

RIIS-TN-77-6

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 (I)

—ポリエチレン粉じん火炎—

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(I)*

—ポリエチレン粉じん火炎—

松 田 東 栄**

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

— Polyethylene Dust-Air Flame —

by Toei Matsuda

Considerable data of characteristics of dust explosion hazards have been accumulated and a large amount of information is now available on the subjects. However, a fuller understanding of the flame propagation process in dust suspensions is still insufficient and needed for predicting more accurately the explosion behavior in the dust handling industrial plant.

The propagation of laminar dust flame is studied experimentally, using polyethylene powder as a fuel in the first place. Measurements of lower limits of flammability, flame speeds and gaseous products after combustion are made initially, and appearance of the flame is observed in order to examine the nature of dust flame propagation. Then, a Mach-Zehnder interferometer and schlieren techniques are applied to the propagating flame with employment of high-speed cine photography.

A vertical tube of cylindrical glass about 2-m long and 75mm in diameter was used for observation of upward propagating flames. For the steady flame propagation, the top of the tube was closed, leaving the end opened just before ignition.

The relationship between the lower flammability limit, (L mg/l) and the mean dust falling velocity at the limit, (V cm/s) was obtained as $(V-114) \cdot (L-5.7) = -1008$. The flame speed was measured as function of dust concentrations and particle sizes, and appeared to relate to the ratio of the experimental to the calculated carbon dioxide contents in the combustion products. The limiting flame speeds at the lower limits seemed to remain essentially constant for the particles greater than about $125\mu\text{m}$, but with decreasing particle sizes decreased to the value of premixed gaseous flames.

Observation of the flames at near-limit showed a change of flame appearance with dust particle sizes. In case the mean particle diameter was at least below $90\mu\text{m}$, the flame propagated discontinuously

* 第8回安全工学研究発表会(昭50.12月)において一部発表。

** 化学研究部 (Chemical Engineering Research Division)

with burning individual or groups of particles of a faint blue color at the front, usually following with burning groups of particles, yellow shinning. At the diameter around $125\mu\text{m}$, the flame was like a coherent yellow flame which contained burning individual or groups of particles, scatteringly in itself. The flame appeared to be composed of the dark, but also coherent flame head and the yellow trails of flame separate from the front, above the diameter around $180\mu\text{m}$. These flame appearances also transferred to the longer flames with increasing dust concentrations above the lower limit of flammability.

The optical records indicated that any change of falling dust particles was undetected ahead of the flame, and that the pyrolysis of particles could occur in the preheating zone for a blue flame appearance, and in the flame itself for large part of particle sizes. The particles mostly kept falling into the flame at their speed unchanged, and in case the particle sizes were not so large, a small number of particles was seen to reverse their direction upwards in the flame.

On these observation and experimental results, the flame propagation mechanism was considered qualitatively as follows.

When the particle size is small below $90\mu\text{m}$ and the dust concentration is near the lower limit, the heating will be enough for some particles to melt and oxidative-pyrolyse in the preheating zone of the approaching flame from the bottom, as the velocity of falling dust is comparatively slow. However, the pyrolysis occurs almost completely near, or at the particle surface, owing to the small size particle, and the localized pre-mixture of pyrolysate and air may be formed. Then, the appearance of blue sparks is observed with ignition at the flame front. The flame propagation is likely to be supported with buoyancy of the hot exhausted gas. With raise of the particle diameter and dust concentration, the pyrolysis takes place more rapidly in the flame, and the process will be seen of the upward diffusion of the pyrolysate into the preheating zone, rich of fresh air, accordingly the whole bright diffusion flame being observed. Moreover, as the particle sizes, or the dust concentrations are increased more than the above case, the pyrolysis of the particles becomes not to be sufficient in the flame head, due to less heating, but soon to be fast in the flame inside, thereby the bright trails of burning particles being obtained. For this kind of flames, the more thicker flame front, or flame head could be given if the heat flux from the lowside diffusional flame is attained with higher dust concentration. In conclusion, the mechanism is affected by the rate of pyrolysis of the particles and the dust sedimentation velocity.

1. 序

可燃性粉じんが空気または何らかの反応性雰囲気中に浮遊ないしは分散した場合、それらの気相中を燃焼波が急激に伝ばする現象を一般に粉じん爆発と呼んでいる¹⁾。これらの現象が種々の様態で、産業界において悲惨な労働災害や大規模な設備破壊等を引き起す事は、これまでの幾多の災害事例が示すとおりで、よく知られている。このため、これらの災害予防を目的とした研究は約半世紀以上にもわたって継続され、多くの成果が得られてきた²⁾。しかるに、研究の対象は、炭じんに関するものが圧倒的に多く、それ以外の可燃性粉じんに関する検討はまだ十分ではないと考えられる。しかも、近年の粉体工学等の目覚ましい発達に伴って工業的に取り扱われるようになった粉じんの種類や量は飛躍的な増大を示し、それとともに潜在的な危険性は著しく高くなり、かかる可燃性粉じんによる火災・爆発の予防や防止に関する研究も新たな意味で切実になってきている³⁾。

かくして、まず粉じん爆発とその火炎の燃え拡がりの機構を知ることは、この種の爆発の伝ばを予防する上でも防止する上でも重要であろう。これまで粉じん爆発の爆発特性や火炎の伝ばに及ぼす因子などは、実験的にかなり明らかにされてきたが、これらと密接な関係にある火炎伝ば機構に重点を置いた研究は、燃料液滴群のそれとは比較にならないほど少ない。僅かに多くの種類の可燃性粉じんの中で、その燃焼が推力として利用できるある種の反応性金属、および前述の炭じん雲中における火炎伝ばの研究などがよく知られている。しかも、粉じんの爆発特性等はほとんど実験室的な小規模装置で測定されてきたが、これらのデータを大規模な実大装置へ適用できるかどうかという事は古くて新しい問題で¹⁾、その基礎的な解決の糸口の一つは、火炎はどのように伝ばして燃え拡がって行くかという事に帰するのではないかと考えられる。そこでこの種の研究は応用的にも基礎的にも必要になる。

浮遊粉じん中における火炎伝ばの現象は、粉じんの種類をはじめとした粉じん特性や雰囲気条件などの空気力学によって影響される複雑なプロセスであるとみられるので、それを調べるためには差し当りできるだけ単純な系で出来れば一次的に層流火炎が伝ばする場合を検討することが望ましい。他方、粉じんを扱う

一般的な産業機械での乱れのある火炎伝ばを扱うためにも、乱れない理想的な場合の知識が基礎になることは当然である。また、浮遊粉じん中における火炎伝ばは、1個の浮遊粉じん粒子から他の隣接粒子へどのように火炎が伝ばして行くかという問題とも解釈できるので、火炎伝ばの様子を視覚化(Visualization)して直接検討できれば良いであろう。更に、このような火炎および粉じん粒子の動きを調べるためには、出来るだけ浮遊粉じん粒子の個数が少ない場合、すなわち出来るだけ低い燃焼下限濃度を持つ粉じんであることが望ましく、しかもその下限濃度近傍における火炎伝ばが観察し易いであろうと思われる。

このような理由に基づいて、多数の粉じんの中から代表的なプラスチックであるポリエチレン粉じんを選択した。粉じんとしてはその化学構造が簡単でこのものの燃焼特性に関した多くのデータが既に得られているので、それを利用できる利点もある。一方 Butlin⁴⁾は、ほぼ同様の理由によってポリエチレン粉じんの伝ば火炎について幾つかの観察を行なっている。これについては本文中でも引用する。しかし、比較的薄い濃度においても燃焼可能なポリエチレンの伝ば火炎の挙動などは、十分には調べられていない。そこで、火炎伝ばの視覚化に先だって火炎伝ばの性質や挙動を調べるため、垂直配管中における火炎速度や燃焼下限濃度を測定し、同時に火炎の形や伝ばの仕方についてまず調べることにした。

他方、視覚化の条件として未燃焼の粒子と燃焼中の粒子を区別することや、個々の粒子の動きが解析できること、粒子中の火炎伝ばに影響する因子等を示すことができること、などが必要である。しかし、このような要求を満たす光学的な手法としてどのようなものが適しているかすぐには明らかではない。そこで、ここでは最も高感度な光学的装置としてマッハ・ツェンダー干渉計を粉じん火炎に適応した例⁵⁾を参考にし、同装置およびシュリーレン装置によって火炎伝ばの様相を視覚化することを最終的に試みた。

このように、本報ではまずポリエチレン粉じんの火炎伝ばの性質を明らかにするため、垂直配管中での伝ば火炎の燃焼特性について種々の測定を行ない、続いて光学的手法によって火炎前面および火炎そのものの微視的な観察を行なった結果について述べ、これらの結果に基づいて火炎伝ば機構について考察した。

2. 実験装置および試料

2.1 燃焼装置および附属装置

できるだけ単純な装置において一定濃度の浮遊粉じん雲を形成するため、垂直配管を燃焼容器としてその上部から管内に粉じんを分散させるという方法を用いた。Fig. 1 に実験装置の略図を示す。燃焼管①は内径 75 mm, 厚さ 5 mm の透明硝子管で全長約 2 m のものである。その一部は長さ 13 cm の金属配管製観測部②又は③で置き換えることができる。この観測部の中心管壁には直径 4 cm の円形光学窓を対向して設けた。観測部②, ③は層流火炎伝ばの助走区間の影響を調べるために決めたもので、実際には観測部②において大部分を観測した。配管中にはできるだけ均一な粉じん濃度を形成させる必要があるが、本実験では Jones ら⁶⁾, および石浜ら⁷⁾の方法により適当な目開きの金網上に試料を一定量乗せて、金網の押さえ枠の縁

