 の場合はこのような定常拡散燃焼とは異なる が,第1段階の拡散燃焼においてやや特異な燃焼時間 の変化がみられる。すなわち、火炎直径の大きさ(最 大値)から較べて平均粒径が小さい場合にそれらの燃 焼時間はかなり長いと言える。それらの理由はいろい ろと考えられるが,物質収支等のデータは不足してお りここでは明らかでない。恐らく,非定常的な燃焼そ のものによるのであろうかと思われる。

以上の観察は主に火炎前縁における粒子の燃焼に関 するものであるが、粒径が小さい場合には火炎内部に おいてもほぼ同様の燃焼が観察された。多くの場合は



Fig.9 Distribution of mean velocity of particle movement prior to flame passage $d_m =$ $180 \,\mu m, V_f = 60 \, cm/s$ 火炎到達直前の粒子平均移動速度の分布 (-: 上方, +: 下方)

Table 2 Mean velocity of movement of dust particles in suspension, prior to flame passage 浮遊粉じん中における,火炎到達直前の粒子の平均移動速度 d_m : particle mean diameter. (平均粒子径)

n: number of particles, of which velocities were measured in observation area. (観測粒子数)

- V_f : flame speed. (火炎速度)
- $+V_g$: mean velocity of downwards movent (fall) of particles. (平均移動速度)
- $-\overline{V}_{g}$: mean velocity of upwards movement of particles. (十は下方,一は上向移動)

-n' or +n': number of particles taking upwards or downwards movements,

d_m (µm)	n	V_f · (cm/s)	$+\overline{V}_{g}$ (cm/s)	$-\overline{V}_{g}$ (cm/s)	$-\bar{V}_g/\bar{V}_g$	+n'/n (%)	—n'/n (%)	-n'/+n'
125	298	50	24 ± 11	17 ± 5	0.76	54	46	0, 85
11	224	62	23 ± 10	15 ± 5	0.65	61	39	0.64
180	353	54	23 ± 9	14 ± 6	0.61	73	27	0.37
255	355	58	28 ± 10	17 ± 6	0. 61	97	21	0. 27
11	150	70	31 ± 11	19 ± 8	0. 61	73	27	0.37
360	300	43	27 ± 12	12 ± 6	0.44	89	11	0.12
11	351	66	32 ± 17	12 ± 5	0.38	86	14	0.16
"	313	82	39 ± 19	21 ± 7	0. 54	73	27	0.37

respectively. (上,下向移動を示す粒子数)

火炎の融合や重さなり,あるいは視野範囲からの逸脱 によって単独粒子のそれを追跡することは困難でもあ った。他方,上記のような粒子の燃焼の他に,Photo. 7に示すような燃焼が主に火炎内部で観察された。す なわち,中心は暗く周囲が薄い輝炎帯で取り囲まれた 球形火炎がいくつかみえる。全体的に暗いが外径は輝 炎帯によって明確に区別される。火炎径は単独最大火 炎径(Df)の約1/2で,ほとんど変化することなくそ のまま消炎してしまう。これらのことから,粒子の加 熱が十分でない場合の一部の揮発成分のみの燃焼によ るものではないかと思われる。更に,このような粒子 の燃焼が観察されることからすれば,熱分析で観察さ れるいろな段階にある多数の粒子が,少なくとも 弱い火炎中では存在するものと推測される。



Fig.10 A-B Hot-wire anemometer recorder traces.

(A) Dust-dispersion, only (B) Flame propagation. d_m=125 µm, a. Start of dust falling, b. Tube closed at top and ignition, c. Flame passage 熱線風速計記録計トレース。
(A)粉じん分散のみの場合, (B)火炎伝 ばを伴う場合。
a.粉じん落下開始, b. 燃焼管上部閉 および着火, c. 火炎通過

