

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04573

研究課題名（和文）粉じん爆発事故における流れの存在と爆発強度の関係

研究課題名（英文）Relationship between the existence of flow and explosion intensity in a dust explosion accident

研究代表者

花井 宏尚（Hanai, Hironao）

群馬工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：30312664

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：可燃性の粉体を原因とする粉じん爆発事故分析に対して重要な知見を与える爆発時に存在する乱れが爆発強度に与える影響について明らかにした。乱れの爆発強度への影響は、粉体のサイズにより変化することが分かった。密閉容器を用いた実験では、最大圧力への乱れの影響は、粉じん濃度が希薄な場合に対してより大きな影響を持つことが分かった。一方、最大圧力勾配については、粉体濃度の高い方がより乱れの影響を受けることがわかった。粉体の大きさに対しては、小さな粉体の場合に乱れの影響がより大きく出ることが分かった。これらの影響は、乱れによる対流熱伝達率の変化と火炎面積の増大により説明できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、可燃性粉体が空間に散布されそれに適切な熱が加わった時に発生する粉じん爆発の原因分析における基礎データの提供を行った。粉じん爆発は、一般には起こり難い現象である。いくつかの条件が整わないと発生しない。多くの場合、流れにより適切な粉じん雲が形成され爆発環境を整える。ガス爆発に関しては、乱れが爆発特性に及ぼす影響については理解が進んでいる。しかし、粉じんに対しては、粉体の気化特性や形状、表面性状や気化温度など多くの因子が乱れの影響を受けるため、それらを説明し得る基礎データの提供が行われていなかった。本研究では、主に乱れと粉体濃度および粉体サイズに対する関連を主眼に原因の究明を行った。

研究成果の概要（英文）：We clarified the effect of turbulence present at the time of an explosion on intensity of explosion, which provides important insight into the analysis of dust explosion accidents caused by combustible powder. It was found that the effect of turbulence on explosion intensity varies depending on the size of the powder. In experiments using a closed vessel, it was found that the effect of turbulence on maximum pressure is greater when the dust concentration is low. On the other hand, it was found that the maximum pressure gradient is more affected by turbulence when the powder concentration is high. Regarding powder size, it was found that the effect of turbulence is greater for small powder. These effects could be explained by the change in convective heat transfer coefficient due to turbulence and the increase in flame surface area.

研究分野： 燃焼学

キーワード： 粉じん 爆発 乱れ 爆発強度

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粉じん爆発事故はしばしば大きな社会問題を引き起こす。爆発は予防が最大の策であるが、粉じん爆発は発生条件が多岐にわたるため予防策を講じるのが困難である。一つの理由に流れ場の関与がある。粉じん爆発が発生するためには、粉じんが空中に浮遊するための空気流の存在が不可欠である。ところが JIS Z8817 では、実験に与える乱れと結果の関連を考慮していない。そのため、得られたデータに含まれる乱れの影響は装置毎に異なる。一方で近年、実用的な燃焼機器において、さらなる高効率化および環境負荷低減を求め、燃焼場の乱流化がより強度なものになっている。燃焼機器の開発と設計において種々の燃焼データは不可欠であるが、乱れと火炎は複雑に干渉しており、その見積もりは容易ではない。気体燃料の燃焼に関しては、多くの実験や数値シミュレーションがこれまでに実施され、乱流モデルを精度よく構築するための基礎データの蓄積がなされている。一方で、燃焼過程に複雑な現象を含む噴霧や固体微粒子の燃焼に関しては、いまだ信頼されるデータが提供されているとは言い難い。粉じん爆発実験では、粉体の噴射方法や噴射の強さ、噴射から着火までの時間等に乱れの状態が依存するため、乱れ強さと燃焼の関係が一般的であるとは言い難い。

2. 研究の目的

粉体の燃焼は、ガスの燃焼と比較すると、粉体の加熱、熱分解もしくは解重合等によるガス化、周囲酸化剤との混合そして着火と、多くのプロセスを経て燃焼に至るため解明が極めて難しい。燃焼場に存在する乱れの影響に関しても、粉体加熱時の熱伝達係数、酸化剤との混合時の物質輸送、着火時の熱の散逸など多くに関連する。本研究では、乱れの影響を定量的に評価するため乱れ発生板を用いて、燃焼場全域に均一の等方性の乱れを与える。実験は定容器法およびバーナー法の二通りの方法も用いて実施した。粉じんに与えた乱れ強さは風洞を用いた予備実験において見積もった。