を鉄棒で軽く周期的に打撃するという方式を採用した。鉄棒(約 2 cm 径)④の一端は固定し他端にスプリングを取り付け、その間の固定点近くで、モーター⑤及び変速器の軸上に設置した偏心カムの回転により一定の打撃数を与える。金網の目開きは、試料粉じんの最大粒子径よりも一段大きいものを使用する。たとえば、70~100 メッシュの試料については、60 メッシュの金網を用いた。しかし、これでは十分な濃度が得られない場合やより高濃度で粉じんを分散させる必要がある場合には、更に大きい開き目の金網へ、と試行錯誤的に変化させた。かくして得られる粉じん雲は、燃焼管下部、管端から 12.5 cm の位置に固定した電極(ステンレス棒, 3.8 cmφ)⑥に高圧電気火花(ネオントランス, 15 kV)を放電させて着火させた。

燃焼管の上部は、スライド板⑦に連結した紐を強く引張ることによって手動で閉鎖できるようにした。スライド板は約 12×12 cm 木片で木枠内で加動させるようになっている。一方、下端は約 25×30×40 cm の木箱⑧に接続して床上に設置した。この木箱の一方の

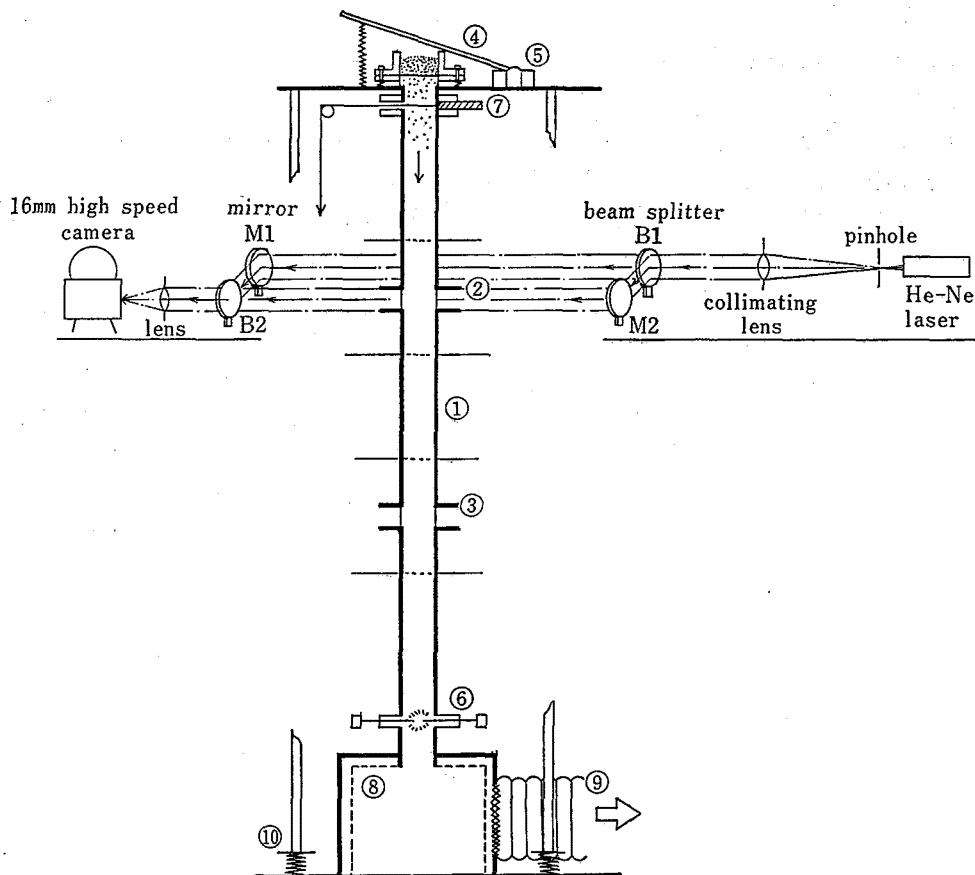


Fig. 1 Experimental apparatus and Mach-Zehnder interferometer system-Schematic
実験装置(燃焼容器および干渉計)の略図

側面は急激な圧力上昇などの際は自動的に開放するようにしてあり、他の側面は燃焼後の廃ガスを排気するためのダクト⑨が火炎伝ば阻止及び除じんフィルターの働きを負わせた数枚の金網を介して接続してある。

以上の燃焼容器および粉じん分散装置は、それぞれ金属枠組で堅固かつ十分垂直になるように注意して組立て、粉じん分散装置の振動が燃焼管の方に伝ばしないように、この装置の枠組全体を床面上で4ヶの振動防止台⑩上に設置した。

なお、この場合の放電エネルギーの中で熱エネルギーとして放出される量を、マッハ・ツェンダー干渉計によって電極周囲の空間における屈折率の時間的変化から求めた⁶⁾。すなわち、放電によって電極周辺の空気は瞬時に加熱され、加熱空気は上昇気流となって拡散する。この空気のエンタルピーを干渉計によって測定

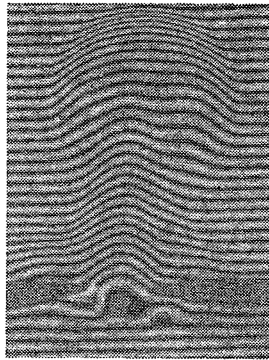


Fig. 2 Interference pattern of a spark discharge between electrodes (from cine films)

電極間放電の干渉図の例

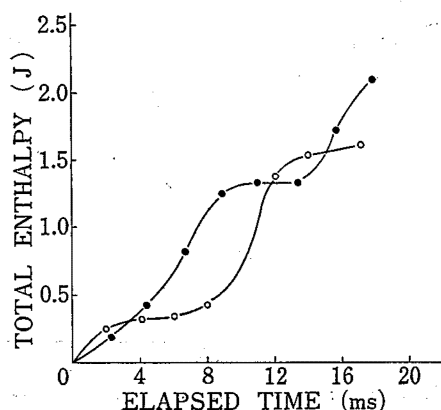


Fig. 3 Total enthalpy calculated from interferograms, as function of time. Spark gap : 4.7 mm

時間の関数としての全エンタルピー積分値の計算例(火花間隙 4.7 mm の場合)

することができる。Fig. 2 は計算に使用した干渉図の例であり、エンタルピー H は次式によって算出される。

$$H = k_n \cdot \lambda \iint S(x, y) dx dy$$

ただし、 k_n : 定数、 λ : 波長、 $S(x, y)$: 縞次数。

Fig. 3 に測定結果を二例だけ示した。これによると交流電源を使用しているため、時間的変化が大きいとともに放電開始位相の違いがあることがわかる。そこで、粉じん雲の着火には数秒の放電時間を取るようにした。しかし、着火エネルギーの問題はかなり複雑な面もあって今後の検討に待たざるを得ないが、ここでは、特に燃焼下限濃度を求める上で十分なエネルギーが与えられるかどうかだけを問題にした。そのため、特に粒度の大きい試料については上述の電気火花の代わりに都市ガス炎(メッカバーナ)によっても測定して比較したが両者に相違がなかったため、その他の試料については簡便な電気火花による着火を行なった。その際、いずれにせよ放電時間を長く取ることによって十分なエネルギーが与えられるものとした⁷⁾。

Fig. 4 は燃焼後ガス分析用の採取装置の略図である。ガス分析の場合には、燃焼管の一部をT字型硝子管で交換して、図のような採取口を設置した。真空保持したガス採取管(300 ml)には電磁弁式コックを開放する事によって、任意の時点で分析ガスが採取できる。燃焼後ガス中には、粉じん粒子が含まれるので硝子綿や金網によって除去してサンプリングを行なった。

2.2 光 学 系^{5,8)}

マッハ・ツェンダー干渉計の光学系の概略を参考のため、Fig. 1 に実験装置の配列と合わせて示した。光源には、He-Ne レーザー (5 mW, $\lambda = 6328 \text{ \AA}$) を使用した。光源から出た光は 20 μm のピンホール・フ

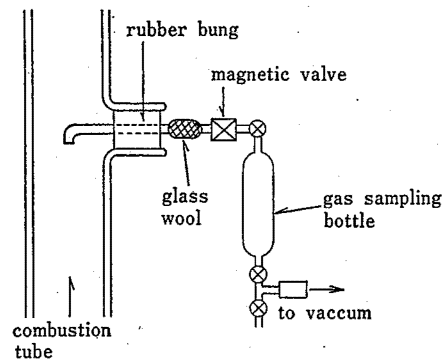


Fig. 4 Combustion gas sampling system
燃焼ガス採取系

フィルターを通り、コリメーター・レンズ ($f=1250$ mm, $\phi=120$ mm) によって平行光線となる。続いて、スプリッター・プレート B1 ではほぼ等しい強度に分割された光束は、一方は参照光 (B1-M1) として、他方は全反射鏡 M2 によって向きを変えた後測定領域を通過する物体光 (M2-B2) として働き、プレート B2 で合一され結像レンズを経てカメラ・レンズに入射する。かくして測定領域内の屈折率の変化に応じて形成される干渉縞の変化を、火災および粉じん粒子とともに 16 ミリ高速度カメラによって撮影、記録することができる。一方、シュリーレン装置には上記の干渉計の 2 個のレンズを転用し、レンズ・シュリーレン法とした。光源には別にキセノンランプを使用した。

2.3 粉体試料

使用したポリエチレン (PE) 試料は、低密度 PE (比重 0.92 g/cm^3 , 機械粉碎, 軟化点 84°C) および高密度 PE (0.95 g/cm^3 , 123°C) の 2 種類で、標準篩でふるい分けて粒度の異なる試料を得た。40, 50, 70, 100, 150, 200, 325 呼びメッシュの各標準篩を使用した。それぞれの検定目開きの中間値を取って試料の平均粒径 $d_m (\mu\text{m})$ を表す。ただし、325 呼びメッシュの篩を通過した粉体の平均粒径には、恒圧通気式比表面積測定装置によって求めた比表面積径をもちいた¹⁰⁾。