4.3 粉じん粒子の挙動

火炎伝ばに伴う粒子の挙動は、コルクのような浮遊 粉じん中における不連続的な火炎伝ばを検討する上で 必要である。燃焼下限界に関してすでに、火炎伝ばを 伴わない場合の平均落下速度の測定値を Table 1 に示 したが、これらは粉じん雲の平均値であって個々の粒 子の実際の沈降速度は明らかでない。ここでは、未燃 焼粒子が火炎先端に取り込まれる直前の粒子の挙動を 観測するため、粉じん粒子を影絵として末燃焼粒子群 の挙動を 16 ミリ高速度カメラ (1000 コマ/秒)で撮影 して解析した。

その結果, d_m=90 µm では粒子の燃焼で述べたよ うにほとんどが集合粒子となって沈降することがわか った。 d_m=125 および 180 µm では一部でやはり粒 子の凝集がみられた。一般に粒子群の挙動は次のよう に観察される。着火と同時に燃焼管上部を閉鎖するこ とによって初め下向に沈降していた粒子群は一瞬逆転 するが、再びほぼ定常的に沈降浮遊して上向伝ば火炎 と反対方向から互いに接触する。しかし、火炎進入直 前の粒子の浮遊状態を微視的に観察したところ沈降粒 子のみならず上向浮遊粒子もかなり存在することがわ かった。そこで、火炎に伴う先端干渉縞前方において 10~20ms に相応する各粒子の移動距離から粒子の平 均速度を測定して、Fig.9 に示すような速度分布を求 めた。平均粒径を変化させて幾つか測定した結果を Table 2に纒めた。それによると、当然ながら重い粒 子で火炎伝ばが遅い場合ほど上向浮遊粒子は少ないこ とがわかる。逆に平均粒径が小さくなる程上向浮遊粒 子数は増し、dm=125 μm では沈降粒子数の8割以上 に達する場合があった。これらの各粒子の移動速度分 布は観測窓の視野範囲にある観測可能な粒子シルエッ トについて行なったもので、燃焼管断面の全粒子につ いて求めていないという問題があるが、微視的には火 炎直前での粒子の挙動は平均粒径によってかなり異な ることがわかる。

このような粒子の挙動が火炎の接近に伴う流れ場の 変化によって起こることは、同様の円筒配管中での予 混合ガスの層流火炎伝ばの場合から容易に 想像 で き る⁶⁾ としても必ずしも明確ではなかった。しかるに, 流れ場を可視化する方法は種々開発されているが⁷⁾, 粒径の大きな粉じんを含む気流速度を測定することは 容易でない。ここでは熱線風速計を使用して流れの変



Photo.8 Near axi-symmetric interferograms of dust-flame 軸対称に近い粉じん火炎干渉図 $d_m=255 \,\mu m$, $V_f=66 \, cm/s$



Fig.11 Temperature distributions with burning particles at the flame front, derived from Photo.8 火炎前縁での燃焼粒子と温度分布

化を直接測定することを 2,3 試みた。もとより、こ のような条件下でかかる感応線(hot-wire)を使用す ることは適当でないが次のような結果を得た。

Fig.10 は燃焼管中心軸上での非平衡出力電圧の変動であり、粉じん雲の分散のみの場合と火炎伝ばを行なった場合を比較して示す。それによると、粒子群の落下に伴ってすでに激しい変動がみられることになる

が、火炎伝ばでは明らかに火炎到達前に気流が加速さ れる部分が記録された。粉じん粒子の挙動と考え合わ せて、この部分では気流方向が一時的に逆転して火炎 伝ばが起こることに対応するものとみられる。これを 連続して繰り返すことにより層流火炎伝ばは可能で あり、気体の流れ場でみる限りこれらは予混合ガス中 での層流火炎伝ばと同様の機構によるものと考えられ る。そもそも、かかる配管において先端火炎が総体的 に放物形状を取ること自体、燃焼生成ガスの熱膨張と その流体の管壁での粘性抵抗に基づく火炎前方での気 流変化を示していると言えるであろう。その点、中心 軸上のみの気流の観察だけでは不十分であるが、配管 中での層流伝ばについては共通の機構が推察される。

