

粉体爆発に関する研究

(昭和24年7月9日受理)

正 田 強

(東京大学工学部火薬学教室)

第六報 粉体爆発の初期段階に於ける火焰傳播現象に就て

I 緒 言

Berthelot²³⁾氏は炭素より容易に放出される H_2 , CH_4 , C_2H_2 等のガスは O_2 と混じ爆発的に燃焼し、その速度は 2,000 m/sec. を超える故、炭素が空気中に適当に散乱分布する時は、爆轟状態に至り得ると述べ、又アメリカの坑道試験の結果では、発火後最初の15~30m迄は爆速はごく少く60m辺ではそれが150 m/sec. の早さに達し、最後には900 m/sec. 以上になつたと云う。Taffanel²⁴⁾氏は粉体を連続的に一定流速の空気中で送り出し、火焰の停止する時の流速から爆速を測定し、30%揮発分の炭素に対し10m/sec程度の低い値を得た。又山田²⁵⁾氏はメタン炭素混合物中の火焰傳播を測定したが、炭素の影響に就て明確な結論は得られなかつた。

大規模な試験坑道で実験する時には実際と良く似た条件下で爆発現象を観測するが、併しこの場合粉体を予め均一な浮遊状態に置く事は不可能に近いからどうしても爆発傳播が断片的になる。即ち最初の爆発で生じた圧力波及び爆ガスの流れが、坑道底部に沈降している粉体を浮遊せしめそこで爆発が起つて又先方の粉体を浮遊させると云う断続過程をとる事になる。従て定常爆轟波が成立し難く、測定結果は変動が多いわけである。

そこで、理想的条件下で定常爆轟が生じたと仮定した場合を後に理論的に考察する事とし(第八報)、ここでは爆発の初期に於ける傳播速度を実験的に測定しその特性を探る事とした。

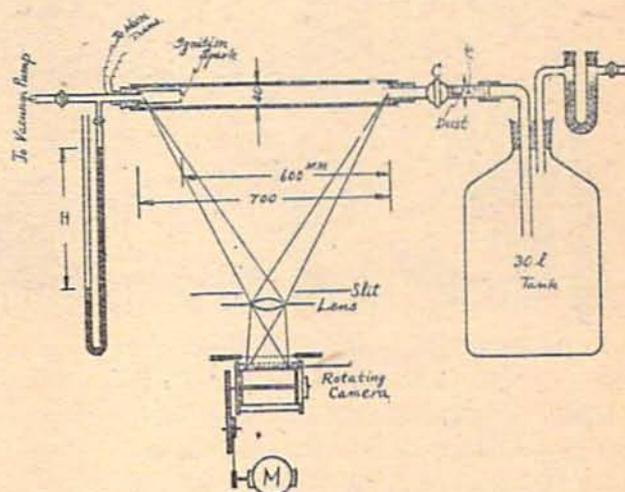
小型実験に於ても粉体分散の不均一性は常に実験値の変動を招くものであるが、種々の予備実験の結果最も安定した粉塵系を与えらると思われる方法を見出したので、この方法により初期の火焰傳播の諸特性を写真撮影により検討した。