3. 燃焼下限界

3.1 燃焼下限界の測定

(a) 測定方法

燃焼下限濃度(下限界)の測定は、上方火災伝ばする場合について行なった。粉じん濃度として、粉体試料の落下を開始してからその分散が十分定常的になった時点で、燃焼管上部をスライド板で閉じ燃焼管下部においてその配管の一定容積中に浮遊する粉じんを自由沈降によって捕集し、その量を燃焼管容積で割ることによって平均濃度(静的濃度)を求めた。管壁に付着する粉じん量は一般にほとんど無視できるものであった。ただし、平均粒径が $30 \mu\text{m}$ 以下(特に低密度 PE)の細かい粉じんでは、特に低濃度において帯電凝集しその一部は管壁が白く見える程に付着して正確な粉じん濃度を求めることは不可能であった。

以上のように、粉じん濃度は平均値として求めたので、粉じんの分散性には十分注意し、できるだけ容器の断面に沿って均一な濃度となるよう配慮した。

(b) 測定結果

下限濃度は燃焼管の半分以上の長さまで伝ばできる最低濃度と火災伝ばの見られない最大濃度との中間値として求めた。これらの最低および最大濃度の差は、 $d_m=125 \mu\text{m}$ 以上では約 4 mg/l まで狭めることができたが、それ以下の粒径では 7 mg/l であった。小さい粒径の試料に対して任意の粉じん濃度の調整が、 20 mg/l 以下の低濃度ではなだ困難になるためである。

測定結果を平均粒径との関係において、Fig. 5 に示す。低密度および高密度 PE ともに、粒径が小さくなる程下限界が低くなるが、 $d_m=200 \mu\text{m}$ 以下の粒径ではその変化は僅少で、逆に $d_m=360 \mu\text{m}$ 以上の PE ではどのような粉じん濃度においても着火、伝ばが不可能になる事がわかる。これらの結果は、他の可燃性粉じんについて一般的に観察されている傾向と一致する¹⁾。粒径が小さいと、低密度 PE がより低い下限界を示すが、これは粒子の表面形状や分散性などの相違によって起るのではないと思われる。なお、高密度 PE は平均分子量も高く剛性が大きいのに較べて、低密度 PE では特に機械粉碎された粉体において表面に突起や線状のものが形成される事が電顕写真⁹⁾によってわかる。

$d_m=29 \mu\text{m}$ (高密度 PE) では、燃焼管上部におい

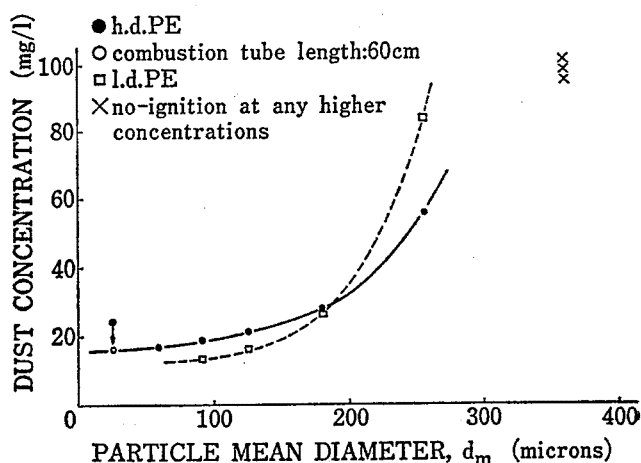


Fig. 5 Variation of lower flammability limits with particle mean diameter
高密度 (●) および低密度 (□) ポリエチレン粉じんの燃焼下限界と平均粒径の関係

て細かく分散する粉じん雲が見られたが、やがて沈降する間に互いに帯電凝集してまるでばた雪のようになって落下した。しかも上述のように、かなりの粉じんが器壁に付着する。この場合の高密度 PE の下限界は、約 24 mg/l であったが、凝集粒子を回避できる燃焼管の長さとして 60 cm で測定した下限界は、16 mg/l であった。これは Fig. 5 のように、データが連続的となるので妥当と考えられる。しかし、このように帯電しやすい粉じんについて粒径が小さくなる程凝集の度合いは強くなるであろうから、分散粒子がどの程度単一粒子で浮遊しているかどうか疑問に思われる。ここでは、Fig. 5 の傾向が多く粉じんについて観察されていることから一応、粒子径の影響として図のような結果を考え、これを粉じんの比表面積と下限界の関係として Fig. 6 に示した。この関係は、石浜ら¹⁰⁾が炭じん爆発について求めたものによるが、PE についても同じく適用できた。この場合、比表面積は粒子の形状を球状と仮定して平均粒径から算出したもので、これを S (m^2/g) および下限濃度を L (g/m^3) とすれば高密度 PE について、

$$(S-0.021)(L-14.9)=0.20 \quad (1)$$

および低密度 PE について、

$$(S-0.024)(L-8.0)=0.22 \quad (2)$$

の式で表される。しかるに、この式の右辺は定数で、

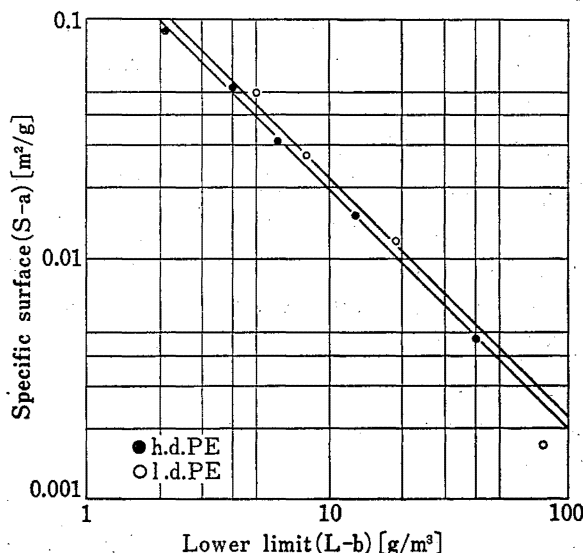


Fig. 6 The dependence of the lower limit on the specific surface of the particles

比表面積 ($S-a$) に対する下限界 ($L-b$) の依存性

(m^2/m^3) の単位を持つ。すなわち、石浜らの式は単位容積中における粒子の比表面積が一定となる事を意味していると解釈できる。実際には左辺は定数を含むので、反応比表面積なるものを定義する必要があるだろう。

しかし、炭じんは揮発成分を含み PE はパイロリシスを行なうように、その燃焼機構は異なるであろう。従って伝ば限界に対して比表面積のはたす役割は、これらの粉じんでは互いに同一とは考え難くその点に関しては更に検討する余地がある。

3.2 粉じん雲の落下速度

一方、上記の関係とは別に燃焼下限界が粉じんの重力のもとでの沈降によって大きく影響されることは容易に推察できる。しかるに、単一粒子の(沈降)終末速度は容易に算出できるが、粒子群として扱う場合理論的にはきわめて扱いにくく、単一粒子の運動では見られない特異な現象を呈することが多い¹¹⁾。そこで、粉じん濃度と粉じん落下速度の関係を測定し、それから下限界と落下速度の関係を調べることにした。

粉じん平均落下速度は、燃焼管中の平均粉じん濃度とその濃度において燃焼管下端で一定時間捕集した粉

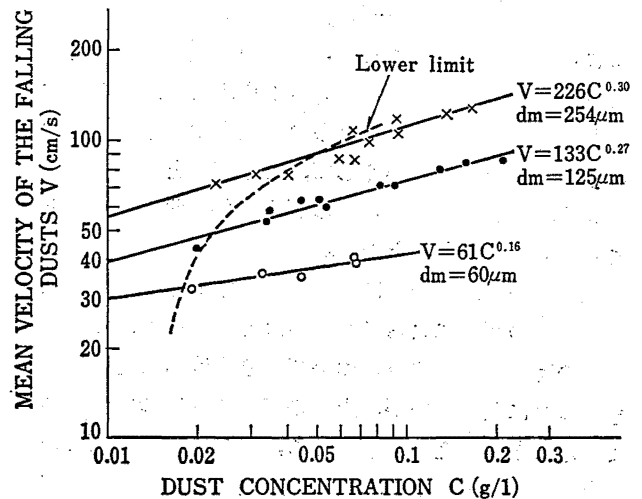


Fig. 7 Mean velocity of the falling dusts with change in dust concentration and lower flammability limits
 粉じん平均落下速度 (V) と濃度 (C) および燃焼下限界 (点線) の関係、高密度 PE

$$* V = \frac{1000 \times m}{AC}, \quad \text{ただし}$$

m = 単位時間あたりの捕集粉じん量 (mg/s), A = 管断面積 (cm^2)

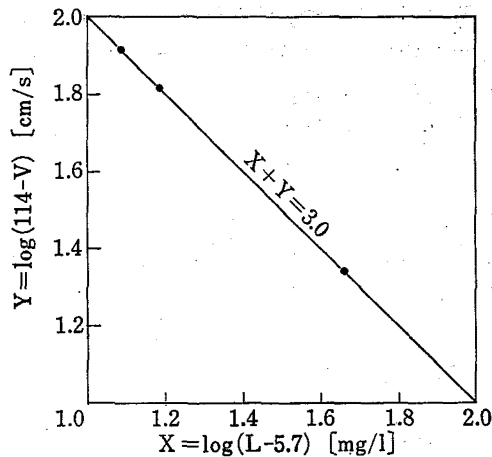


Fig. 8 The dependence of the lower limit on the mean velocity of falling dusts
平均落下速度に対する下限の依存性

じん量から算出して求めた*。結果は平均落下速度 (V) と粉じん濃度 (C) の関係を k, m を定数として、 $V=kC^m$ の式¹²⁾で整理して Fig. 7 に示す (高密度 PE)。異なる粒径の燃焼下限は既に求めてあるので、これを平均落下速度に対して併せてプロットした。これによると、落下速度の増加につれて燃焼下限が高くなる事が明確であり、下限を $L(\text{mg/l})$ とすればこの関係は、

$$(V-114)(L-5.7) = -1008 \quad (3)$$

によって表される。これを、両辺の対数を取ることに よって Fig. 8 に示す。プロット点はわずか3点にすぎないが Fig. 7 からそれらの中間点でも十分成立するものと思われる。かくして、落下速度と下限の関係式は、比表面積と下限の関係式(1)および(2)とまったく同形のものとなる。