4.4 火炎先端での温度分布

比較的軸対称に近い干渉縞分布を示す先端火炎の例 を Photo.8 に示し、これから火炎先端での温度分布 の数値計算を試みた。その結果を Fig.11 に等温線図 で示す。計算方法は、一般に中心軸からの距離に関す る Abel 型の積分方程式をもとにその解析解に依る場 合が多いが、ここでは同様の Hauf ら⁸⁾の解析に従い ガス組成の影響を考慮することなく軸両側の同一縞次 数の平均距離で計算した。計算方法はこれらの幾つか の仮定を含むと同時に、精度上の問題もあるので予熱 帯近くでの温度分布のみを示した。また、Photo.8 で は干渉縞を読み取る上で火炎はかなり背光の明るさで 打ち消される結果になったが、火炎前縁附近での燃焼 粒子の火炎は比較的明瞭なので Fig.11 にこれらを重 ねて示した。それによると,中心軸先端で特に温度勾 配が大きく管壁に近づくにつれて小さくなることがわ かる。

-13 -

- 14 -

5. 火炎伝ば機構の考察

以上の結果を総括して,配管中での燃焼下限界近傍 における層流コルク粉じん火炎伝ば機構は定性的に次 のように解釈される。

初め浮遊沈降状態にある粉じんは,下方から上向接 近してくる火炎の前方(火炎の鼻)近くで弱い気流変 化を受ける。そのため,軽い粒子は上方へ巻き込まれ て浮遊するが,火炎上方の配管内の空気は火炎に対し て次々と火炎内に取り込まれるのでそれに伴って粒子 は火炎に追いつかれ,ある粒子はその途中で着火する ことになる。重い粒子ほどこれらの気流の影響を受け ず火炎内へ沈降する。それらのある粒子は,やはりそ の途中で着火するであろう。コルク粒子は著しく浮遊 し易いので,このような上方浮遊する粒子が多く見ら れることになる。これらの上向伝ばは燃焼生成ガスの 熱膨張に依るところが大きく,限界火炎速度 40 cm/s はこの条件での高温の燃焼生成ガスの最小上昇速度と 考えられる。

一方, コルク粉じん粒子の燃焼は良く知られた二段 階燃焼を示す。予熱帯での粒子の揮発化(またはパイ ロリシス)は着火直前において急激に起こりそれを継 続しながら, 粒子径の数倍の大きさの球状拡散火炎で 燃焼し後, 炭化残渣の燃焼を行なう。単一粒子の火炎 の非定常的な燃焼は, 揮発成分の燃焼とそれによって 促進される非揮発性物質のパイロリシス成分の燃焼に 対応することにもその一つの原因がある。実際には, 二つのプロセスは明確に区別できるものではなく複合 して進行するであろう。

平均粒径が 90 および 180 µm の場合は,かくして 燃焼する粒子が隣接の未燃粒子を次々と着火させると いうようにして一見不連続的に火炎伝ばする。この場 合には,ある程度粉じん濃度を増しても不連続的な伝 ば機構は維持される。一方,平均粒径が 255 および 360 µm へと大きくなるにつれて上記の上向浮遊粒子 は次第に少なくなり,全体の火炎面から主に熱伝導に よって加熱されて起こる揮発化も困難になる。従って, 不連続的な火炎伝ばも困難になってくるが,コルク粉 じんの燃焼下限界および限界火炎速度はともに粒径の 変化によって変らない。これはポリエチレン粉じんな どの多くの可燃性粉じんが一般に粒径が小さくなる程 燃えやすくなる事実と違って,コルク粉じんでは見か け上の燃え易さは粒径によって変らないことを示して いる。その原因は当然伝ば機構に求めなければならな い。コルク粉じんの重力による沈降速度は粒径によっ て大きな違いがないことから、平均粒径が大きくなっ た場合でも少なくとも下限界極近傍では不連続的な火 炎伝ばが起こると考えられる。逆に,燃焼下限界での火 炎伝ばには重力による粒子の沈降が大きな影響を持つ ことが裏付けられる。更に、同じ下限濃度では粒径が 小さい程分散する粒子数は極端に増すが、それだけ燃 焼時間も短くなるので、粒径が大きい場合と較べて限 界火炎の長さはそれだけ短くてすむ。ただし、一定空 間では粒径の小さい粉じんほど多数の粒子数が燃焼す ることになるが燃焼する粒子数の割合は変化しないも のとする。このことは、単一粒子の初期径に対する最 大火炎径の割合が小さい粒子径ほど大きくなることの 説明にもなる。すなわち、粒径が小さい程隣接火炎の 数は多くなり酸素分圧の低下、加熱速度の増加などを 誘起することによるであろう。このような単独粒子の 火炎径の割合で見る限り、粒子径が小さい方がはるか に燃えやすく、同時に粒子密度が大きいほど当然火炎 密度の高い伝ば火炎が観察される。従って、下限界に おいては粒径によって燃え易さが変らないとしても粉 じん濃度を増すにつれ燃焼特性は変化するものと推察 される。