II 実験の装置と方法

比較的安定な粉塵を得る方法として山田²⁵⁾教授の着想を借り、図26の如き装置を組立てた。即ち径40mm長さ70cmの水平ガラス管を30~50mmHgに排気

図 26

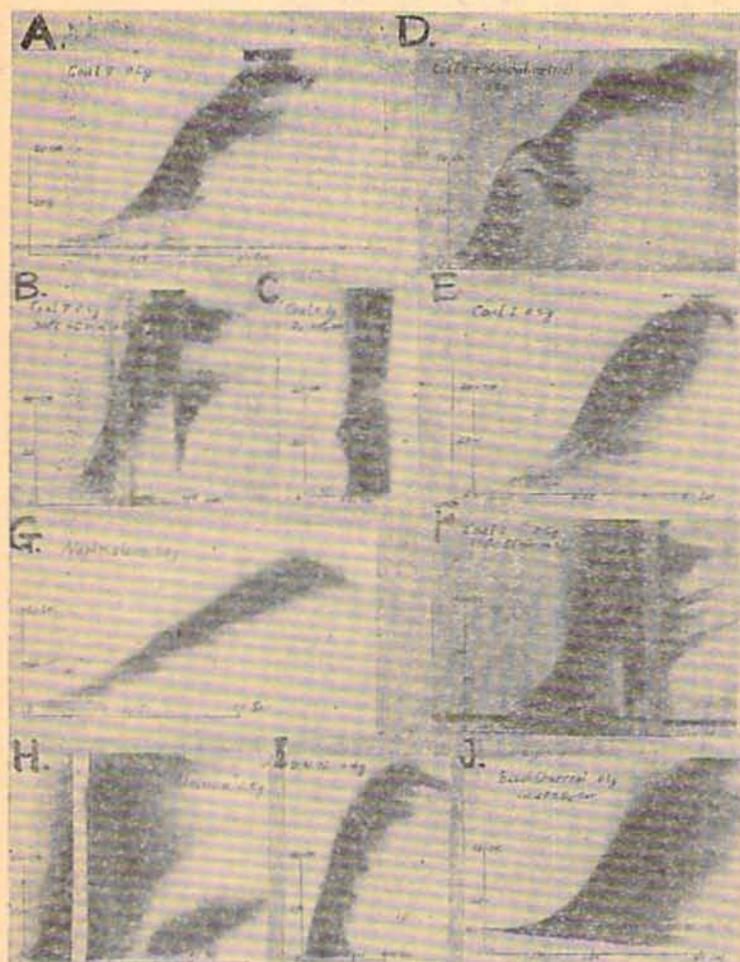
26. 火焰傳播速度測定装置略図



しておき、噴出口と同径の孔を持つコック C を開いて、コックの外側に置いた粉体を一定量の空気と共に急激に管内に引込ませる、それと同時に管の他端より10cmの所にある点火源(交流50Vをネオンランプで150倍に変圧し、鉄電極(径1mm、間隔2mm)間に電気火花を飛ばす)を作用させる。火焰の傳播状況は回転写真に撮影する。

低圧の管内へ空気が突入すると、空気は暫時振動しそれに乗つて粉体も浮遊するから、噴出直後は比較的均一な粉塵系が形成される。併し矢張り粗粒子は素早く沈降して反位に与らぬ部分も生じ、又水平管内の濃度分布が均一とも言えぬ。噴出口に近い部分は稀薄で

図 27 火焰傳播写真眞例



あり、点火源の若干前方が稍濃厚である事が多い。従て同一条件の積りでも測定結果は可成りばらつく。併し粉塵系中の火焰傳播の測定が從來殆ど成功しておらぬ事を想えば、本法による測定は可成り良好な結果を与えるものと云えるし、又一面このばらつきの多い事が粉体爆発の一つの特徴でもあるから、この方法は充分の価値を持つものと考えられる。

III 実験 17. 初期火焰傳播の諸特性

著者は上記方法に従い各種粉塵系中の火焰傳播状況を約300回に及び写真撮影した。その中から火焰傳播の特性を知る為の代表例として、図 27 に数例を掲げた。

各写真には横軸に時間、縦軸に傳播距離の単位を目盛つてある。図 28 には火焰傳播の説明図を描いた。点火源で発生した火焰は右方に進行すると、この時写像は右上方へ動く、この写像の左端を連ねる線は火焰傳播速度を与える。その線上の各点より派生している

線群は燃焼粒子の運動を、又その長さは粒子の燃焼時間を示すものである。

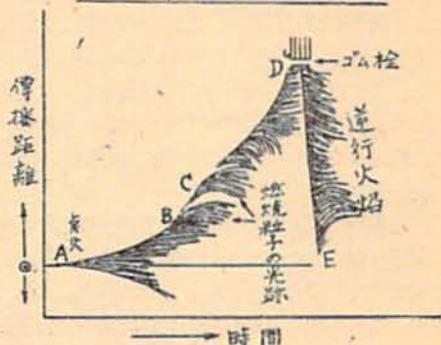
火焰の傳播が常に多少共断続的である事は一つの顕著な特性で、図 28 の BC 点はそれが大きく表れた場合を示している。即ち火焰の前方に突然新しい火焰が発生している様に見える。爆発が進行して開放端に達すると火焰は停止し、燃焼ガスはコックを通つて外部に噴出する(但しこの部分は写真には写っていない)、併し爆発が激しい場合にはゴム栓を吹飛ばして急激に噴出して続いて火焰が激しく管内に逆行する。これを「戻り爆発」と呼ぶ。今これらの燃焼特性を実験結果に基づき更に詳細に考察して見よう。

i) 燃焼時間: ナフタレン、アンストラセン、デトロナフタレン (写真 G, I) 等揮発性粉体の燃焼時間は、アルミニウム、石炭又は木炭 (写真 E, J, H) 等不揮発成分を含む粉体に比し一般に短い、即ち各粒子は早く燃焼を完了する。これは酸素の滲透過程が前者の方がより速に行われる事によると考えられる。

但し火焰の傳播速度は各粒子の燃焼時間とは直接の関係はない様である。

図 28

28. 火焰傳播状況模型図



ii) 火焰面の不連続性：図 27 の写真では明瞭でないものもあるが、仔細に見ると多くは図 29 に示した様な不連続を示す、そしてこの不連続のピッチは一般に揮発性の大きい程、又燃焼熱の大きい程小さくなる様である。この不連続の表れる原因としては、進行して来た火焰より輻射及び傳導の熱を受けた粉体の一