燃焼下限が火炎伝ば現象に関係するものである以上、多数の因子によって影響される事は明らかで、その中の特定の要因のみについて取り上げることは偏見を持つ事になり易いが、上記の実験結果について次のようなことが言える。すなわち、式(3)によればこの場合平均落下速度が 1.14m/s を越える PE 粉じん雲は着火せず、下限は 5.7g/m^3 まで低下できる事を示している。粉じん雲の落下速度が、ある値よりも大きくなれば着火不可能による事は、火炎の吹き消えと同じ事で当然予想されることであるが、これは粉流体の空気輸送などに関連して重要である。すなわち、安全上の限界粉流体速度というものが存在する。もっともこの場合の粉じん雲の落下速度は、粉じん濃度および粒径と密接に関係し層流沈降状態についてであり、

強制的な空気輸送とは異なるが、流速が早ければ着火しにくくなることは明らかで着火源の種類やエネルギーにも依存するであろう。

4. 火炎伝ば特性

4.1 火炎の観察

伝ば火炎の観察は、室を暗室にして燃焼管上端閉・下端開放条件下で上方伝ばする火炎について、肉眼及び直接写真撮影によって行なった。ここでは、特に平均粒径の影響について述べる。下限界近傍およびそれより僅かに高い濃度における火炎の写真を高密度 PE についてそれぞれ平均粒径別に Fig. 9 に示す (なお、低密度 PE との相違はあまり重要でないので以下省略した)。

火炎形状および伝ば特性は、基本的には平均粒径および粉じん濃度によって異なるように見える。下限界近傍の $d_m=60$ および $90\mu\text{m}$ では薄い青白色の各粒子及び粒子群に独立した火炎が次々と形成、消滅を繰り返して伝ばする。あるいは、同様の黄白色の独立火炎やそれらの融合した火炎をしばしば伴う (a, b)。火炎全体は短く薄い、火炎前縁 (flame front) は不連続的ながら放物形状を維持して伝ばする。粒子状の青炎を形成する火炎は著しく暗い。粉じん濃度を増すと $60\mu\text{m}$ では、黄白色の火炎が全体的に融合して明るく非常に短い火炎が形成される (c)。 $90\mu\text{m}$ では次の限界火炎に似ている。すなわち $125\mu\text{m}$ の下限界近傍の火炎は、火炎全体に共通するようなガス炎があってその中に粒子または粒子群に局在した火炎が点在している火炎構造を示す (c, f)。いずれも黄橙色の火炎で、火炎の長さは次第に増すようになる。 $125\mu\text{m}$ で濃度を増すと、独立火炎がやや大きく一部は沈降によって尾をひくようになる (g)。 $180\mu\text{m}$ の伝ば火炎でも同様の沈降火炎が現れてかなり長い火炎を形成する (d, h)。しかし、その先端は下方の明るい火炎とは区別される暗いガス炎のように見える。

一方、Butlin⁴⁾は約 $200\mu\text{m}$ の PE 試料で青炎を含む火炎を観察しているので、粉じんの粒径や濃度ばかりでなく試料の保存状態などによっても火炎の性状は少しずつ変化するものかもしれない。上記の観察でも幾つかの火炎性状は重複して観察されており、伝ば性からみても他の変化へ至る中間的あるいは遷移状態に

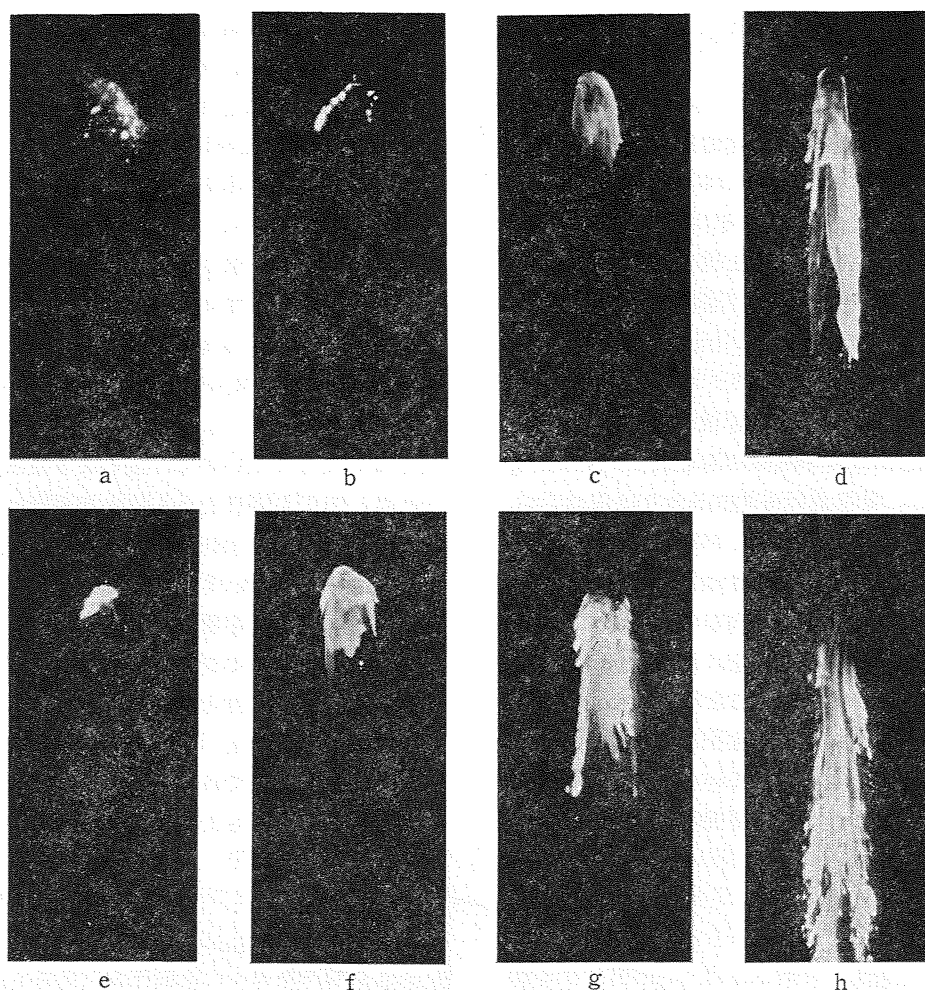


Fig. 9 Direct photographs of dust-air flames (shutter speed, 1/250); (a-d) close to lower limits; (e-h) dust concentrations were slightly increased above the lower limits. Particle diameter (平均粒径) d_m : (a, e) 60; (b, f) 90; (c, g) 125; (d, h) 180 μm
 火炎の粒径別による直接写真, 撮影速度 1/250; (a-d) 下限近傍, (e-h) 下限界より僅かに高い濃度

あるものが存在していると思われる。そこで、下限界近くでの伝ば火炎の観察からその特徴を以下のように纏めて考察することにする。

(i) 平均粒径が約 90 μm 以下の場合、下限界近傍では粉じん粒子または粒子群に独立した薄い青色の火炎を次々と形成して不連続的に伝ばして行く。

(ii) 粒径が大きくなるか、粉じん濃度が僅かに増すと黄橙色のやや厚い安定した火炎が形成され、その中には幾つかの粒子または粒子群に独立した火炎が周囲の火炎と融合して点在する。

(iii) 少なくとも粒径が 125 μm 以上で粉じん濃度を増すと次第に長い黄橙色の火炎を示し、その先端は暗い均一な拡散炎のようにみえるが、下部は明るい不

均質な火炎で大小の沈降落下するエンベロープ炎状のものやそれらの融合火炎を含む。

以上の特徴のように、基本的には少なくとも粒径および粉じん濃度によって3種の火炎または伝ばプロセスが下限界近傍で存在し、これには粒子の沈降の影響が大きく反映されていると考えられる。

4.2 火 炎 速 度

下限界における火炎速度は、火炎伝ば性状との関連などを明らかにする上でも重要な燃焼特性である。ここでは、特に粒度によって下限界近傍での火炎速度がどのような変化を示すかを明らかにする目的で測定した。しかし、下限界での火炎速度そのものは直接的に

は知りえないので、粉じん濃度と火炎速度の関係の外挿によって調べることにした。

火炎速度の測定は、短い火炎について回転ディスク・シャッター（ストロボ模様で定速化）と 35 ミリカメラを組合せて、長い火炎については 16 ミリ・シネカメラ（50～100 コマ/秒）をそれぞれ使用して行なった。なお、ここで使用したような燃焼管において、上部閉および下部開放の条件での浮遊粉じん雲中では、全体的にはほぼ一定速度で火炎が伝ばすることがわかっている²⁾。さらにこのようなストロボ写真によると、伝ば途中で消炎する火炎は管壁側から消炎した。

火炎速度と粉じん濃度の関係の測定例のいくつかを Fig. 10 に示した。實際上データはかなりばらつくが、最適曲線を求めることによって、平均粒径が大きい場合には濃度の増加につれ火炎速度は初め急に増加した後で変化が小さく平坦になる傾向がみられる。これに対して平均粒径が小さい場合ほど、濃度増加につれてより大きい火炎速度の値を取ることがわかる。Essenhigh ら¹³⁾は、コルク粉じんの火炎速度を測定して、粒度に関して同様の傾向を認めている。高濃度における火炎速度を求めることは、本研究の直接の目的では