3. 研究の方法

(1) プラスチック粉体の選定

燃料に使用するプラスチックは、酸素指数が 17 と比較的燃焼性が良好で、従来から多くの燃焼実験で使用されているポリメタクリル酸メチル (PMMA) 樹脂を選択した。また、その粉体として、粒径の違いが結果に正しく反映されることを期待して、図 1 に示す、真球状で粒度分布の狭い、積水化成工業製「テクポリマー」MBX シリーズの PMMA 粉体を用いた。また、球状の粉体は、安息角が小さく凝集し難いため、容器内に均一な粉体雲を形成させやすく、粉じん爆発実験には最適である。さらに、数値シミュレーション等において燃料モデルを構築することも容易である。使用する粉体直径 D は、粉体の気化時間や沈降、周囲気体とのすべりを考慮して $5\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $80\ \mu\text{m}$ の 4 種類を選択した。

(2) 実験装置概要

図 2 に、本研究で使用した粉じん爆発実験装置の概略を示す。定容器を用いた粉じん爆発実験では、通常、球形の容器を用いることが好ましいが、本実験では、容器内部で乱れ発生板を移動させることで燃焼場に乱れを与える手法を用いるため、円筒形状の容器を使用する。容器の大きさは、直径 200 mm、長さ 250 mm で容積が 8.0 L である。容器は、重力と粉体の分散方向を考慮し、図のように立てた状態で使用する。容器には、容器内部での粉体分散や火炎伝播の様子を観察するため、観測窓が正面と側面二か所に付けられている。千鳥配列に並んだ小孔を持つ乱れ発生板を容器内部で長手方向にエアシリンダーを用いて所定の速度で移動させることで、容器内全域に既知の等方性乱流を与える。

実験は以下の手順で実施する。容器下部に取り付けられた粉体噴射部に所定量の PMMA 粉体を入れる。実験開始前に、乱れ発生板を容器最下部に位置させる。実験開始により、乱れ発生板を一定速度で上方へと移動させると同時に、粉体を容器内部へ噴射させる。粉体は、粉体噴射部出口に取り付けられた分散カップの作用により、容器内に均一に分散される。粉体噴射後、ニクロム線を利用した着火装置により、容器中央部で粉体に着火する。粉体火炎は、容器内を放射状に伝播する。粉体への着火タイミングは、粉体噴射の流れの影響が最小となるように粉体粒径ごとに設定した。火炎伝播によって生じる容器内圧力上昇を、時定数の十分小さなひずみゲージ式圧力センサーを用いて計測し PC に保存する。本実験では、実験終了時に、容器底面に残留粉体が生じる。そのため、その量を実際に計量した量から差し引き、燃焼に使用される粉体量 $W[g]$ として扱う。

(3) 乱れ発生装置概要

本研究では、容器内に均一で一様な乱れを発生させるため乱れ発生板を用いた。乱れ発生板は、図 2 の右上に描画されているような、千鳥配列に小孔が規則的に並んだ円形の板である。この板を容器内長手方向に一定速度で移動させることで、容器内全域に均一な乱れを生成する。板に開いた小孔の数を変化させることで、容器内に生じる乱れ強さを変化させることが可能である。本実験では、小孔の個数 37 個、55 個、333 個のものを用いる。小孔の直径はいずれも 8.0 mm

