Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-88, 1988 UDC 621.6.04:662.5

# 密閉容器中における粉じん爆発に及ぼす乱れの効果

# 松田東栄\*

Influence of Turbulence on Dust Explosion in a Closed Vessel

by T. Matsuda\*

Abstract; In recent years there has been a tendency to use new kinds of combustible dusts as materials in higher advancement of technology, without full investigation of their explosion hazard properties. Testing of dust explosibility is needed for safety in processing plants of combustible dusts. Turbulent flow motion is often inherent in a dust-air mixture in closed explosion testing bombs. The explosion data are imfluenced with turbulence intensity.

Experiments have been carried out to assess the influence of turbulence on the explosion pressures and maximum rate of pressure rises in a 419-*l* closed near-spherical vessel. Dust was dispersed through two perforated semi-circular tubes with air blast. The tubes were connected to dust chamber then via a solenoid valve to an 888-*l* compressed air reservoir charged to 10 bar. Cornstarch and two other chemical dusts were used as the fuels. Ignition source was a chemical ignitor whose energy was easimated to be about 5kJ. After placing the dust in the chamber, the outlet tube of the dust chamber was sealed with a 0.05mm Al-foil and then the vessel was evacuated to the pressure corresponding to the air discharge time. The air discharge brings the pressure back to the 0-bar(gauge) in the explosion vessel.

The variables in forming dust clouds and ignition are the air discharge time for dust dispersion and the delay time to ignition from closing the discharge valve. The time delay between discharge and ignition controls the turbulence level at the time of ignition. Figs. 3 and 4 show the optical transmission traces with pressure-time curves, illustrating a relatively good uniformity after a short dispersion pulse. Fig. 5 shows the variation of the maximum rate of pressure rise with the time delay between discharge and ignition for comstarch-air mixtures. The influence of turbulence intensity is found in that the maximum rate of pressure rise decreases sharply with rapid decay of dispersion turbulence. However, the decay of the explosion pressure with increasing time delay is much slower for the dust concentrations between  $500 \sim 600 \text{ g/m}^3$  (Fig. 6), indicating good distribution of the dust for the shorter time delay.

To assess the relative hazards of a dust-air mixture,  $K_{st}$  value has been accepted in various countries. The  $K_{st}$  value is the maximum rate of pressure rise scaled with test volume. The standard method to determine  $K_{st}$  values in a 1-m<sup>3</sup> has been established in ISO-6184<sup>2</sup>). To have the same  $K_{st}$  values as those with the ISO, a time delay of 70ms is needed in our vessel with the ignitor currently used. Further experiments with some other dusts were continued to match the results for the standard, on search of turbulence level of the mixtures. The present data are compared in Table 2 with those reported by others, showing a fairly good agreement of the  $K_{st}$  between them irrespective of their different detailed structures of turbulence.

\* 化学研究部 Chemical Safety Research Division

-73-

## 產業安全研究所研究報告 RIIS-RR-88

These data for the cornstarch dust from the present experiments are also compared with those of others (Figs. 9 and 10), although the particle properties of the each cornstarch would be greately different. The present data for the explosion pressures show quite good agreement with those of Bond et al<sup>3</sup> in 333-*l* sphere vessel, but the K<sub>st</sub> value is the highest for the present data among the values from different investigators. The comparison suggests that the K<sub>st</sub> value does reflect turbulence level of the mixture even in transient flow when the dust is in full dispersion. Although it will be possible to produce reproducible K<sub>st</sub> values for a given dust in different methods, it is not clear whether the turbulence level in determining the K<sub>st</sub> value of the mixture is pertinent to evaluate the explosion hazard of combustible dusts for industry.

Keywords: Dust explosion, Turbulence, Explosion pressure, K<sub>st</sub> value, Cornstarch

#### 1. まえがき

粉じん爆発の危険性は,可燃性粉じんを扱う数多く の工程に存在し,条件次第では,ガス爆発同様または それ以上の災害を引き起こすことがある。しかも,科 学技術の進歩の早い今日では,粉体工学の発展に伴っ て素材材料としての粉じんの利用が急速に増加してお り,産業工程におけるその爆発・火災の潜在的危険性 は次第に大きくなる傾向にある。