ないが、これらの結果は火炎の形状と深く関係しているものと思われる。火炎の形状は火炎伝ば特性と関連するが、ここではとりあえず火炎の形状を火炎の長さに対応させた。 $d_m=180\mu\text{m}$ 以上では下限界付近からかなり長い火炎がみられることは既に述べた。更に、粉じん濃度が増すにつれ次第に長くなり、ついには火炎の先端から燃焼管下端までが常に火炎で占有されるような状態で伝ばするようになる。このような事態は濃度を増しても変らなくなるので、Fig. 10 のように火炎速度に平坦な部分が現れるのではないかと推測される。これに対して $d_m=25\mu\text{m}$ では、もともと火炎の長さはいたって短いので、上のような状態に達するまでには、粉じん濃度とともに火炎速度は更に増加できる理由であろうと思われる。火炎速度はいずれも 0.1 m/s のオーダーで、1 m/s を越えない。これは燃焼管の長さによっても影響されると思うが、むしろ管径により大きく依存するようである¹³⁾。

濃度を外挿して得られる下限界における火炎速度と平均粒径との関係を Fig. 11 に示す。なお、 $d_m=25\mu\text{m}$ の下限界近傍では粉じんの凝集のため十分なデータが求められなかったので区別してプロットした。同

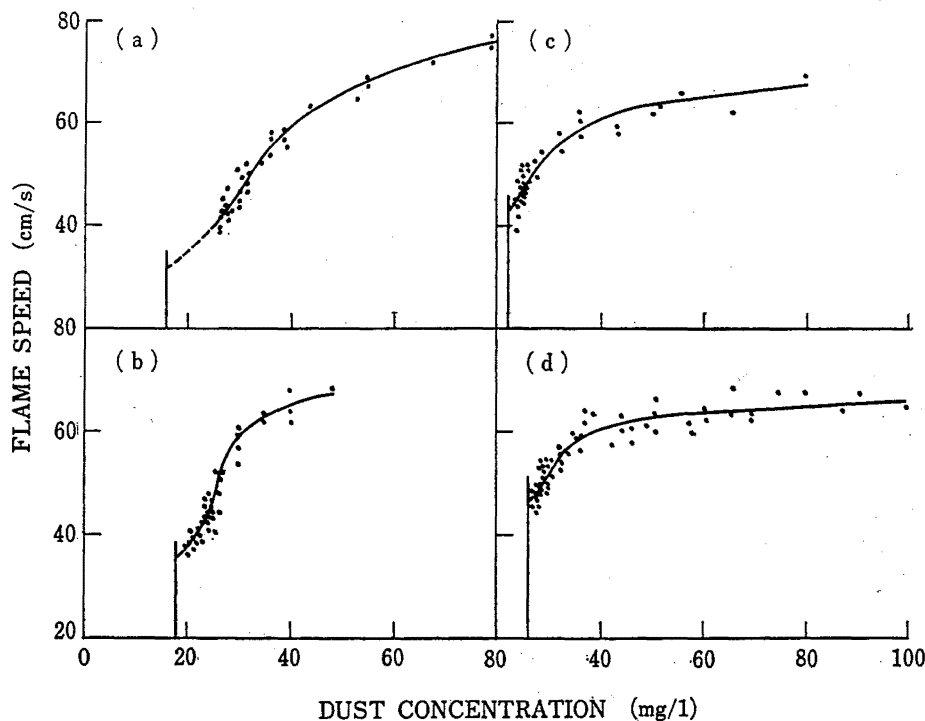


Fig. 10 Variation of flame speed with dust concentration and particle diameters : (a) 25, (b) 60, (c) 125, (d) 180 μm

火炎速度に及ぼす粉じん濃度と粒径の影響

平均粒径 : (a) 25, (b) 60, (c) 125, (d) 180 μm

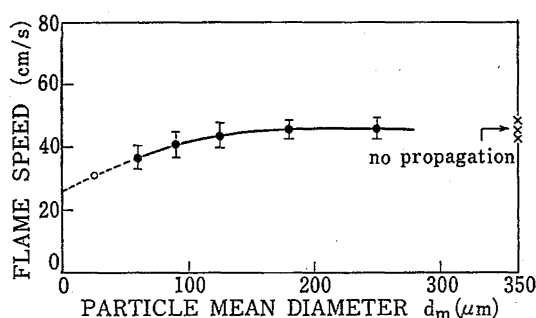


Fig. 11 Variation of flame speed at the lower limit with particle mean diameter

限界火炎速度と平均粒径の関係

図によれば、150 μm あたりから粒径が小さくなるにつれて次第に火炎速度は低下して、粒径が無限小となる極限での火炎速度は 25~30 cm/s の範囲にあることが予想できる。一方、約 150 μm 以下の大きい粒径では一定の限界火炎速度、 46 ± 3 cm/s を取る。ただし、350 μm 以上ではもはや着火、伝ばしないことは前に述べた。

ここで、興味深いのは無限小の粒径における火炎速度である。もしこの値が妥当だとすれば、混合ガスの燃焼下限界において火炎伝ばは、熱い生成ガスの泡 (bubble of hot exhaust gas) によって移動して行くという Levy¹⁴⁾ の説で与えられる上昇速度 28 cm/s に極めて近い値となる (上昇速度 $v = 0.464\sqrt{gr}$ から計算¹⁴⁾。ただし、 g = 重力の加速度、 r = 管半径)。生成ガスの浮力上昇については後にも述べる。

4.3 燃焼後ガス分析

(a) 測定方法

燃焼後ガスの分析は、これまで述べた燃焼条件で火炎伝ばを行なわせて測定した。ガス採取装置 (Fig. 4) は、燃焼管の下端から上方へ約 140, 165 cm の位置にそれぞれ並列にして設置してある。火炎が上方の採集管口を通過した時点でただちに電磁弁を開放してサンプリングを行なった。ガス試料は一定時間後に、通常のカクロマトグラフィーによって CO_2 , CO , CH_4 , H_2 について定量分析した。本測定に先だって、サンプリング位置や方法、粉じん捕集の方法などについて検討したところ、火炎の形状が最も著しい影響を示すことがわかった。そこで、出来るだけ安定した火炎が得られるようなところとして、上記のようなサンプリング位置を決定し、かつ並列分析を行なってその平均値でデータを求めた。採集管口に火炎が接している状態でサンプリングを行なうと、かなり高い濃度の燃焼生成ガスが求まる傾向にあるので、ここでは燃焼波が通過した直後のガスを採集するようにした。

(b) 測定結果

平均粒径 90, 125, 180 μm の試料で測定した結果を、Fig. 12 に示す。これによると下限界近傍での燃焼生成物は、 CO_2 がほとんどで (ただし、 H_2O は凝縮物として除く)、粉じん爆発の燃焼跡ガス中にしばしば多量に含まれる CO や分解ガスは、ほとんどみられない。この事はやや予想に反することで、まずこれまでの分析方法や実験方法との相違も考慮する必要があるが、燃焼機構にもその一因があるものと考えられ

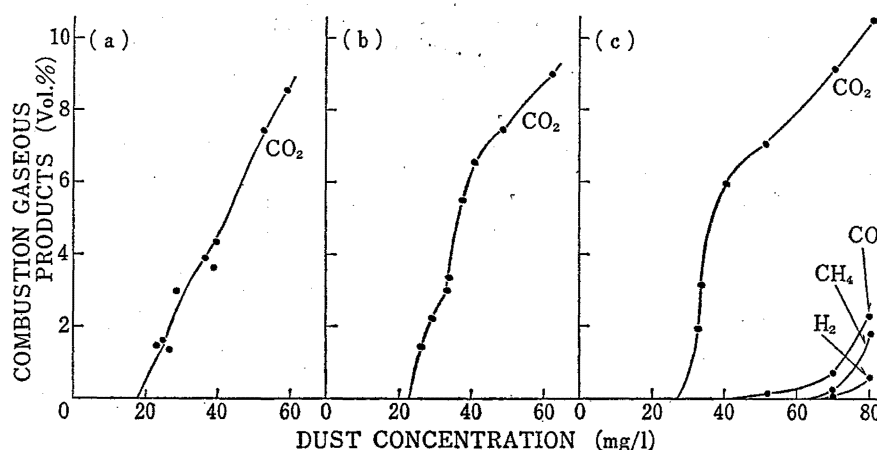


Fig. 12 Combustion gaseous products near lower limits (H_2O excluded) d_m ; (a) 90, (b) 125, (c) 180 μm

下限界近傍での燃焼生成物、ただし H_2O は除く

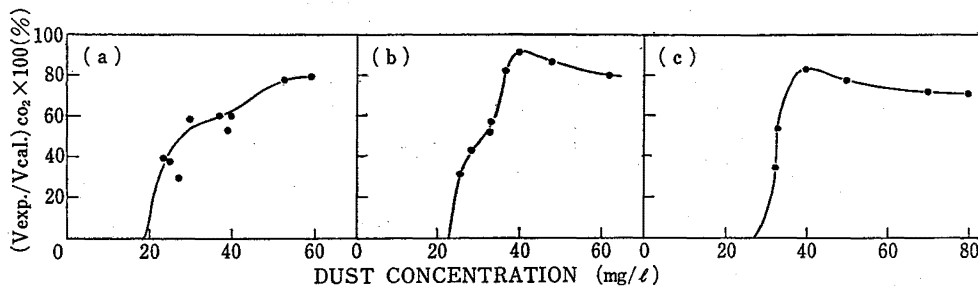


Fig. 13 The ratio of experimentally obtained CO_2 volume to calculated one
(a)-(c) : particle size, same as in Fig. 12
炭酸ガス生成率の比較, (a)-(c) は平均粒径で Fig. 12 に同じ