である。



図1 使用した PMMA 粉体の拡大画像

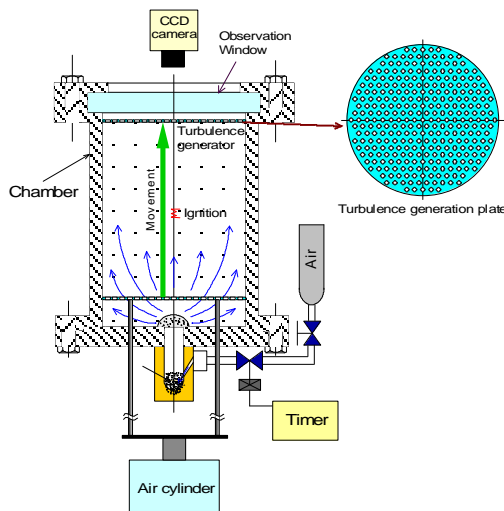


図2 定容器実験の実験装置概略図

4. 研究成果

(1)図3に、粉体量 W と容器内で生じる最大圧力 P_{max} の関係を示す。使用した PMMA 粉体の粒径 D は $5.0 \mu\text{m}$ である。粉体量 W は、 1.1 g から 2.0 g まで 0.3 g 刻みで変化させた。本容器に対する粉体の化学量論量は $W = 1.25 \text{ g}$ である。横軸は粉体量 W 、縦軸は容器の圧力履歴から得られた最大圧力値 P_{max} である。定容器爆発実験における最大圧力は、燃焼により生じた熱量と容器への火炎到達後の熱損失により決定される。そのため、最大圧力は、燃料濃度や完全燃焼した粉体量、火炎の形状や火炎構造により変化する。仮に、同量の粉体を容器内に噴射した場合でも、何らかの要因により火炎の伝播過程で燃え残りが発生したり、火炎の厚みの増加により爆発容器壁面への熱損失が増加したりすると最大圧力が減少する。図3を見ると、実験した粉体量の範囲では、粉体量の増加とともに最大圧力が上昇している。前述のとおり本容器では、 $W = 1.25 \text{ g}$ が化学量論量、すなわち当量比で $= 1$ であるが、気体燃料と異なりこの量を超えても最大圧力が上昇し続けている。これは、粉体の燃焼が、気体と比較して多くの過程を経て燃焼に至ることが理由で、化学反応よりも気化や混合などに多く時間を必要とする。その結果、粉体の気化から粒子の後燃えまでを火炎とみなすと、粉体の火炎は気体の火炎よりもかなり厚くなる。これにより、先行する火炎面付近に多くの余剰燃料を供給できる燃料の濃い条件の時に、最大圧力のピークが移動する。過去の研究 (Krazinski et al., 1979 and Okuyama et al., 1996) でも、燃焼速度の最大値を示す当量比は、 1 よりも大きなところに位置することが明らかにされている。さらに燃料過濃側において、燃料量に対する最大圧力の減少がほとんど見られないことも分かっている。ある文献 (Hertzberg et al., 1986) では、粉体燃焼の過濃側可燃限界が、粉体量のかなり多いところに存在するともされている。図3でも、乱れのない状態では、 1.8 g 付近に最大圧力のピークがあり、それを越えたとしても、最大圧力の減少がほとんど見られていない。

図4は、横軸を乱れ強さとして各粉体量に対する最大圧力の変化を示したものである。各粉体量に対して、乱れ強さが大きいほど最大圧力が減少する傾向が見られる。最大圧力低下の一つの要因として、火炎厚みの増加があげられる。乱れが大きくなると火炎が大きく湾曲し、火炎の一