図 29



定層が、可燃性揮発分を放出し、それが酸素と混じて発火燃焼する迄に或る誘導期間を要する為であろうと思われる。従て粉体の「酸化し易さ」は爆発傳播の難易を左右する一因子なる事は明かである。併し一方その酸化は火焰面のエネルギーをうけて生ずるものであるから、燃焼熱量及びその発生速度の大きい粉塵系例へば極めて微細な粉末の場合には充分のエネルギーが蓄積され火焰面のエネルギーは強大となる。すると発火の誘導期間も短縮せられ、反応速度も増大し遂には激しい爆発に至りうる。揮発分の少い粉体例例えばアルミニウム、無煙炭等が激しい粉体爆発を惹起しうる事もこれによつて理解される。写真 J では黒色木炭が酸素に富んだ真空中で容易に発火し、又写真 C では炭塵が点火後直ちに激しい爆発に移つているのを見ても、揮発分燃焼が粉体爆発の本質でない事が分るのである。

iii) 火焰傳播速度の非恒常性；写真 G, H, I, 等の様に火焰が均等に傳播しているのは粉体の浮遊性が良く濃度が均一になつておる事を示すが、一般には

写真 A, D, E 等の様に急激に曲線勾配（傳播速度）が変化することが多い。これは粒子の沈降の濃度が不均一になる事に起因する。火焰が一時停止した後再び傳播を始めるのは、沈降粉体が燃焼ガスによる攪乱を受けて再び浮遊し、活潑な燃焼を開始するからである。この種の断続的な燃焼は炭塵爆発等の場合実際に屢々経験される所である。

燃焼しつつある粒子の運動は最初は常に燃焼の進行方向と同じであるが、先行火焰が発生するとその圧力により後方へ押戻されるのが写真で良く分る。

iv) 戻り爆発：これは写真 B, C, F, H 等に見られる。燃焼が爆発的に進行すると燃焼ガスの圧力によりゴム栓が飛出し、ガスが急激に噴出する結果、管内は減圧となり、燃焼ガスの一部は新しい空気を伴つて再び管内に吸込まれる。最初の燃焼が不完全燃焼に終つている時は、燃焼ガス中には尙可燃成分が残存しており、又更に沈降粉体よりの新しい揮発分放出もあり、逆行気流による粉体の再分散も行われるから、管内は再び爆発性能を持つに至り、火焰が逆行して来る。これが戻り爆発であり、この際は粉体は既に第一次火焰進行によつて予熱を受けているので、揮発分放出も容易であり、反応性も大きくて、第一回の時よりは遙かに傳播の速度が大きい。写真 B より得られる戻り爆発の速度は 85 m/sec に達している。

この小型実験で確認された「戻り爆発」の現象は、実際の炭塵爆発に際しても屢々生ずるものでこゝにも粉体爆発の一特性が見られる。即ち一般に粉体爆発に於ては、完全燃焼比を遙かに上回る粉塵濃度に於て、好適な爆発傳播条件が成立する事は既に実験 14 に於て確認した通りであるから、第一次火焰通過後にも、多量の可燃成分が残存しており、酸素が補給されれば、直ちに新しい第二次の爆発が生じうるわけである。

v) 各種粉塵の火焰傳播状況測定結果要約：炭塵を除く各種粉体の火焰傳播を約 130 回に亘り測定した結果を要約して表 13 に示した。

本測定により粉体爆発の初期傳播速度、粒子燃焼時間等に就ての大略の概念を得る事が出来た。一般的の結論に就ては実験 18 の後半で述べる。

表 13 各種粉塵の火焰傳播速度

(実験温度 20~24°C : 試料 0.1g は平均濃度に換算すると 110 g/m³ に当る)

No.	粉 体	粒 度 # 及び 浮遊性 (n × k)	測定 回数	火焰傳播速度測定結果摘要 (粉体量 mg, 傳播速度 V m/sec, 点火直後の緩燃期間 τ sec, 各粒子の大体の燃焼時間 Lsec.)
1	褐色木炭	<300 # 6.8	35	0.2~0.4g では濃度低く燃焼中断, 0.5g 最適, 1.0g 以上では波面の凹凸激しく, 傳播は大いに不規則となる。濃度による傳播速度の差は少, 平均して V=6 m/s 程度, 最大は 11 m/s, τ は小, L は 0.03~0.06 sec

2	ヂニトロ ナフタレン	<200 # 3.8	12	浮遊性少く中断する事多し, 0.3g 以下では $V=6$ m/s 程度で中断: 0.4g 以上では爆燃し 20~37 m/s になる。 τ は極めて小, L は 0.02~0.05 sec.
3	ナフタレン	<200 # 浮遊性極小	15	浮遊性少く 0.3g 以下は中断, 量多ければ良く傳播す。0.5g で $V=7$, 2.0g で 10 m/s 程度, 但し波面は振動多し, τ は小, L は 0.02~0.04 sec.
4	木粉	<200 # 3.7	18	0.2g 以下難燃, 0.3~0.6g が良好, $V=10\sim 15$ m/s, 2g では 6~8 m/s になる, τ は小で約 0.03 sec, L は 0.04~0.1 sec.
5	アンスラセン	<200 # 1.8	17	0.1~1.0g で同様の傳播状況を示し, 平均して $V=7\sim 9$ m/s, 最高 18 m/s, τ は小 0.01 sec. L も又小さく 0.02~0.03 sec.
6	アルミニウム	<200 # 6.9	15	0.2g 以下中断, 0.3g 活潑, 0.5g 爆燃, 0.4~0.5g で 25~40 m/s に達す, 浮遊状況不良なれば 7~10 m/s, 光輝強く, 波面の不連続性は不明, 一般に初期は緩慢で, L は稍長い; 0.05~0.1 sec.
7	黒色木炭	<200 # 9.8	6	空気中では全く傳播せず, O_2 30% 空気中でも不爆, O_2 45% 空気中では 13~15 m/s で完全に傳播; τ は稍長く, L は 0.05~0.08 sec. で稍長い。
8	澱粉	<300 # 15.3	5	0.3~0.7g で同様に良く燃え V は 10~13 m/s 程度
9	小麦粉	<200 # 0.8	6	0.3~0.5g で良く燃え $V=8\sim 10$ m/s を示すが澱粉に比し浮遊性著しく悪く燃焼の中断多し。
10	無水フタル酸	<200 # 1.4	5	0.2~0.5g で良く燃焼し $V=13\sim 16$ m/sec.