このような粉じんの爆発・火災の潜在危険性を知る 上で、粉じん物質の爆発危険性を評価することは重要 で、安全対策上基本的なことである。粉じんの爆発危 険性を評価するためには,粉じん雲を形成して爆発特 性値を測定する方法が最も信頼できる手法の一つと思 われる。ところが,粉じんでは可燃性ガス・空気混合 気のような均一な爆発性混合気を形成することが頗る 困難で、浮遊粉じんとして空気中に存在する不均一な **固・気混合気が測定の対象となる。しかも、粉じんの** 有効な分散を達成する上で空気圧の利用は避け難く, それに伴う粉じん雲の乱れは、これまた必然的なもの と考えられる。特に、凝集微粉じんに対してはこの方 法は有効である。かくして、粉じん物質固有の危険性 を評価することを目的としても,密閉容器中における 爆発特性の測定においては混合気の乱れを分離して実 施することは通常困難である。

乱れは可燃性混合気の爆発特性に大きな影響を与え ることは、一般的に知られているが、粉じん爆発危険 特性値との詳細な関係はまだ十分研究されていない <sup>3~6)</sup>。なお、この場合の乱れは、前述のように爆発容器 内で粉じんの分散用空気圧によって引き起こされる粉 じん雲のなんらかの流動をさすものとする。それ故、 分散の形態によってまちまちな乱れが形成される可能 性があり、乱れはそれぞれの測定容器に固有な値とも 考えられる。すなわち,爆発特性値は分散方法および 測定容器の寸法,形状に依存するであろう。しかしな がら、これまでにいくつかの試行があったが、実用 上,一定の標準容器および方法を定め,それによって 測定された各種粉じんの爆発特性値を比較すれば、そ れらの相対的な危険性が評価できると思われる。通 常、このような爆発容器は球形もしくはそれに近い形 状の容器で,爆発特性値として混合気の燃焼エネル ギーに関連する最大爆発圧力と燃焼速度に関連する最 大圧力上昇速度が,多くの研究者によって測定されて きたところである。その中で, Bartknecht<sup>1)</sup>は粉じん 爆発危険性を示す粉じんの分類を、最大圧力上昇速度 に関係する Kst 値によって行い, それらの測定方法 はISO(国際標準化機構)規格<sup>2</sup>に採用されている。し かし,乱れの影響については装置特有のものとして記 述してあり、その程度は不明である。ここで、爆発測 定容器の容積をV,最大圧力上昇速度を (dp/dt)maxと すると,

$$K_{st} = (dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3}$$

の関係があり<sup>1)</sup>,  $K_{st}$  は容積に関して規格化された最大 圧力上昇速度を表す。また最大圧力上昇速度は燃焼速 度に関係するので,  $K_{st}$  は爆発の激しさを表す爆発特 性値として重要視されるようになってきている。

一方,粉じん爆発に及ぼす乱れの効果に関する研究 には、Leeらのグループ<sup>3~5)</sup>,Kauffmanら<sup>6)</sup>によって近 年精力的に行われた数々の実験的研究があるが、乱れ の強さはどれも著しく小さく、ISO に準じた爆発特性 値を求める上で乱れの効果を判断するためには不十分 であると思われる。

ここでは、可燃性粉じんの爆発特性値を測定する上

で出来るだけ爆発火炎の伝ばが容器々壁の影響を受け ないような大型密閉容器における,爆発圧力および最 大圧力上昇速度の二つの爆発特性値に及ぼす大きな乱 れの効果について検討した。

#### 2. 実験

実験で使用した爆発測定装置の概要を, Fig. 1 に示 す。爆発容器は直径800mmの球形容器を二分し、その 間に同径の高さ300mmの円筒管を挾み込んだような カプセル形状の鉄製耐圧容器で、内容積は419-1ある。 直径4mmの小穴を開けた分散パイプ(内径19mm) を通して、試料粉じんを加圧空気で容器中へ分散させ る方法で浮遊粉じん雲を形成させた。分散系は左右対 称二系統あり、これらを内容量8881の圧縮空気タンク 一基に接続した。試料粉じんは二個の粉じん容器に二 分して充填し,粉じん容器と空気タンクとの間の空気 圧作動形バルブ(口径32mm,外部パイロット電磁弁 付)および逆止弁を開くことによって分散した。ま た、粉じん容器と分散パイプとの間には、アルミ箔を 挿入し,爆発容器を減圧にする場合の粉じんの移動阻 止と容器の気密性を確保した。アルミ箔(0.05mm 厚)は加圧空気によって容易に破裂するものを選んだ。 分散パイプの小穴の個数は一系統につき10個で,容器 中心向きに配列した。分散パイプの使用はBartknecht<sup>1)</sup>によったが,彼らが1m<sup>3</sup>容器において空気加圧粉じ ん容器(2*l*, 20bar)の弁解放によって粉じん分散を 達成したのに対して,ここでは大容積の圧縮空気タン クを利用してできるだけ大きな乱れを爆発容器内に形 成できるように,装置仕様を設定した。