る。図において、炭酸ガスの濃度は粉じん濃度の増加につれて増大する傾向があるが、平均粒径 125 および 180 μm では途中に変曲点が存在する。これを明確にするため、任意の粉じん濃度における完全燃焼によって生成する炭酸ガスの理論値に対する測定値の割合（生成率）を求め、これを Fig. 13 に示す。これによって、上記の二つの粒径に対しともに約 40 mg/l の粉じん濃度において最大の生成率を示すことがわかる。しかも、その割合は 80~90% にも達するが、粉じん濃度が下限界まで低下するにつれ急激に小さくなる。しかし、高濃度の粉じん雲中では次第に平坦になって一定になる傾向がみられる。更に高い粉じん濃度になると、不完全燃焼生成物やパイロリシス反応生成物が多く含まれるようになるので、炭酸ガスの生成率のみで比較することは不適當になる。もっとも、これらの副生成ガスは Fig. 13 に示すように、粒径にも大きく依存する。一方、 $d_m=90 \mu\text{m}$ ではこの濃度範囲でピーク値はみられず、上記の二つの粒径の場合と大いに異なる。

ここで、Fig. 10 および Fig. 13 を対比してみれば、炭酸ガスの生成率が火炎速度の変化に対応したものであることが容易に指摘できるであろう。すなわち、Fig. 10 (c), (d) の火炎速度の屈曲点が約 40 mg/l の粉じん濃度に相当し、これに対応する Fig. 13(b), (c) のピーク値の粉じん濃度とほとんど一致する。更に、両図における平坦部も関連があるようにみえる。 $d_m=90 \mu\text{m}$ における火炎速度の測定結果は省略したが、Fig. 10 (a), (b) から推察できるように、粒径が小さくなる程屈曲点はより高濃度側にずれるか、濃度の増加につれ火炎速度が大きくなるかする傾向が明らかで、Fig. 13 の 90 μm の場合の説明がつく。かくし

て、 CO_2 生成率は火炎の長さに依存したものであることは明らかで、火炎は酸化反応の最終状態を示すもの、すなわち反応生成物そのものであることからこれは容易に領ける。

4.4 消炎粒子の観察⁴⁾

火炎が通過した後、燃焼管内壁にはそこで消炎や熔融を起して付着した PE 粒子が認められる。Fig. 14 はこのような粒子の接写写真で、紡錘形（または、流星尾形⁴⁾）の白い部分は消炎粒子の周辺物質が器壁で冷却してできたもの、白い斑点は未燃焼粒子や火炎によって熔融、付着した粒子などとみられる。さらに、Fig. 15 はこのような消炎粒子の光学顕微鏡写真で粒子の燃焼機構を示しているものと思われる。Fig. 15 (a, b) の粒子表面において、一方では表面全体が熔融層で被覆され炭化残渣状のものが部分的にみられるのに対し、他方では部分的な熔融、またはその初期段階らしい変化がみられる。これらは、粒子の燃焼進行の度

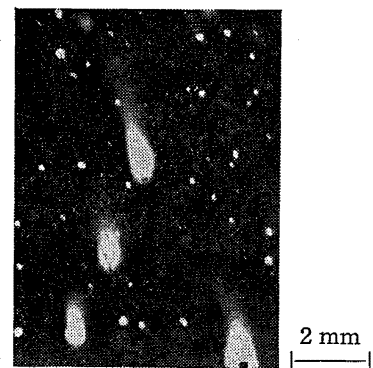


Fig. 14 A microphotograph of particles quenched on the tube wall during combustion

管壁上で消炎した粒子等の接写写真

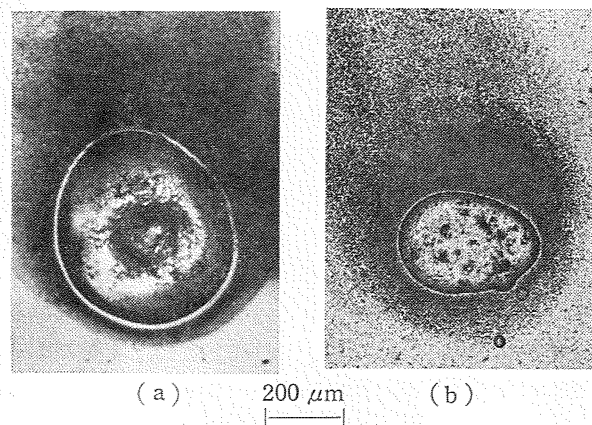
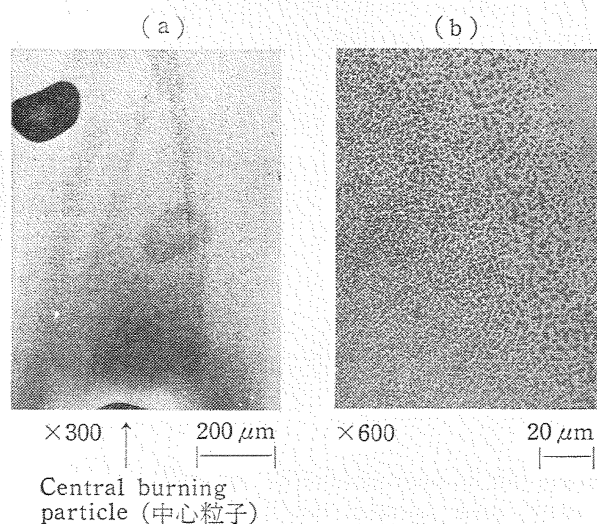


Fig. 15 Photomicrographs of single particle quenched during combustion
消炎粒子の顕微鏡写真, 光頭 $\times 300$



Central burning particle (中心粒子)

Fig. 16 Photomicrographs (a & b) of condensed materials around the burning particle quenched, and (c) of the surface of single particle quenched during combustion
消炎粒子周辺の凝固物質 (a, b) と同粒子表面 (c) の顕微鏡写真

合いの相違によって観察されるものであるが、粒子の加熱速度が大いに関係するだろうと思われる。Fig. 16 は、消炎粒子周辺の凝固物質の顕微鏡写真 (a, b) 及び粒子表面の同写真 (c) を示す。この周辺物質である微粒子は、赤外吸収分析によれば、PE や著しく酸化された PE であると考えられる。しかし、単に燃焼粒子が器壁に激しく衝突して、その粒子溶融層が飛散したと考えるだけでは、消炎粒子に較べた周辺物質の紡錘形の大きさや形状は説明できないように思われる。特に、Fig. 16 (a) では火炎の揺らぎに対応したような微粒子群の濃淡がみられる。これらのことから、火炎内でのパイロリシス (pyrolysis, 熱分解) 反応は一気に起るのではないかと予想される。また、Fig. 16 (c) が溶融初期のものであるとすれば、溶融層内には気泡が含まれることになるであろう。

かくして、個々の粒子が液滴のような古典的方法⁴⁾で燃焼することは十分予想できるが、PE の如き高分子溶融物では蒸気相のようなものを考えるににくいので、火炎中でのパイロリシス反応速度が火炎伝ばの仕方に影響する。

5. 伝ば火炎の光学的観察

5.1 干渉写真

火炎伝ばの様子を視覚化する目的で、ここでは燃焼管中を上方伝ばする粉じん火炎 (上部閉, 下部開放の条件) にマッハ・シェンダー干渉計を適用して伝ばの状況を微視的に観察した結果について述べる。観察にあたって干渉図と併せた伝ばの様子は総て、16ミリカメラによってシネフィルム (白黒 ASA 400 または同カラー) に記録させた。フィルム速度は、撮影条件によって決定されるが、その条件として、①粉じん粒子、②火炎、③干渉縞を同時に記録できることを考慮した。しかし、下限界付近の火炎は著しく薄く明るさに乏しいので、レーザー背光 (バック・グラウンド) を極端に暗くする必要がある。これに対して火炎到達前の沈降粉じん粒子群は、背光に対するシルエットとして見えるので上の要求に反するものである。これは干渉縞についても同じで、明るい背光の方が都合が良い。そこで、これらの要求を満たす明るさを、適当なフィルターを使用して調整したが、背光が赤色の

ため限界火炎の淡い青炎などは大部分打ち消される結果になった。このような観点から、カメラレンズ ($F=1.8$, $f=85\text{ mm}$) はできるだけ明るく、背光はできるだけ暗くして最初に撮影し、その結果を見て次第に最適条件を見い出すようにした。このようにして許容できる最高フィルム速度は 500 コマ/秒であった。以後この一定速度でほとんどを撮影した。

Fig. 17 は平均粒径 $60\text{ }\mu\text{m}$ の場合の下限附近での火炎とそれに伴う干渉図を示す。同図 (A) は限界火炎に近く、同 (B) はそれより僅かに高い濃度でのやや厚い火炎を示す。特に、前者では粒子に独立した青炎が不連続的に形成されて伝ばするのが観察されたが、写真では映っていない。厚い火炎では黄色火炎の底部に多数の青白色の輝点がみられた。一方、**Fig. 18** は同様の火炎伝ばの干渉図を一定時間間隔で配列的に示したものである。この場合には明るい先端を持った大きな均一な拡散火炎が中心で、その外縁の上および側部にかすかに粒子または粒子群に独立した火炎が存在し、これらが次々と発火して中心の全体的な拡散火炎に吸収されて行く様子を示している。中心火炎の外縁で特に明るいことは、この火炎が上向きの典型的な拡散火炎であることを示すが、燃料はいわゆる予熱帯で発火した粒子または粒子群によってやはり上方から与えられるので、この場合の明るい外縁は発火粒子の供給が途切れて観察されたのであろう。なおこの火炎伝ばは、火炎の観察 (4.1) で纏めた火炎特徴 (i) お

よび (ii) の中間的な場合と考えられる。

以上の干渉写真において縞模様の分布は近似的に軸対称になっており、火炎前面のいわゆる予熱帯で密で火炎後方では同心模様状に緩く広がっている。縞模様はまばらな火炎の限界火炎においても、ほぼその形状を維持して上昇して行く。干渉縞の変化は光学的距離 (媒質の屈折率 $\times$ 幾何学的距離) の差に対応したもので、少なくとも予熱帯では単なる温度分布を与えるものと考えられる⁵⁾。これに対して火炎後方では高温の生成ガスが存在するので温度分布を計算するためには、ガス成分やその組成データが必要になる。このような軸対称を仮定できる火炎の干渉縞から温度分布を求める方法は幾つか報告されているが¹⁵⁻¹⁷⁾、ここでは十分な精度の信頼できる結果は得られなかった。これは火炎の形状が厳密には軸対称でないことにもよるが、計算方法にも問題がある¹⁶⁾。