実際, 平均粒径が 255 µm 以上で粉じん濃度を増す につれて火炎前面に独立した球状火炎を次々と形成し て行くことは困難になって、火炎前縁は各粒子周囲の 拡散火炎 が互いに融合して連続したものとなってく る。これらをポリエチレン粉じん火炎の均質な先端火 炎と較べてみると、コルク粒子では一般に沈降速度は 小さいので燃料成分の拡散が粒子中心に起こるのに対 し、ポリエチレンの平均粒径および粉じん濃度が大き い場合には燃料ガスを放出しながら沈降して燃焼する という違いがある。また、それらの燃料ガスの成分に も、ポリエチレンでは無機ガスや低級炭化水素に富む 拡散しやすいパイロリシス生成物であるという違いが 指摘される。そこで、上記のコルク粉じん火炎につい て一部は粒子球状火炎を示し全体的には普通の拡散火 炎と見られることから、その伝ば機構は不連続火炎伝 ばから粒子群に共通した拡散火炎伝ばへ至る遷移領域 にあるものと考えられる。しかし、火炎内部や下部で は既に観察したように全体的な拡散火炎あるいは沈降 燃焼粒子などが形成されてくるので,粉じん濃度を更 に増加させることによって拡散火炎伝ば機構へ容易に

移行するものと言える。

以上は大方、下限界近傍に限った火炎伝ばの観察に 基づいたものである。粉じん濃度を十分増した場合の 例として, Essenhigh ら²⁾は火炎速度と粉じん濃度 (上限界 1.8g/l)の関係を測定して細かい粉じんの方 が当然火炎速度の増加が大きくなることを示した。そ こで、上記の伝ば機構からも平均粒径が 125 および 180 µm の場合には不連続的な火炎 伝ばがかなり高い 濃度まで維持されるとみられるので,粉じん火炎は不 連続的な伝ば機構によってより容易に伝ばすると思わ れる。すなわち、全体的な上向拡散火炎では燃料成分 は下方から酸素は上方から単一的に供給されるのに対 し、燃料成分が点存して酸素の拡散が適切に起こると みなされるからである。そのためには、コルクのよう な高い粉じんの浮遊性が大きな要因となっていること が改めて指摘できるが、配管中で利用できる酸素濃度 は非常に限定されているので不連続的な火炎伝ばが得 られる粉じん濃度および燃焼特性もかなり制限された ものであると考えられる。

6. 結 語

コルク浮遊粉じん中における層流火炎伝ばを燃焼下 限界近傍で観察し,その火炎伝ば機構について検討し た。その結果,燃焼下限界極附近ではいずれの粒径で も不連続的な粒子状火炎伝ばが起こり,粉じん濃度を 僅かに増して行くと粒径が小さい場合は上記の伝ば機 構がほぼ維持されるとしても,粒径が大きいと粒子の 単独拡散火炎が互いに融合し粒子群に共通した拡散火 炎が付け加わるようになり,不連続的な火炎伝ばから 全体的な拡散火炎へ至る遷移領域を示すものとみられ る。