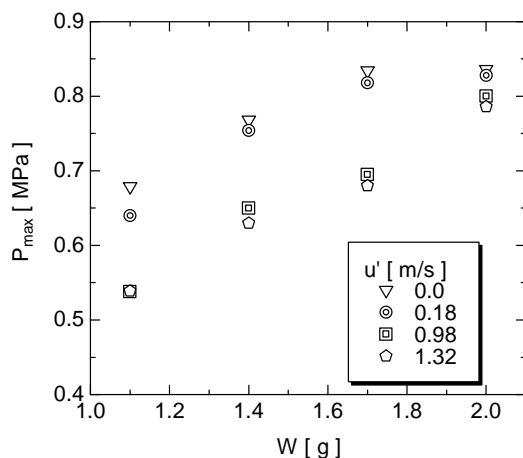


図3 乱れが粉体量の最大圧力に及ぼす影響

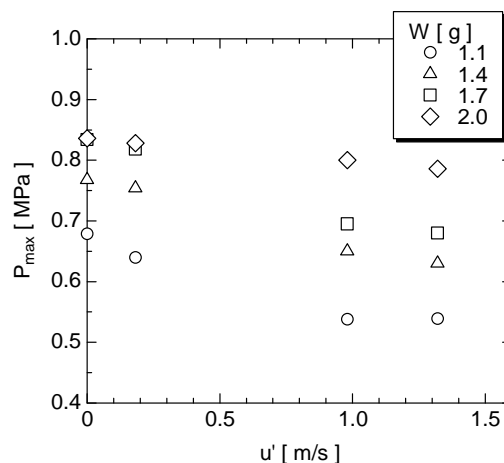


図4 乱れ強さと最大圧力の関係

部が早く容器壁に接触することになる。そのため、多くの熱が容器壁面に奪われる。またもう一つの要因は、粉体の火災が、気体の予混合火災と異なり、粒子の気化、空気との混合、着火の過程が乱れの影響を受けるため、乱れにより局所消炎してしまうことにある。これにより、一部の粉体が燃焼出来なくなり、最大圧力が減少する。特に、燃料濃度の低い粉体の方が大きく影響を受け、乱れの上昇とともに最大圧力の減少も大きくなっていることがわかる。粉体量が多い場合には、燃料過濃状態であり、余剰燃料の供給が乱れの消炎効果を減少させている。

(2) 図5に、粉体量 W と爆発指数 K_{st} の関係を示す。 K_{st} は容器内の圧力勾配の関数で爆発圧力が高まる強度を示す。横軸が粉体量 W 、縦軸が爆発指数 K_{st} である。爆発指数は、燃焼速度と密接な関係にあり、本実験では容器内の火災伝播速度が大きくなれば K_{st} も大きくなる。すなわち、 K_{st} は、火災面における燃料濃度と火災面積の影響を受ける。図5では、粉体量 2.0 g でも圧力勾配が上昇傾向にあることがわかる。これは、本容器に対する化学量論量が 1.25 であることを考慮すると当量比で 1.6 となるが、当量比 1.0 を超えても燃焼速度が上昇していることを意味する。Okuyama ら (Okuyama et al., 1996) が行った、微小重力環境における伝播管法を用いた燃焼速度計測に関する研究において、8.0 μm の PMMA 粉体に対する燃焼速度の最大値が、当量比 2.0 付近に存在することが示されている。粉体の燃焼では、先行する火災面で粉体が完全に気化するわけではないため、粉体の気化量に比例して燃焼速度が上昇する。そのため、通常は、粒子密度の大きな、粉体濃度が濃いところに燃焼速度の最大値が現れる。

図6に、乱れ強さ u' と爆発指数 K_{st} の関係を示す。横軸が乱れ強さ、縦軸が爆発指数である。乱れ強さが小さい領域では、乱れ強さとともに爆発指数が増加している。しかし、乱れ強さが 0.98 m/s をピークに爆発指数は減少に転じている。乱れ強さが小さいと、乱れ強さの上昇とともに、火災面への燃料供給の増加による気化促進と、火災の湾曲の効果による火災面積の増大により、火災伝播速度すなわち圧力勾配が増加する。また粉体量が多いほど、乱れ強さの上昇に伴う圧力勾配の増加率が大きい。これは、粉体量が多いと、周囲に存在する粉体が多く火災への気化燃料の供給が促進するためである。さらに乱れが強くなると、火災が大きな伸長を受けるため、火災の一部が消炎し圧力勾配が低下する。