実験 18 炭塵の火焰傳播速度と熱処理及び添加物の影響

実験 17 と同様として 4 種の炭塵につき約 90 回の測定を行つた結果を要約したのが表 14 である。

表 14 炭塵の火焰傳播速度 (実験温度 21~25°C)

種類	灰分 % 揮発分 %	粒度	測定 回数	摘 要 (V : 傳播速度; L : 粒子燃焼時間)
炭塵 C _I	ash 16.5% V.M. 39.1%	<200 #	25	一般に初期は緩慢で 0.03~0.08 sec, 後次第に速度を増す。0.4~0.8g が最適濃度で V は平均 6~7 m/s 程度
		<300 #	10	0.5g 附近が最適濃度で均等に傳播し 10~15 m/s の V を示す。 L は概して長く 0.1~0.2 sec.
		<200 #	18	空気中の酸素含量の影響 空気 (O_2 20%) 中では $V=6$ m/s 程度であり, 中断する事多し O_2 23% 気中では $V=10$ m/s となり, 最後迄傳播する O_2 30% 気中では $V=20\sim 25$ m/s に達し V が増加する O_2 40% 気中では V は 14~48~100 m/s に達す。 L も短くなる
炭塵 C _{II}	ash 8.7% V.M. 18.8%	<300 #	6	空気中では燃焼せず O_2 24% 空気中では平均 5 m/sec. で傳播 O_2 30% 空気中では最高 18 m/s に達し良く燃焼する
炭塵 C _{IV}	ash 7.3% V.M. 35.9%	<300 #	12	空気中では弱い火焰が傳播する $V=3\sim 6$ m/s O_2 23% の空気中では平均 10 m/s に増加される O_2 38% の空気中では 23 m/s に達する
炭塵 C _V	ash 8.7% V.M. 40.1%	<200 #	18	浮遊性良く空気中で良く燃焼する, 0.5~0.7g 最適, 最初は 1 m/s で次第に早くなり 15~20 m/s に達する。最高 33 m/s; O_2 23% 空気中では初期緩慢過程が短縮される O_2 40% 空気中では 50~100 m/s に達し, 激しく爆発する (写真 C)

炭塵を窒素気流中で加熱処理すると水分、炭酸ガスが放出され、表面が清浄となり、酸素吸着性を増す事は既に実験 10 で確めた所である。この様な熱処理が燃焼の傳播に対し如何なる影響を与えるかは興味深い

問題である。著者は炭塵 Cv を種々の温度及び時間で熱処理した試料につき火焰傳播を写真撮影した。その結果を表 15 に要約して示す (図 27 写真参照)

表 15 炭塵熱処理の火焰傳播速度に対する影響
a) (炭塵 Cv 0.5g <200#, 実験温度 20~24°C)

窒素気流中熱処理温度及時間	処理による減量-%	摘	要
1 釜 (デシケーター) 乾燥	1.4	火焰速度は漸進的に増加し最高 15 m/s (写真 A)	
2 考 (眞空 P ₂ O ₅ 乾燥)	1.8	速度は稍大きく 20 m/s 程度となる。最高 33 m/s	
3 110°C, 2 hrs	2.5	(2)と同じ, 平均 20 m/s 程度, 最高 30 m/s	
4 130°C, 50 min	2.1	燃焼均齊で平均 8 m/s 程度, 最高 15 m/s	
5 250°C, 50 min	2.9	(4)と殆ど同じ, 最高 22 m/s	
6 250°C, 2 hrs	4.7	最初 7 m/s で, 0.02 sec 後 50 m/s に急上昇す	
7 300°C, 50 min	4.9	最初 55~50 m/s に漸増後爆燃し戻り爆発を生ず (写真 B)	
8 350°C, 50 min	12.5	最初 5 m/s で 0.1 sec 後 20 m/s に上昇す	
9 400°C, 10 min	7.5	最初は緩慢, 後に 30 m/s に上昇す	
10 400°C, 25 min	13.6	9 m/s 前後で均齊に燃焼す	
11 400°C, 35 min	18.4	火焰傳播せず, 25% O ₂ 空気中では 4→7→11 m/s で傳播す	
12 400°C, 50 min	25.0	O ₂ 38% 空気中で 4→7→15 m/s で傳播す。	

次に炭塵 Ci に就ての結果を b) 表に示す。

b) (試料炭塵 Ci, <300#, 0.5g 実験温度 20~24°C)