着火エネルギーが爆発に及ぼす影響はすでに報告さ れているので<sup>1)</sup>,ここではそれらを参考にして,Al, Mg,Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,BaO<sub>2</sub>の混合物をポリエチレン・ラッ プで包んだ物を,点火玉で起爆させる方法で着火した。 その量(1g)は一定とし,起爆位置は爆発容器中心と した。着火エネルギーは計算上約5000Jに相当する。 また,着火回路を空気バルブを起動させる電磁弁と電 気的に接続して,リレーおよびタイマーの利用によっ てバルブの解放時間並びにバルブを閉じてから起爆ま での時間をそれぞれ10ms単位で制御できるようにし た。

爆発圧力の時間変動を示す圧力曲線は,爆発容器中 心部の側壁とFig.1に示す位置の二箇所に歪み式圧力 変換器を取り付けて測定した。また,粉じんの分散状 況を観測するため,先端にガラス窓を付けた内径7m-



Fig. 1 Dust explosion experimental vessel. 粉じん爆発実験容器(4191) mの細管中にフォトダイオードまたは豆燈を収納し互いに約16cmの間隔でそれらを対向させ一種の光透過 型粉じん濃度計として,容器中心部に設置した。これ らの出力信号は,いずれもデジタル・オシロスコープ に記録して観測した。なお,フォトダイオードで測定 した着火源の燃焼時間は比較的長く約700msであった が,着火源単独での起爆によって生ずる圧力は検出さ れなかった。この着火源の燃焼時間は,金属粉の燃焼 によるものであるが,それらの放射熱が試料粉じんの 爆発反応に及ぼす影響は,粉じん量に較べれば金属量 がはるかに少ないので無視できるものと思われる。





## Table 1 Properties of the dusts. 粉じん特性

Durat	Mean diameter, $\mu$ m			Specific surface
Dust	dv	dw	ds	area, cm²/g
1. Cornstarch	26	28	20	4,053
2. BTA (Tinuvin320 <sup>*</sup> )	16	22	10	7,356
3. PTP (Irganox1010*)	33	39	12	6,492

Trade name

 $d_v = volume mean diameter$ 

 $d_w =$  mass mean diameter  $d_s =$  surface-area mean diameter

爆発実験には、データの比較が行えるように爆発特 性値が多数報告されているコーン・スターチ粉じんを 主に使用した。同粉じんは調理用として市販されてい る25kg 袋詰(日本コーン・スターチ(株)製)のもの を使用量だけ85℃,20時間乾燥してそのまま使用した。 他に、やはり比較のためプラスチック添加剤として流 通している、2-(3、5-ジ-t-ブチル-2-ヒドロキ シフェニル)ベンゾトリアゾール(商品名 Tinuvin320 [日本チバガイギー(株)],以下、本報ではBTAと略 称)及びペンタエリスリチルーテトラキス[3-(3、 5-ジ-t-ブチル-4-ヒドロキシフェニル)プロピオ ネート](商品名 Irganox1010 [同上],以下 PTP と略称)粉じんを使用した。これらの粒度分布及び平均粒 径を Fig. 2 及び Table. 1 に示す。

実験は、以下のような手順を繰り返して行った。ま ず、一定濃度の試料粉じんを秤量して粉じん容器に充 塡後,爆発容器を一定の減圧まで真空引きする。次 に, 空気バルブの解放時間および着火遅れ時間を設定 後,粉じんを噴射させ着火源を起爆する。同時に,爆 発圧力および光透過率の時間変化を記録する。圧力上 昇速度は圧力曲線の単位時間あたりの変化率によって 得られるもので,これはデータ収得後別にパソコン処 理によって求めた。爆発容器の減圧の程度は空気バル ブの解放時間(以後,これを空気放出時間と呼ぶこと にする), すなわち粉じんを分散させる空気量に依存 し,バルブを閉にした時点で爆発容器内圧力が大気圧 になるように決定した。すなわち,着火は常に容器内 粉じん雲が大気圧にある状態で行うようにした。な お、着火の有無は圧力曲線からも知りえるが、爆発容 器中央側壁に設けた観察窓(75mmφ,ガラス製)を 通してわかるようにした。爆発実験後は燃焼排ガスを 放出して,加圧空気で数回容器を洗浄して次回の実験 に備える。分散パイプの汚れが大きい場合は、容器を 開放して内部の固形物を取り除く。これは、粉じんの 種類や条件にもよるが数回の実験後必ず必要であった。 また、爆発容器が完全に放熱してから、後続の実験を 行う。なお、粉じん濃度は、試料粉じん充塡量を爆発 容器容積で除した値である。