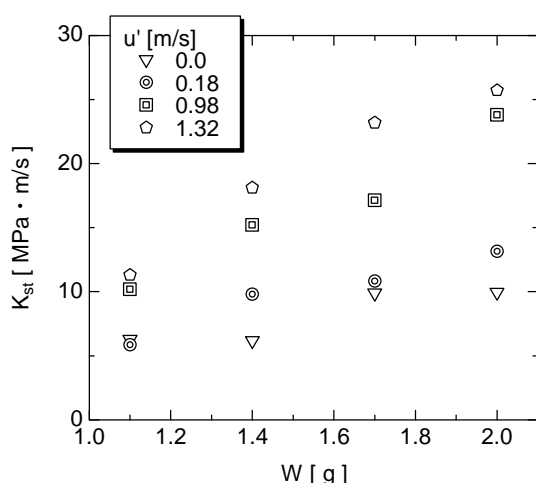


図5 乱れが粉体量の最大圧力勾配に及ぼす影響

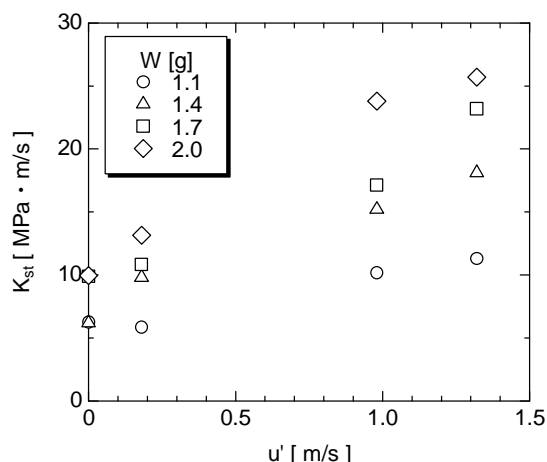


図6 乱れ強さと最大圧力勾配の関係

(3) 図7に、直径の異なる PMMA 粉体に乱れを与えた場合の最大圧力 P_{max} の変化を示す。粉体の直径 D は、5.0 μm 、15.0 μm 、30.0 μm 、80.0 μm の4種類である。粉体量 W は 1.4 g である。横軸は粉体直径 D 、縦軸は最大圧力 P_{max} である。いずれの乱れ強さにおいても、粒径の増大に対し最大圧力が低下している。大きな粉体では、粉体が熱を受けてから気化するまでに長い時間を必要とする。そのため、先行火災内で全量が燃焼することがなく、多くの粉体が火災の後方で後燃えすることになる。後燃えする粉体が増加すると、先行火災が容器壁に達してから燃焼する粉体量も増えるため、容器への熱損失が大きくなり最大圧力が減少する。

図8は、横軸を乱れ強さとした場合の、粉体サイズの違いに対して得られた最大圧力を示す。図からわかるように、粉体サイズが小さい場合と大きい場合では、乱れ強さの上昇に対する最大圧力への効果が異なる。乱れのある場において、粉体の燃焼は、2つの異なる作用を最大圧力を受けて増減する。一つは、乱れによる局所消炎により圧力が減少すること。もう一つは、粉体への熱伝達の増加により粉体の気化が促進され、火災面への燃料供給が多くなることである。前者は最大圧力を減少させ、後者は最大圧力を増加させる。この2つの作用の競合により、乱れ強さに対する最大圧力が決定される。図8を見ると、5.0 μm では、乱れ強さの上昇とともに最大圧力が減少している。粒径が小さいと質量あたりの表面積が大きく、乱れがない状態でも気化しやすい。そのため、乱れを与えても熱伝達の影響は小さく、消炎の影響の方が相対的に大きく出

てしまう。15 μm では、乱れ強さの上昇に対し、わずかに最大圧力が減少する。15.0 μm は、5.0 μm と比較して気化に要する時間割合が大きいいため、乱れ強さの上昇により気化が短縮し最大圧力の上昇効果が上回る。30.0 μm では、乱れ強さの上昇により、わずかに最大圧力の上昇が見られ、80.0 μm になると、最大圧力が大きく上昇した。大きな粒子では、消炎による圧力減少効果