窒素気流中熱処理温度及時間	処理による減量-%	摘	要
1 室内放置試料	0	平均 11 m/s で均齊に燃焼 (3回), 15 m/s に急上昇した事 1 回	
2 P ₂ O ₅ 乾燥試料	1.0	最初 7 m/s の時期を経て最高 18 m/s に達す (写真 E)	
3 130°C, 50 min	2.4	10 m/s を経て 50 m/s に急昇り爆燃, 戻り爆発を生ず (写真 F)	
4 250°C, 50 "	3.4	最高 20 m/s にて活潑に燃焼す	
5 300°C, 50 "	3.7	最高 15 m/s にて均齊に良く燃焼す	
6 350°C, 50 "	6.7	最高 24 m/s に達し, 爆燃す	
7 400°C, 50 "	16.5	全く燃焼せず	

次に添加物の影響であるが、前章実験 15 に於て KI, NaCl 等が炭塵の爆発を著しく抑制する事を見たので、炭塵 Cv にこれらを 5% 宛混合して、その燃焼傳播に対する影響を調べた。併しその成績はばらつきが多く判定が困難であつたので、実験方法を変え、混合割合を何%に増すと燃焼が傳播しなくなるかを各種添加物に就て調べた。その結果を表 16 に要約して示す。

きが多く判定が困難であつたので、実験方法を変え、混合割合を何%に増すと燃焼が傳播しなくなるかを各種添加物に就て調べた。その結果を表 16 に要約して示す。

表 16 炭塵の火焰傳播に対する添加物の影響

[試料: (炭塵 Cv+ 添加物) <200#, 0.5g, 実験温度 22~25°C]

表には傳播速度 m/sec 及傳播し得た距離 D (全長に対する%) 及び () 内に測定回数を示す

添加物	混合%	10 %	20 %	30 %	50 %
1 海 藻		3.9 m/s で D=60 (4)	傳播せず (3)	-	-
2 錫 粉		7 m/s で D=100 (2)	~2 m/s で D=40 (2)	傳播せず (2) 20%と同様 (1)	傳播せず (1)
3 白 堊		3 m/s で D=50 (2)	~3 m/s で D=50 (1)	傳播せず (1) 2 m/s で D=20 (2)	傳播せず (1)

4	滑石	9 m/s で D=100(1) ~3 m/s で D=50(2)	~3 m/s で D=50(3)	傳播せず (3)	-
5	酸性白土	2~3 m/s で D=40(2)	殆ど傳播せず (3) 3 m/s で D=40 (1)	傳播せず (3)	-
6	醋酸アルミニウム	1~2 m/s で D=50(2)	傳播せず (2)	-	-
7	醋酸鉛	~6 m/s で D=100(1)	3 m/s で D=50 (1)	-	-
8	銅粉	2~5 m/s で D=80(2)	6 m/s で D=100 (1)	6m/s で D=100(1)	5m/s で D=100(1)
9	酸化鉄	時には燃焼を促進し時には抑制し影響不同 (15)			
10	コードカリ, 食塩	5%では影響不明, 10%混合すると殆ど傳播せず (8)			

以上表 13~16 に要約した火焰傳播速度測定結果より得られた二、三の知見を列記し、簡単な考察を加えよう。

i) 粉塵系に於る火焰傳播速度の測定は、一般に粉塵の浮遊安定性が悪い為ばらつきが多く、定量的な測定は困難である。供し従来粉体爆発初期火焰傳播に就ての知見が殆ど得られておらぬ事を想えば、この実験は、たとえ定性的であるとは言え、粉体爆発研究に対し重要な資料となり得るであろう。

ii) 粉体爆発の初期過程は多くの場合緩慢な燃焼反応であり、その傳播速度は高々、10 m/sec 程度、最適濃度は 200~500 g/m³ 程度である。

iii) 供し、浮遊性が良く、濃度が適当で、反応速度の大きい場合には、反応は急速に加速され、数 10cm、の距離に於て既に数 10 m/sec の速度を示し、爆燃状態に達し得る。本実験で得られた最高速度としては、例えば、アルミニウム 0.4 g の時の 40 m/sec 又は炭素 C_v 及び C_i を窒素気流中で熱処理したもの 0.5 g の時の 50 m/sec 等であり、更に空気中の酸素量を 40% に増すと炭素 C_v 及び C_i は 100 m/sec にも達する速度を示した。

iv) 揮発分の少い無燐炭 (C_{ii}) 又は黒色木炭の様な粉体でも、酸素量の多い気中では活潑に火焰が傳播する。これらは炭化度の低い石炭又は木炭より燃焼熱は多いから、一旦発火中心が形成されれば、其後の傳播は容易になる潜在能力を持つている。

v) 浮遊性の悪い粉体は傳播が中断される事が多い。又 200# 以下の微粒子を除いた粉体は殆ど火焰傳播を示さぬ事は、粉体爆発に於ては微粒子の存在が重要な因子である事を示している。

vi) 窒素気流中で熱処理された炭素は実験 10 で予想された如く、反応性が增大し、火焰傳播は著しく促進される。加熱処理による減量が 10% に達しても尙激しく爆発しうる事実は、炭素の揮発分のみが爆発傳播に万能の役割を果しているものでない事を明示して