#### 実験結果および考察

Fig. 3, 4は, コーン・スターチの粉じん爆発実験で 得られた光透過率, 圧力及び圧力上昇速度の時間変化 をそれぞれ示す。Fig. 3 は粉じん濃度300g/m<sup>3</sup>の場合 で,光透過率は最初の部分で100%から急激に減少す るが,すぐに約90%のレベルに回復して着火起爆まで にほぼ一定に保たれることを示している。これは,空 気放出時間400ms (減圧度は540mmHg) に較べて,粉 じんの分散が極く短時間で終了することを示している。 一方,同じ空気放出時間で粉じん濃度600g/m<sup>3</sup>の場合 の光透過率の変化 (Fig. 4 (a)) は,当初激しい変動が あるものの平均レベルはあまり変わらない。この場合 には,粉じん濃度計の検出限界に近い。粉じん濃度計 は容器中央の限られた直線方向の濃度変化しか示さ ず,容器全体の分布は窺い知れないが,これらの光透 過率の変化及びその変動周期から見て,粉じんの分散 は加圧空気によって一気に充填試料粉全量が押し出さ れるようにして放出され、爆発容器内で乱流混合して 粉じん空気・混合気を形成する。それ故,加圧空気の 放出停止とともに,乱れのレベルは急激に減衰するこ とが期待され,それに伴い粉じん粒子の沈降が生じる と思われる。しかし,600g/m<sup>3</sup>のコーン・スターチ濃 度においても光透過率で見る限り,分散後1.0秒間位 であれば粉じんの沈降は少ないようである。これは,



Fig. 3 Cornstarch dust dispersion and ignition for concentration of 300 g/m<sup>3</sup> with dispersion time of 400 ms. (a) Optical dust probe trace at centre of the bombs. (b) Pressure trace for delay time of 600 ms. (c) Rate of pressure rise trace.

濃度300g/m<sup>3</sup>,空気放出時間400msにおけるコーン ・スターチ粉じんの,(a)容器中心濃度変化,(b)爆 発圧力変化(着火遅れ時間600ms),(c)圧力上昇 速度変化 取りも直さず混合気の初期の乱れレベルが高いからで あろう。なお,着火に伴い光透過率は再び100%を示 したままとなるが,これは着火源と粉じん火炎による 発光のためである。

ここで示した圧力曲線は比較的スムーズで,それは 容器形状によると思われる。なお,圧力上昇速度の最 大値,すなわち最大圧力上昇速度は局所的に変動する 数値ではなく,Fig. 3, 4-(c)のような微分曲線のマクロ 的視点から見た最大値として求めた。また,着火は1 bar, abs. (100kPa)を基準として起爆させ圧力を測定 したが,爆発圧力は差圧で示してある(ΔP).



Fig. 4 Cornstarch dust dispersion and ignition for concentration of 600g/m<sup>3</sup> with dispersion time of 400 ms. (a) Optical dust probe trace at centre of the bombs. (b) Pressure trace for delay time of 1120 ms. (c) Rate of pressure rise trace.

 濃度600g/m<sup>3</sup>,空気放出時間400msにおけるコーン
 ・スターチ粉じんの、(a)容器中心濃度変化、(b) 爆発圧力変化(着火遅れ時間1120ms)、(c)圧力
 上昇速度変化 一定の粉じん・空気混合気に対して,この実験での 爆発圧力および圧力上昇速度に影響する項目として, 圧縮空気タンクの圧力,空気の放出時間,着火遅れ時 間の変数がある。この実験において,分散による初期 の乱れの強さは空気タンクの圧力に依存し,着火遅れ 時間は着火時の乱れの強さのレベルを決定する。分散 パイプの噴出小穴付近で形成される初期の乱れの強さ は,空気放出時間の間だけ維持されるが,その乱れの 強さは(空間)距離的にも時間的にも急激に減少する だろう。出来るだけ大きな乱れを形成させるため,こ こではタンク圧力を最大の一定圧力(10bar)に圧縮 して放出することにして,他の影響因子の効果を調べ た。



Fig. 5 Data for variation of maximum rate of pressure rise with time delay to ignition at different cornstarch concentrations (Dispersion time: 250 ms)