平均粒径が $90\text{ }\mu\text{m}$ 以下の限界火炎が管の途中で消滅した場合、縞模様はある程度そのまま上昇して行く。上昇高温ガスの慣性によって前の影響が持続して観察されるものと思われる。すなわち限界火炎はこのような高温の燃焼生成ガスの浮力効果があって維持されると考えられる。このことは、限界火炎速度を無限小の粒子径に外挿した場合混合ガスの速度に近似できる結果からも推察できる (4.2)。

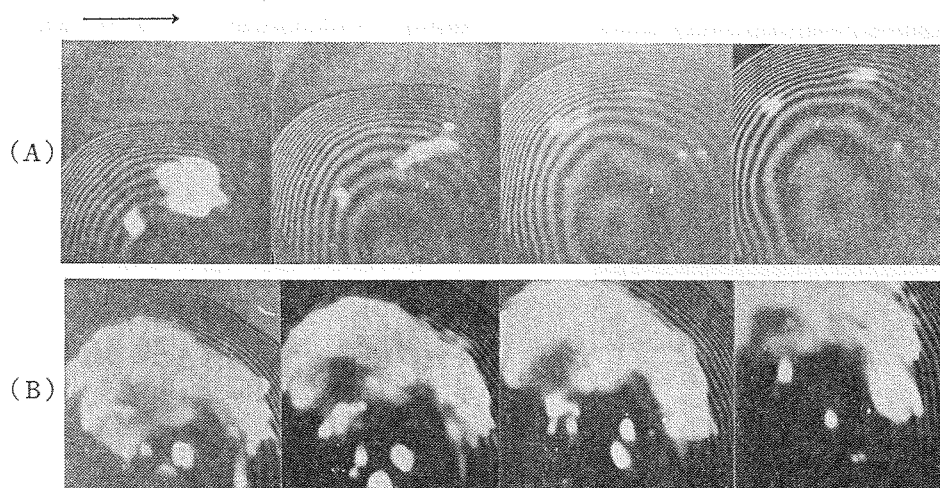


Fig. 17 Interferograms of (A) thin flame, blue in color and (B) thick flame, with yellow front and blue base. Both close to the lower limit $d_m=60\text{ }\mu\text{m}$

限界火炎伝ばの干渉写真 (A) 薄い青色火炎, (B) 黄色前縁および下部青色の火炎

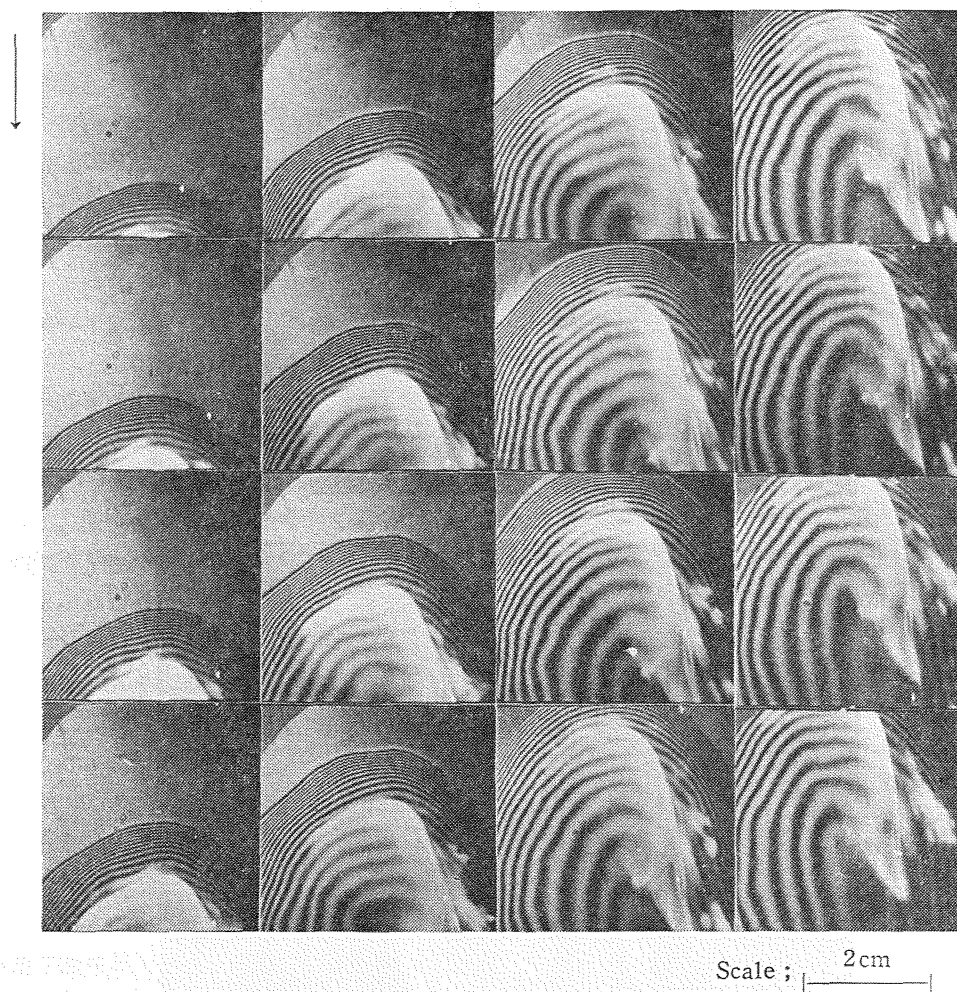


Fig. 18 Interferograms of the propagating dust-flame near the lower limit. Time interval 8ms (From top to bottom and left to right) $d_m = 90 \mu\text{m}$

下限界付近で伝ばする火炎の連続干渉写真，時間間隔 8ms

5.2 シュリーレン写真

シュリーレン写真は干渉写真に対応するものであるが，粒子のパイロリシスや粒子の動きを捕える目的で撮影した。Fig. 19 に上記の場合と同様に撮影して得たシュリーレン写真の一部を示す。ここでは緑色の有色フィルターを使用して背光を減光させたが，火炎の一部はやはり打ち消されている。

Fig. 19 (A) ではほとんど乱れがなく，層流火炎伝ばの様子を示しているが，火炎そのものは不明瞭である。同 (B) では個々の粒子のパイロリシスを示す窪みが火炎内部に多数見える。予熱帯や火炎先端では粒子のパイロリシスはみられない。しかも，一部の粒子はパイロリシスを行ないながら上方へ，すなわち火

炎とともに浮遊して行く。

一方，粒子の動きはフィルム映写によって概略的に知ることができる。ほとんどの場合火炎直前では下方から接近する火炎前面に粒子はそのまま沈降して行く。当然，大きい粒径の粉じんで濃度が高いほどその進入速度は大きくなり，軽い粒子程火炎中で上昇気流に巻き込まれる粒子数は多くなる。また，浮遊粉じんの総ての粒子が火炎中でパイロリシスあるいは燃焼するわけではなく，かなりの量が未燃粒子として沈降して行く。これは炭酸ガス生成率 (Fig. 13) から明らかに，下限界近くでは粉じん濃度が低下するにつれ未燃粒子が次第に増して，ついには火炎伝ばが不可能になる。個々の粒子の軌跡を追跡することは，特に粒子の発火の瞬間が曖昧なので困難であった。

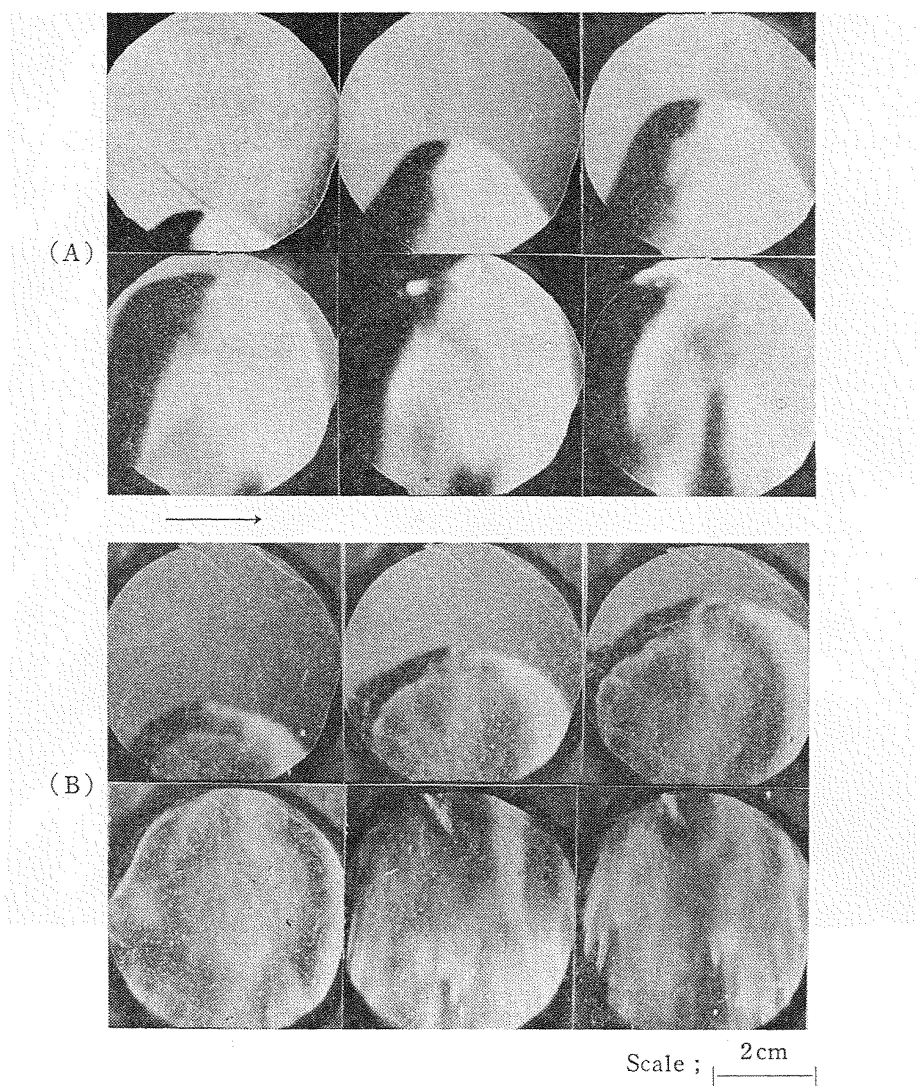


Fig. 19 Schlieren photographs of propagating flames, (A) $d_m = 60 \mu\text{m}$, and (B) $d_m = 180 \mu\text{m}$ (with visible flame front)
 火炎伝ばのシュリーレン写真, (A) $60 \mu\text{m}$, (B) $180 \mu\text{m}$,
 (B)では, 火炎前縁も見える