いる。これは初期に揮散する揮発分は主として、H₂O 及び CO₂ である事、これらは寧ろ燃焼の阻害に役立つていた事、又熱処理により炭素表面の酸素吸着性が増し、反応性を増大した事、等により説明する事が出来る。

供し 400°C 以上で加熱すると可燃性揮発分迄も揮散する為、次第に燃焼の傳播は困難となつて行く。

vii) 炭素に異種粉体を混合した時の火焰傳播性能に対する影響は本実験では余り明瞭な結果が得られなかつた。これには、添加物の帯電性能に依る浮遊性が種々変化を受ける為であると思われる。

併し、コードカリ、食塩、海藻、醋酸アルミ、或は酸性白土等は炭素爆発を阻止する能力を持つ事は明らかであり、銅粉は火焰傳播を助長する事が確認される。

V 成 果

i) 粉体爆発の初期に於ける火焰傳播現象を把握する為、真空中に粉塵を吸引して比較的安定な粉塵雲を作り、その中の火焰傳播を回転写真に撮影した。本測定により従来不明でつた火焰傳播の諸特性を明かにする事が出来た。

ii) 粉体爆発に於ける火焰面の不連続性、不安定性(非恒常性)、及び戻り爆発の現象等に就て、又粒子燃焼時間の概略の数値に就て、種々有用な知見を得る事が出来た。

iii) 特に、炭素について詳細に実験し、各種炭素の火焰傳播性の差異、空気中の酸素含有量の影響、窒素気流中の熱処理の効果、及び各種添加物の効果等についての知見を新たに示す事が出来た。

iv) 一般には粉体爆発の初期に於ては、その火焰傳播の速度は緩慢であり、10 m/sec 或いはそれ以下の事が多く、濃度は 100~500 g/m³ 程度が適当であるが、浮遊状況及び反応性が良い場合には数 10 cm の距離に於て既に数 10 m/sec 或いは 100 m/sec の程度にも達し得る事が確認された。

第七報 シュリーレン写真に依る火焰傳播状況の観察

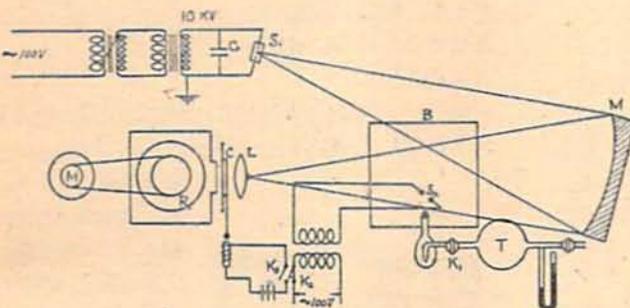
前報では回転写真により火焰傳播を撮影したが、回転写真では火焰の形状、及び運動は分らないので、本報ではシュリーレン法を用いて瞬間写真を撮影し、焰面の構造及びその運動を研究した。

I 実験の装置と方法

図 30 に実験装置の概要を示した。即ち S_2 は照明用火電極（陶器で挟んだアルミ板、間隔 1 cm）に

図 30

30. シュリーレン写真撮影装置略図。



交流 10 KV の電圧をかけ電極を並列に 0.02 μ F の蓄電器を置き 1/100 sec 間隔の電気火花を飛ばす。この時に出る強い光は 40 cm 径の金属表面鏡 M で反射されてレンズ L の中心に像を結ぶ。この像をレンズの前に置いた金属片で遮蔽しておく。反射光の通路中に置いた爆発箱 B の中で粉体爆発（燃焼）が生ずると光は屈折して L を通り回転カメラの R フィルム上に像を結ぶ。B は約 1 m³ の容積を持つ大きい木箱で、光の通路の下部に粉体噴出口を置き、その上方に点火火花用電極 S_2 を置く。点火源としては交流 100 V をネオトランスにて 15 KV に変圧し、2 mm 間隔の鉄電極間に飛ばす電気火花を用い、その作動は一次回路の電鍵 K_2 による。粉体の噴出はガラス器中に入れた一定量の粉体を、ガスタンク T に入れた一定圧の O_2 又は N_2 で急激に吹出させる。カメラの前にシャッター C を置きその開閉は電鍵 K_1 で作動する電磁石により行ふ、フィルムが一回転する前に閉ぢる様にシャッターを調節しておく。結局撮影の順序は次の様になる。先づカメラを一定速度（ストロボスコープによる）に調節して回転させ、照明火花を飛ばすと同時にコッ

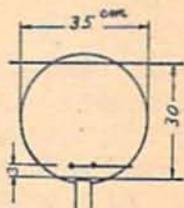
* 最初シュリーレン法により粉体爆発衝撃波の生成を測定する予定であったが、実験室的に粉塵の爆轟状態を作る事が出来ず、これは止むなく断念した。