コーンスターチの種々の粉じん濃度における着火 遅れ時間と最大圧力上昇速度の対応データ(放出 時間:250ms)



Fig. 6 Data for the variation of explosion pressure with time delay to ignition at different cornstarch concentrations (Dispersion time: 250 ms) コーンスターチの種々の粉じん濃度における着火 遅れ時間と最大爆発圧力の対応データ(放出時 間:250ms)

Fig. 5,6は、コーン・スターチの種々の粉じん濃度 における最大圧力上昇速度と(最大)爆発圧力を着火 遅れ時間に対してプロットしたものである。ただし, 着火遅れ時間は空気放出停止後着火起爆までの時間に 相当するが,実際にはこれよりも150ms だけ短い。記 録された圧力曲線から、この時間より短い遅れ時間で は着火は減圧下で起きることから、この損失時間は空 気バルブから噴出した空気流が爆発容器に達するまで の遅れ時間とみなされる。両図は空気放出時間を250 msの一定にした場合の変化を示すが,最大圧力上昇 速度は着火遅れ時間の経過と共に急激な低下を示す。 Fig. 5において, 粉じん濃度が500~700g/m<sup>3</sup>の範囲で 着火遅れ時間0と400msの場合を比較すれば、時間の 経過に伴って最大圧力上昇速度は約1/8~1/10も低下 する。これらは、乱れの強さが粉じんの分散後急激に 減少することに対応していると考えられる。ここで, 濃度600g/m<sup>3</sup>の場合が最大圧力上昇速度は最も大きい 値を示し、これらの粉じん濃度の範囲では着火遅れ時 間に対する減少傾向はほとんど同じである。これに対 して、粉じん濃度300g/m<sup>3</sup>の場合は、減少傾向はより 顕著であり、同様の粉じん濃度による差異は爆発圧力 と着火遅れ時間の関係(Fig. 6)においても見られる。

-78-

着火遅れ時間による爆発圧力の低下は、最大圧力上 昇速度のそれよりもはるかに小さい。Fig. 6において、 100ms以下の短い送れ時間では粉じん濃度500~700g /m<sup>3</sup>における爆発圧力はあまり変わらず,600ms まで の遅れ時間に対する爆発圧力の全体的な減少割合は比 較的小さい。これに対して,データ点は150ms以下に 限られるが、300g/m<sup>3</sup>の濃度における減少傾向はより 顕著である。ところで、一般に、爆発圧力は混合気の 持つエネルギーのみに依存するが,実際には容器々壁 への熱損失、従って爆発継続時間によって影響される。 それ故、爆発圧力は当然粉じん濃度に影響されるが、 粉じん爆発では通常未燃焼粒子が残存するので,同じ 濃度でも実際に燃焼した粉じん量に依存することにな る。これらのことから、 $500 \sim 700 \text{g/m}^3$ のコーン・ス ターチ粉じん濃度では,着火遅れ時間が短い場合(< 100ms),粉じん乱流混合が十分に行われ乱れの強い 条件で混合気の燃焼が進行し、混合気の持つエネル ギーが十分放出されたと考えられる。着火遅れ時間が より長くなった場合の爆発圧力の緩やかな低下は、乱 れレベルの減少とそれに伴う粉じん濃度の不均一性に よるものと思われる。一方,濃度300g/m<sup>3</sup>の場合粉じ んの分散はほぼ完全に行われ、上述の場合よりも粉じ ん量が少ないだけ, 混合気の乱れの強さは大きいだろ うと予想される。従って,乱れレベルの減少割合もよ り急激となるだろう。空気流中での粉じんの存在は、 乱れ強度を抑制する働きが知られている<sup>12)</sup>。ただし, 乱れのスケールは分散パイプの小穴径で決まり、その 程度に変化はないと思われる。それ以外に、この濃度 における, やや急速な最大圧力上昇速度および爆発圧 力の減少傾向は、比較的長い爆発継続時間、すなわち 着火から燃焼終了までの時間がより長いため、放射お よび乱れ対流による器壁での熱損失がより大きくなる ことによるとも思われる。しかし,その減少度合から みてそれだけでは不十分で,乱れに基づく粉じん濃度 の変動や乱れと粒子の複雑な作用によることも考えら れる。