6. 伝ば機構の考察

火炎の観察および上記の実験結果に基づいて, ポリエチレン浮遊粉じん中における火炎伝ば機構を定性的に次のように解釈することができる。

(i) 青炎の独立火炎による不連続的な火炎伝ば: 平均粒径が十分小さい下限の極近傍で観察されるこの火炎では, 接近する火炎に対する粒子の沈降は小さく, 予熱帯で粒子表面は加熱により熔融および熱酸化¹⁸⁾のあとで急激なパイロリシスを行なう。パイロリシス生成物は周囲の空気と薄い予混合ガスを形成して

局在的に青炎で燃焼すると考えられる。パイロリシス生成ガスは粒子が小さいので粒子間相互に拡散する程十分な量では形成されず, メタンのようなガスが主成分であろう。一方, 不連続的な火炎伝ばが観察される限界火炎では, その火炎速度は混合ガスの限界値から粒径の増加とともに大きくなる範囲にある (Fig. 11)。しかるに平均粒径が増すにつれて, 粒子の沈降速度は大きくなるので高温の上昇ガスの冷却も大きくなる。従って, 限界火炎が達成されるためには下限濃度の増加が必要で, その結果限界火炎速度も粒径とともに増大することになる。このようなことから, 不連続的な火炎の伝ばは高温の燃焼生成ガスの浮力上昇に支えられ

て起るのではないかと考えられる。限界火炎の干渉写真もこれを示すとみられる (Fig. 17 (A))。

(ii) 粒子の独立火炎を含む黄橙色の安定した拡散火炎：平均粒径 $125\ \mu\text{m}$ あたりの限界火炎で観察されると同時に、その限界火炎速度は平均粒径との関係 (Fig. 11) において、一つの変曲点に位置する。これらのことからこの火炎では粒子状の不連続的な火炎伝ばと下記に述べる全体的な拡散火炎伝ばの融合したものと考えられる。すなわち、粉じん粒径および濃度が増すにつれ予熱帯でのパイロリシスは急激に進行し、粒子間でのパイロリシス生成ガスの融合が起り易くなる。これらの燃料ガスは粒子群全体をカバーして上方拡散するので、空気は同時に予熱帯側から与えられる。総ての粒子が同時にパイロリシスを起すわけではないので、上記の火炎内で加熱されて独立的に燃焼する粒子も多数見られる。しかし、粉じん濃度を増すと同時に沈降速度も大きくなるので、予熱帯でのパイロリシスは次第に困難になり火炎内に進入して初めてパイロリシスを起すようになる。この火炎では粒子または粒子群に独立した火炎およびそれらの融合火炎が多くなり、それらの一部は沈降燃焼すると考えられる。

(iii) 先端の全体的な拡散火炎と下部の沈降燃焼粒子火炎から成る長い火炎：この火炎では言うまでもなく粒子の落下速度が大きく影響している。落下速度とともに粒径も大きく、火炎先端に進入してもすぐにはパイロリシスをひき起すことができず、ほとんどはそのまま沈降燃焼する。先端の粒子群に共通した拡散火炎の燃料ガスは、一部の火炎先端に巻き込まれた粒子あるいは沈降粒子の初期のパイロリシスなどによって形成されると考えられる。しかし、燃料ガスの生成は十分でなく同時に上方から進入する粒子群などのため、一般に暗く薄い火炎先端を取る。粉じん濃度が十分増せば火炎温度も当然高くなるので、火炎先端でのパイロリシスも容易で厚い火炎先端が得られると思われる。炭酸ガス生成率 (Fig. 13) は、大きい粒径程粉じん濃度のわずかな増加に対して燃焼率が大きく増すことを示している。限界火炎速度は、これらの比較的長い火炎が観察される粒径に対応してほぼ一定になるが、これは限界火炎がこれらの粒径で粒子群に共通した拡散火炎を形成することを示すことに対応するであろう。一方、約 $180\ \mu\text{m}$ 以上の粒径では下限界は著しく大きくなるが、限界火炎温度はやはり粒子群の進入によってそれ程高くはならないと考えられる。

7. 結 語

浮遊粉じん中における層流火炎伝ばの機構を明らかにする目的で、ポリエチレン粉じん・空気—火炎についてその伝ばを観測し、その結果に基づいて伝ば機構を考察した。また、火炎伝ばの様子を視覚化する目的で配管中を上方伝ばする粉じん火炎に干渉法およびシュリーレン法を適用して映像化した。その結果により火炎伝ば機構を三種類の火炎について考察した。パイロリシス反応が予熱帯、火炎先端のいずれで起るか、パイロリシスが十分なものであるか、あるいは重力による粒子の沈降が大きくパイロリシス反応を行ないながら落下するかなどによって区別される。言い換えればパイロリシス速度と粉じん粒子の沈降が影響する。粉じん濃度が十分高い場合には、粒子群全体のパイロリシス生成ガスの拡散燃焼が重要であろう。

以上のような機構が一般的に可燃性粉じんについて、適用できるものかどうかを明らかにするため、続報ではコルク粉じんについて検討する。しかし、ここで述べた伝ば機構の考察は定性的なものでこれを定量化するためには、機構の数学的モデル化を行ない解析する必要がある。

(謝 辞)

本研究を遂行する上で R. N. Butlin 氏 (元 Fire Research Station, England) より M-Z 干渉計の粉じん火炎への適用について指導を仰いだ。また、田口・前化学研究部長には長期間にわたって激励を戴いた。いずれもここに記して深く感謝致します。

(昭 52.12.13 受理)

文 献

- 1) K. N. Palmer, 'Dust Explosions and Fires'. Chapman & Hall (1973)
- 2) 石浜 渉・榎本兵治, 安全工学 14, 243 (1975)
- 3) 内藤道夫, 安全工学 14, 323 (1975)
- 4) R. N. Butlin, Comb. and Flame 17, 446 (1971)
- 5) M. Marchant, J. A. Cobb and R. N. Butlin, Optics and Laser Technology 3, 136 (1971)
- 6) H. Hannes, Forsch. Ing.-Wes. 29, 169 (1963): cited in W. Hauf & U. Grigull, *lit.* 16)
- 7) 内藤道夫・梅津 実, 安全工学 8, 107 (1969)
- 8) F. J. Weinberg, 'Optics of Flames'. Butter-

- worths (1968)
- 9) ‘粉体物性図説’(粉体工学研究会, 他編), 産業技術センター (1975)
- 10) 石浜 渉・岡田寿徳・吉田儀一, 採鉱と保安, 10, 55 (1964)
- 11) 狩野 武, ‘粉体粒子の挙動—理論と実際—’, 産業技術センター (1976)
- 12) K. C. Brown and R. H. Essenhigh, SMRE Res. Rep. No. 165 (1959)
- 13) R. H. Essenhigh and D. W. Woodhead, SMRE Res. Rep. No. 166 (1959); Comb. and Flame 2, 365 (1958)
- 14) A. Levy, Proc. Roy. Soc. 283, 134 (1965)
- 15) 杉山幸男・他3名, 化学工学 32, 1021 (1968)
- 16) W. Hauf and U. Grigull, in ‘Advances in Heat Transfer No. 6 (ed. J. P. Hartnett et.)’ p. 133 Academic Press (1970)
- 17) R. South and B. M. Hayward, Comb. Sci. Tech. 12, 183 (1976)
- 18) 琴寄 崇, 産安研研究報告 RR-19-4 (1971)

産業安全研究所技術資料

RIIS-TN-77-6

昭和 53 年 3 月 30 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 - 8 4 4 1 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108

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 (I)

——ポリエチレン粉じん火炎——

松田東栄

産業安全研究所報告 RIIS-TN-77-6, 1~18 (1978)

ポリエチレン浮遊粉じん中における層流火炎伝ばの機構に関して実験的研究を行なった。燃焼下限界、火炎速度および燃焼ガス生成物などを最初に測定し、マッハ・ツェンダーク干渉計およびシェーレン法を伝ば火炎に適用してシネ写真観察を試みた。それらの結果に基づいて火炎伝ば機構の変化について考察した。

(図 19, 参 18)

UDC 536.463 : 541.182 : 614.833

Experimental Studies of Laminar Flame Propagation in Dust Suspensions (I)
—Polyethylene Dust-Air Flame—

by T. Matsuda

Technical Note of The Research Institute of Industrial Safety. RIIS TN-77-6
1~18 (1978)

The propagation of laminar flame of polyethylene dust in air has been studied experimentally. Measurements of lower limit of flammability, flame speed and gaseous products after combustion have been made, and a Mach-Zehnder interferometer and Schlieren techniques were then applied to the propagating flame coupled with cine photography. The propagating process is discussed in consideration of particle sizes.

(19 figs., 18 refs.)