II 実験 19 粉塵爆発初期過程のシュリーレン像

(A) 粉体 0.5 g を管に入れ圧力 18 cmHg の N_2 又は O_2 (3 l) で吹出し、吹出口より 3 cm 上に置いた点火源で点火した場合

図 31 は (a) ナフタレンを N_2 で吹き上げた時の経過を示す一例である。

(1) は燃焼の初期で点火源に接して火焰が発生し始め、それが約 7 m/sec の速度で上方に拡大して行く。(4, 5) は燃焼の後期を示したもので、下方より上昇して来る粉体濃度が少なくなり、遂に火焰が切れ



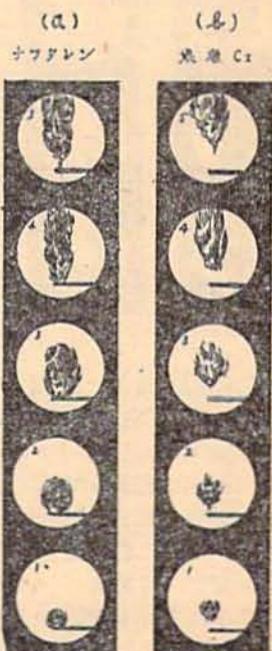
て行くのが見える。

O_2 で吹出すと、燃焼が激しく光が強いので、シュリーレン像は消され、一様な黒い火焰像が撮影されるのみである。

N_2 で吹出すと反応は外部 O_2 の補給を得て始めて生ずるから、(1) の様に初期には粉塵系の外包面にのみ燃焼が生じており、焰面も滑かである。

図 31 (b) は炭塵 C_1 を O_2 で吹出した時の状況を示す例である。 C_1 は浮遊性が悪く比較的燃え難いので

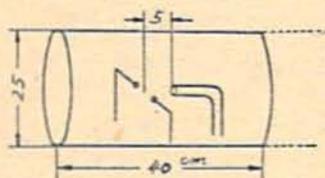
図 31



N_2 で吹出すと殆ど火焰が傳播しない。(1)は燃焼の初期、(4)、(5)は後期を示している。ナフタレンの場合と良く似ているが、只一つ注意すべき相異点がある。それは火焰が点火源より若干離れて発生している事である。この事は、炭塵の揮発分の分解燃焼がナフタレンの蒸発燃焼に比して稍長い誘導期間を要する事を示している。

(B) 粉体を水平方向に吹出し、5 cm 前方の点火源で点火した場合:

この場合実験した凡ての粉体について共通な事は、火焰が常に上方に向つて傳播する現象を示す事である。



これは燃焼ガスが上向きを持つ事と、燃焼粒子がその表面に生ずる拡散層の浮力の為の上向きを持つ事によつて説明される。粉体内、粗な粒子は一般に下方に向うが火焰は粗粒子群を迫らず、燃焼ガスに吹かれて上昇する微粒子群を迫つて進むものと考えられる。

図 32 (a) はデトロナフタレンを O_2 で吹出した

図 32

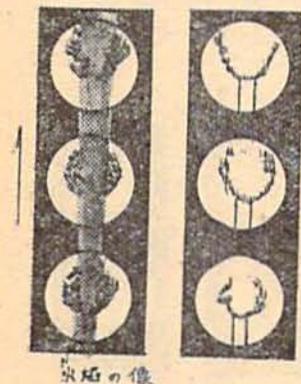
D.N.N. 粉塵の燃焼

(a)

(b)

O_2 ガスで吹出しの時

N_2 ガスで吹出しの時



火焰の像

時の列で、又同図 (b) は N_2 で吹出した場合で、前者とはそのシュリーレン像は太分異つている。即ち O_2 の場合には焰面の皺が多いが、 N_2 で吹出した時は境界部に僅かに現われるのみである。この現象は他の燃え易い粉体例えば褐色木炭又はアルミニウムに就ても明瞭に看取された。併し炭塵 C_i

又は黒色木炭等では O_2 で吹出した場合に、丁度デトロナフタレンを N_2 で吹出した時と同様に境界部に皺の少ない焰の像を示した。 O_2 に富む空気中では粉体の反応が激しく、粉塵系の内部も良く反応を生じ、燃焼ガスの膨脹も急激で、火焰面には多くの皺が現れるが、 N_2 で吹出すと粉塵系内部の反応は緩慢で中心部は光に不透明となる結果、シュリーレン像が境界部のみ比較的少ない皺即ち燃焼ガスと外気との境界に生ずる疎密部が現れるものと推定し得る。

気体爆発反応に於ても同様の現象がある事は、湯本³⁷⁾氏の実験によつて明かである。氏は $(CO-O_2-N_2)$ 系の爆発に於て H_2 が混合されるとそのシュリーレン像に皺が著しく増す事を見、特にそれは $(CO-O_2-H_2)$ 系の時に著しい事を確めた。そしてこの皺の原因を水蒸気の凝結によるものとした。著者の実験した粉体爆発の場合にも皺が水蒸気の凝結によるものと見られぬ事もないが、それが余りに火焰に接近している事から考へて、單に燃焼ガスの流れと見做す事とする。

(C) 金網の影響:

点火源を噴出口から 14 cm 離し、その上 2 cm の所に 0.5 mm 目の銅網を置くと、粉体の一部は網を抜けて上方に出るが他の大部分は網の下方で拡がり散乱する。火焰はこの部分を縫つて抜かり、網の上方へは全く出ない。