Fig. 7は, コーン・スターチ粉じんの同一濃度にお ける空気放出時間の影響を示す。300g/m<sup>3</sup>の場合,着 火遅れ時間が短かければ,最大圧力上昇速度は図に示 した範囲での空気放出時間による影響を受けないが, 着火遅れ時間が長ければ空気放出時間が長いほど最大 圧力上昇速度の低下はより小さい。乱れの初期強さは タンク圧力が一定なので同等であるが,空気放出時間 が長いほど乱れの高いレベルがより長く維持されるこ とによるのであろう。爆発圧力は空気放出時間の差に よってほとんど変わらず,着火遅れ時間と共に多少減 少した。粉じん濃度600g/m<sup>3</sup>の場合,着火遅れ時間に よる最大圧力上昇速度の減少傾向は,ここでの空気放 出時間による差はなく,爆発圧力は空気放出時間が長 いとより低い値を示すようである。300g/m<sup>3</sup>の場合に も言えることであるが,空気放出時間が長いと,粉じ んはそれだけ長く爆発容器内で流動することになり, 攪拌中に器壁への粉じんの付着や粒子の凝集が起きる ことによるのかもしれない。図から,最大圧力上昇速 度や爆発圧力の最大値を求める上で,ここで設定した 範囲内であれば,空気放出時間の影響は小さいと思わ れる。



Fig. 7 Variation of explosion pressure and maximum rate of pressure rise with time delay to ignition at different dispersion time for cornstarch-air mixtures.

> 空気放出時間を変えた場合のコーンスターチ粉じ んの爆発圧力と最大圧力上昇温度の着火遅れ時間 による変化

-79-





昇速度の着火遅れ時間による変化

Fig. 8は, BTA および PTP の粉じん濃度600g/m<sup>3</sup>, 空気放出時間250msにおける着火遅れ時間と爆発圧力 並びに最大圧力上昇速度の関係を測定したものである。 BTA 粉じんの一部の爆発圧力データを除いて,全体 的にデータのバラツキは少ない。恐らく、これらの粉 じんの優れた分散特性によるのであろう。BTA 粉じ んの方が大きい最大圧力上昇速度を取り,100ms以下 の遅れ時間で急激な立ち上がりを示すが、両者の爆発 圧力に大差はなく,遅れ時間約300msまでならばほぼ 一定である。

以上の結果からも明らかなように、粉じんの爆発特 性値の中で, とりわけ最大圧力上昇速度(Kst)は乱れ レベルによって大きく異なる値を示す。そこで次に, 粉じん爆発の最大圧力上昇速度としてどのような値を

採用すれば良いかということが問題になる。それは, 目的にもよるが、ISO 規格データとの比較を行うこと とすると、上記のデータから、着火遅れ時間として約 70msを取ればISO-6184<sup>2)</sup>に準じた特性値が得られるよ うである。Table.2に、この場合の測定値と文献値を 比較した。ただし、同名の粉じんでも粒度分布を初め とした物質特性が異なるので、単純な比較は出来ない が、当測定装置における Kst の測定にはこの遅れ時間 に相当する乱れ特性を与えてやれば良いだろうと判断 される。なお、上記の ISO 規格では、規格で定めてあ る1m<sup>3</sup>爆発容器の代替容器を使用する場合,Kst 値の 異なるいくつかの粉じん試料を用いて文献値と差がで ないことを検証することを要求しているが、実際、同 一粉じん試料を入手することは前記の理由で困難であ る。ここでは、上記の BTA および PTP 系列の粉じん 試料を別に5種入手して,ここで定めた測定方法に よって Kst 値を測定したところ, 既存データとほぼー 致する値が得られた(これらについては,別に報告予 定)。これらの経験からも、粉じん・空気混合気が同 等の乱れレベルであれば,乱れの詳細な構造の相違を 問わず, ISO 規格における Kst 値の測定が可能であると 思われる。

. u	ala.			
dust	reference	$\triangle P_{max}(bar)$	K <sub>st</sub> (bar·m/s)	remarks
cornstarch	present	7.8	209	
	7)	9.3	200	$V = 1 \text{ m}^3$ ,
				$d = 7 \ \mu m$
	7)	8.9	194	$V = 1 m^3$ ,
				d <10 µ m
BTA	present	7.7	261	
(Tinuvin 320)*	8)	7.6	263	$V = 1 m^3$
	9)	7.7	292	$V = 1 m^3$
	10)	8.1	263	$V = 0.02m^{2}$