一方,不連続的な火炎伝ばを取る上で,火炎前面の 沈降粒子は逆転して上方浮遊することが粒子の発火の しやすさからみて重要であり,これは粒径が大きいほ ど困難になり上記の伝ば機構の変化の一因になると考 えられる。これは粉じん粒径とともに粒子密度(g/ cm³),例えばコルク(~0.24),ポリエチレン(~ 0.95),炭じん(~1.3)など,をも考慮してそれらの 火炎伝ば機構を比較すれば更に明らかにされるであろ う。かくして、コルク粉じんは全粒径にわたって著し く浮遊し易いということが伝ば機構に影響していると 言えるが、そのためには粉じんのパイロリシス特性や 燃焼特性を考慮しなければならない。コルク粒子は不 活性雰囲気中での熱分析に対応した燃焼の仕方を行な い、下限界近くの火炎前縁付近での火炎の大きさに は、燃料液滴粒子群中での火炎に及ぼす初期粒子径の 影響と同じものがみられた。また、火炎の伝ばは燃焼 生成ガスの膨張によって加速される。これらのことか ら、不連続的な火炎伝ばは高い燃焼特性すなわち燃焼 危険性が大きい場合に相当するものと考えられる。

以上の観察は頗る弱い火炎について行なっている。 従って、爆発火炎あるいは乱流状態での燃焼火炎につ いてどの程度適応できるか必ずしも明らかでなく今後 検討を加える必要があろう。

(謝 辞)

実験を行なう上で多くの方々の助力を頂いた。特に、土木建築研究部木下氏には熱線風速計に関する一切の便宜を計って頂いた。ここに記して深く感謝いたします。(昭 53.2.4 受理)

献

1) 著者, 産安研技術資料, TN-77-6 (1978)

文

- R. H. Essenhigh & D. W. Woodhead, Comb. & Flame 2, 365 (1958)
- K. N. Palmer, 'Dust Explosions and Fires'. Chapman & Hall (1973)
- J. H. Burgoyne & L. Cohen, Proc. Roy. Soc. Ser. A, 229, 375 (1954)
- 例えば、疋田強・秋田一雄、'燃焼概論'、コロ ナ社(昭46年); A. M. Kanury, 'Introduction to Combustion Phenomena'. Gordon & Breach Science Publishers (1975)
- B. Lewis & G. von Elbe, 'Combustion, Flames and Explosions of Gases' Academic Press (1961)
- 7) 浅沼強編, '流れの可視化ハンドブック', 朝倉 書店 (1977)
- W. Hauf & U. Grigull, in 'Advances in Heat Transfer No. 6 (ed. J. P. Hartnett et al.)'. Academic Press (1970)

- 15 -

産業安全研究所技	支術資料 RIIS-TN-77-7
昭和 53 年 5 月 30 日	発行
発行所	労働省産業安全研究所
壶 108	東京都港区芝5丁目35番1号
	電話(03)453-8441番(代)
印刷所	新日本印刷株式会社

UDC 536. 463:541. 182:614. 833

浮遊粉じん中における層流火炎伝ばの実験的研究(II)

――コルク粉じん火炎――

松田東栄

産業安全研究所報告 RIIS-TN-77-7, 1-15 (1978)

コルク粉じん火炎の層流火炎伝ばに関して, 燃焼下限界, 限界火炎速度および粉じん落 下平均速度を測定し, その伝ば機構を検討した。シネ・フィルムの観察によって単独粒子 の燃焼過程を調べることができ, 下限近傍ではすべての粒径について不連続的な粒子状の 火炎伝ばがみられた。

(図 11, 写 8, 表 2, 参 8)

UDC 541. 643:541. 182:614. 833

Experimental Studies of Laminar Flame Propagation in Dust Suspensions (II) ----Cork Dust-Air Flame-----

by Toei Matsuda

Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety.

RIIS-TN-77-7, 1~15 (1978)

Measurements of lower flammability limit, limiting flame speed and mean velocity of dust fall are made on the laminar propagation of cork dust flames and the propagation mechanism is examined. Cine-film observation showes the burning process of an individual particle. The particulate flame propagation is seen for all the particle sizes near the limit.

(11 figs., 8 photo., 2 tables and 7 refs.)