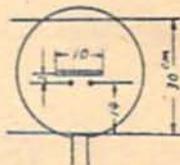
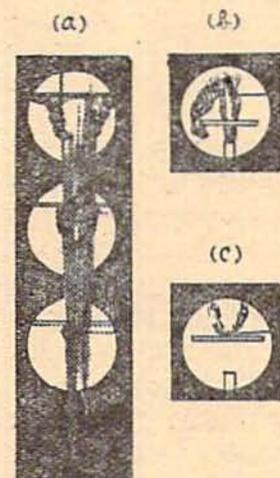


図 33 (a) は褐色木炭を O_2 で吹出した時の例で下方より連続した線條となつて走つているのは明るい光

図 33

を出す火焰であり、特に興味深いのは火焰が 8 cm 近く離れた所で約 1/100 sec を置いて 2 つ発生している事である。これは既に実験 15 図 23 で見た現象を又一つの角度から眺めたものである。即ち発火中心は粉体濃度の適当な箇所形成されるもので、粉体爆発の不均一性を示す好箇の資料である。



尚金網を点火源より下方に置いた場合、0.5~1.0 mm 目の網では粉塵の通過が阻止され、点火源附近は限界濃度に達しないから、燃焼は全く起らない。併し 5 mm 目の銅網を 4 枚重ねて置いた場合は火焰は自由にこの網を通過し噴出口に逆進行する。この場合金網に塩化カリウムを塗布しても何の消滅効果も見られなかつた。図 33 (b) は褐色木炭を O_2 で吹上げた時の例である。焰が 2 本に分れているが外側のは金網の側方から上昇して来た粉塵への傳播を示している。

併し密な目の金網は、気体燃焼の場合同様、火焰の傳播を阻止する。図 33 (c) は 0.5 mm 目銅網の直上 5 mm の所に点火源を置き、下方より褐色木炭を吹上

げた時の燃焼状況を示す一例である。即ち網の上方には火焰が発生し得るが粉塵濃度の大きい下方へは火焰は全く傳播しない。

III 成 果

i) 粉体爆発初期過程のシュリーレン写真を撮影し、前章で得た火焰傳播に関する知見を補足した。

ii) 粉体爆発の初期過程は緩慢な燃焼反応であり、その傳播速度も 10 m/sec 程度の値を示すに過ぎず、従つて衝撃波の発生を観測する事は出来なかつた。

iii) 易揮発性のナフタレンには発火の遅れは殆どないが、炭塵では明瞭な遅れが見られた。粉体爆発の第一歩は通常揮発分の蒸発燃焼によつて開始される事を証明するものである。

iv) 燃焼粒子は上向性を持ち、火焰は上方に拡大し易い傾向がある。併し粉塵系が不均一な分布を持つ時は適當濃度の部分を縫つて火焰は不規則な運動を行う。

v) 密な目の金網は気体燃焼の場合と同様、火焰の傳播を阻止する事が出来る。

vi) 燃焼が活潑な時には、燃焼ガスのシュリーレン像に皺が多く、緩慢な場合には皺が少い。反応速度の大きい時は燃焼ガスの膨脹が激しく、不均一になる為と思われる。

(本研究は文部省科学研究費及び東大第一工学部総合研究費の援助を受けて行われたことを附記して感謝すると共にシュリーレン写真撮影に対する岡島助教授の御指導に対し厚く御礼申上げる)

文 献

- 33) Berthelot: Compt. rend. **93**, 518 (1883) viz. Steinbrecher: "Wesen, Ursachen und Verhütung der Kohlenstaubexplosionen und Kohlenstaub-abbrände" (1931) S. 59
 34) Steinbrecher: loc. cit. S. 59
 35) J. Taffanel: Comittée central des Houillères de France, Brochure 1117 (1911)
 36) 山田 穰: 九大工叢報 **13**, 391 (昭13)
 37) 湯本武比古: 理研叢報 **7**, 957 (昭 3)

Studies On Dust Explosion (VI and VII)

By T. Hikita

Rate of flame propagation in dust clouds which are suspending after drawn into a horizontal vacuum tube with air, was measured by the rotating camera.

Various valuable characteristics of dust explosion in its initial stage, for instance, the discontinuity and fluctuation in flame front, the movement of burning particles and time of combustion, and moreover the phenomena of "Return-explosion" were elucidated.

Generally the initial speed of flame propagation is slow (about 10 m/s) and the most favorable concentration is in range of 200~500 g/m³, but under the better condition of dispersion and reaction, we see the flame speed ascend to about 100 m/sec. even at the several decimeter distance. The speed of return-explosion is generally much quicker perhaps owing to the pre-activation by the first one.

When the heat-treatment of coal dusts in nitrogen, e. g. 250°C, 2 hrs.; or 350°C, 50 min., is performed, it loses the volatile matter mainly consisting of CO₂ and H₂O, thereby its inflammability is improved as formerly predicted.

Schlieren photographs of dust explosion were also taken and the structure of hot gas front was elucidated, but we failed to establish the detonation state of dust explosion in our laboratory. (Lab. of Explosives, University of Tokyo)