Table 2 Comparison of present results with reference data

dust	reference	$\triangle P_{max}(bar)$	K <sub>st</sub> (bar·m/s)	remarks
cornstarch	present	7.8	209	
	7)	9.3	200	$V = 1 m^3$ ,
				$d = 7 \mu m$
	7)	8.9	194	$V = 1  m^3$ ,
				d <10 µ m
BTA	present	7.7	261	
(Tinuvin -320)*	8)	7.6	263	$V = 1 \text{ m}^3$
	9)	7.7	292	$V = 1 m^2$
	10)	8.1	263	V=0.02m <sup>3</sup>
PTP	present	7.2	165	
(Irganox -1010)*	9)	6.3	144	V = 1  m
	10)	7.7	160	V=0.02m <sup>3</sup>

 Trade name V: Explosion vessel volume.

d = particle mean diameter

また、爆発容器中のある点における着火直前の平均流 速を測定したとしても、火炎の膨張による未燃焼混合 気の圧縮および乱れによって火炎直前の流速は著しく 変動するので,その流速値では乱れのレベル特性を十 分表せ得ないだろうと思われるので、個々の爆発測定 容器ごとの上記のような検証が必要になるだろう<sup>11)</sup>。

-80-

しかし,このような一過性の乱れ時性のもとで測定された爆発特性値は,粉じん物質固有の基本的な危険特 性値とは言い難く,特定の流動条件下での相対値でし かすぎないだろう。それ故,燃焼速度のようなより基 本的な特性値を測定する必要があるが,密閉容器中で の燃焼速度を直接測定することはいまのところ困難で あり,より精密な間接的手法の開発がなされなければ ならないだろう<sup>6)</sup>。また,粉じんの爆発危険性評価に 実務面でK<sub>st</sub>測定値を利用するにしても,プラントに おける粉じんの実際上の乱れレベルの程度を考慮しな ければ,妥当な評価はなし得ない危険性も考えられる。

ところで、コーン・スターチ粉じんの爆発データ は、これまでかなり報告されている。その中で球形爆 発容器を使用したデータを選んで、Fig. 9,10に当実験 データと比較して示した。もちろん、粒度分布を含む 粉じんの特性や分散方法、従って乱れ特性などもかな り異なるであろうが、定性的な傾向は比較できるだろ う。図によると、爆発圧力と粉じん濃度の関係は、こ こで得られたデータとBond<sup>30</sup>らのそれとでは高濃度の 場合以外驚くほど良く一致する。これらの粉じんの分 散はかなり良い条件にあったと推定される。Kauffman ら<sup>60</sup>のデータでは二つの乱れ強度に対する変化傾 向は同じであるが、乱れレベルが高いほうがより大き



Fig. 9 Comparison of results for the explosion pressure in cornstarch-air mixtures as a function of concentration.

> コーンスターチ粉じんの粉じん濃度と爆発圧力の 関係の他のデータとの比較

い爆発圧力を示している。Cocksら<sup>10</sup>は20*l* 容器を使用 して測定したが、平均粒径が大きかったためか最大爆 発圧力を示す粉じん濃度は高い。いずれにしても、濃 度約100g/m<sup>3</sup>から爆発圧力は急激に高くなり約600g /m<sup>3</sup>の濃度で一定値に近づき、それ以後わずかに低下 する傾向がある。一方,最大圧力上昇速度をKstで比較 すると、乱れレベルの違いによって大きな相違がある。 当実験データのKst最大値はKauffmanらの示す乱れ強 度 u'=4m/s の場合の約4倍で、他のいずれの値より もかなり大きい。乱れのスケールはいずれの実験でも それほど変わらないので, ISO 規格に準じて測定した 当実験データは乱れ強度がかなり高い条件で測定され たことは明かである。Fig. 11 は,同じ条件におけ る BTA および PTP 粉じんの粉じん濃度と爆発圧力及 び最大圧力上昇速度の関連データを示す。BTA 粉じ んについては Bartknecht<sup>8)</sup> のデータもプロットした。 最大爆発圧力を示す濃度が,最大圧力上昇速度の最大



Fig. 10 Comparison of results for K<sub>st</sub>-value incornstarchair mixtures as a function of concentration. コーンスターチ粉じんの粉じん濃度とK<sub>st</sub> 値の関係 の他のデータとの比較



Fig. 11 Explosion pressure and maximum rate of pressure rise vs. dust concentration for BTA and PTP dusts.

BTA および PTP 粉じんの濃度と爆発圧力および最 大圧力上昇速度の関係

値を示す濃度に必ずしも対応しない。爆発圧力が比較 的低濃度で最大になるのに対して,最大圧力上昇速度 の最大値はより高い粉じん濃度で与えられる。文献値 <sup>8)</sup>とは濃度との対応はずれるものの,その傾向も最大 値とも良く一致する。濃度のずれが,乱れの構造によ るのかはわからないが,これによっても詳細な乱れ構 造が不明であっても,同等の乱れ強度を持った任意の 粉じん・空気混合気の爆発危険特性値は測定できるだ ろうと思われる。

#### 4. あとがき

可燃性粉じんの爆発危険性を評価することを目的と して、419-1の爆発容器中でのコーン・スターチ粉じん ・空気混合気に及ぼす乱れの効果を測定した。粉じん 爆発での乱れは未燃粉じん混合気に付随する性質と考 えられるが、容器中へ圧縮空気で粉じんを分散した時 点を最大として乱れの強さはその後急激に減少する特 性のものである。これに対応して,最大圧力上昇速度 も急激に低下するが、最大爆発圧力はあまり変化しな い。簡単に言えば、爆発圧力が混合気の持つエネル ギーを表すのに対し,最大圧力上昇速度はエネルギー の放出速度すなわち燃焼速度に関連づけられるからで ある。混合気中の粉じんの分散が完壁で粉じんが完全 燃焼するものであれば、混合気の放出エネルギーは乱 れに関係なく一定となるだろうが,実際には種々の要 因が関連して爆発圧力はかなりのバラツキを示す。通 常,乱れの増大によって火炎面積が著しく拡大する結 果燃焼速度も増大し, それに関連する最大圧力上昇速 度もまた大きくなる。これらの特性を反映して、ここ で測定された最大圧力上昇速度は著しく高く, ISO 規 格に準じたKstを測定するためには約70msの着火遅れ 時間をとればよいことがわかった。しかし, Kst値は乱 れレベルに依存してなお大きく変動するので,その適 用においては乱れレベルを考慮しなければ爆発危険性 を過小評価する危険性も否定できない。

一方,最大圧力上昇速度と燃焼速度の関係は,Cを 定数,Sを燃焼速度,Poを初圧,7を比熱比として,

$$K_{st} = V^{1/3} (dp/dt)_{max} = CS \wedge P_{max} (P_{max}/P_0)^{1/3}$$

によって近似的に与えられる<sup>50</sup>。この式から燃焼速度 がある混合気の化学的性質のみを表すものとすれ ばKstは一定となるが、実際には乱流燃焼速度は乱れ レベルに大きく依存してKstは一定にはならない。し かも、粉じんの分散状態や器壁への熱損失などに基因 して、最大爆発圧力も乱れの程度に応じて燃焼速度に 多少なりとも依存するので、Kstはさらに大きく変動 することになる。それにも拘らず、Kst値を粉じん爆発 特性値として測定する理由は、乱れレベルを一定にす れば爆発容器容積に関係なくほぼ一定の特性値が決定 でき、相対比較が可能になることにあるが、それを参 照する場合は乱れレベルによって大きく影響される値 であることを再度考慮する必要がある。

(平成元年3月31日 受理)

## 参考文献

- W. Bartknecht. 'Explosionen', Springer-Verlag, 1978, Berlin
- ISO 6184/1-1985 (E), Explosion protection system-Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air, International Organiz-

-82-

ation for Standardization, Switzerland, 1985-11-15

- J. F. Bond, M. Fresco, R. Knystautas, J. H. S. Lee, 1st Intnl. Colloquim on explosibility of industrial dusts, Book of papaers (Part-2), 37 (1984)
- J. F. Bond, R. Knystautas, J. H. S. Lee, Dynamics of Explosions, Progress in Astronautics and Aeronautics, 106, 571 (1986)
- 5) J. H. S. Lee, Yi-kang Pu, R. Knystautas, Archivum Combustionis, 7 (3/4), 279 (1987)
- 6) C. W. Kauffman, S. R. Srinath, C. S. Tai, Proceedings of the Intnl. Symp. on the Explosion Hazard Classification of Vapors, Grases and Dusts, NMAB-447, National Academy Press, New

York, 1987

- BIA: Brenn-und Exposionskenngrössen von Stauben, Forschungsbericht Staubexplosionen des Berufsgenossenschaftlichen Institutes für Arbeitssicherheit, Marz 1980
- W. Bartknecht, Swiss Chem., 3(Nr. 3a), 51 (1981)
- 9) 日本チバガイギー㈱資料
- 10) R. E. Cocks and R. C. Meyer, Loss Prevention, 14, 154 (1981)
- 11) I. Swift, Plant/Operations Progress, 7 (3), 159 (1988)
- Y. Tsuji, Encyclopidia of Fluid Mechanics, vol.
  4, 283 (1985), Gulf Pub., Houston