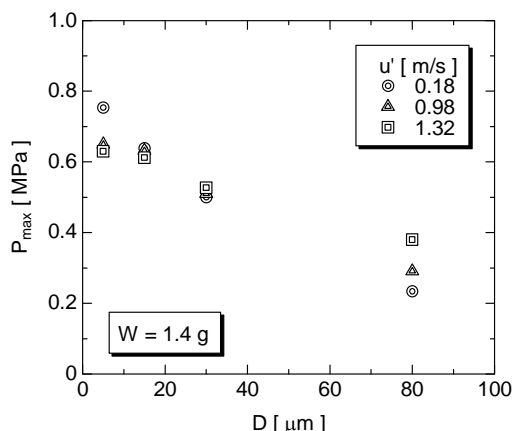


図7 乱れの粉体サイズへの影響

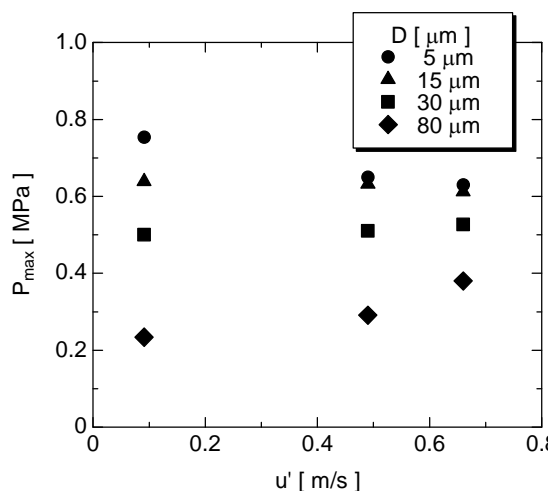


図8 乱れ強さと粉体サイズの関係

より、乱れの増加による対流熱伝達の増加の効果が大きく勝る。

(4) 図9に、粉体直径 D と爆発指数 K_{st} の関係を示す。横軸が粉体直径、縦軸が爆発指数である。図9からわかるように、粒径が大きくなるほど爆発指数は小さくなった。これは、粉体粒径が大きくなると、単位質量あたりの表面積が減少し、粉体の気化に要する時間が長くなるためである。そのため、火炎面への燃料供給が減少し、燃焼速度が低下する。すなわち、火炎伝播速度が低下するため最大圧力勾配が小さくなる。

図10に、横軸に乱れ強さ u' を取ったものを示す。粒径が大きいものほど、乱れ強さの増加に伴い爆発指数の増加率が低下している。気体と固体粒子の混相流れでは、粒径が大きくなるほど、乱れに追従する粉体粒子の速度が遅くなる。そのため、気体から受ける乱れの影響が減少し、乱れ強さが大きくなっても爆発指数の変化がそれほど小さくなる。粒径30.0 μm と粒径80.0 μm では大きな差が見られないことから、ある一定以上の粒子直径では、乱れの影響を受けにくくなることがわかった。

小さな粉体は、乱れ強さの増大により容器内に生じる最大圧力は減少した。また、最大圧力勾配は、火炎面積増大の効果を受け、ある乱れ強さまでは上昇するが、それより大きくなると伸長による消炎の効果により減少に転ずることが分かった。また、燃料希薄域では、燃料濃度が低いほど乱れの影響を大きく受け圧力勾配は大きく変化することが分かった。

一方、大きな粉体は単位質量あたりの表面積が小さいため粉体への熱移動が乱れにより大きく影響を受ける。そのため、乱れ強さが大きくなるにつれ、最大圧力、最大圧力勾配ともに増大した。また、中間のサイズの粉体は、小さな粉体と大きな粉体が受ける影響が拮抗することにより、見かけ上は乱れ強さの変化に対して最大圧力の値は変化しなかった。

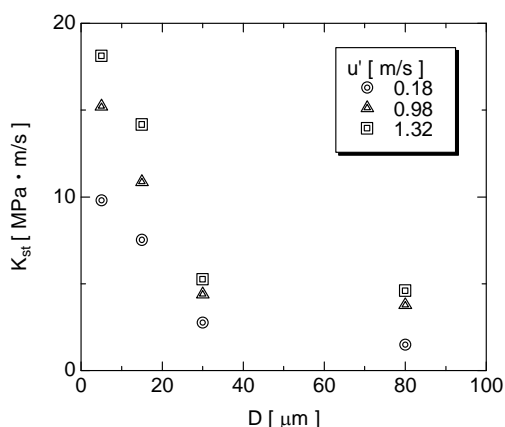


図9 乱れが粉体サイズに対する最大圧力勾配に及ぼす影響

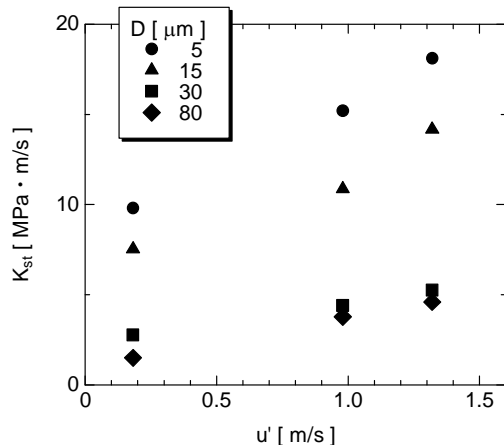


図10 乱れと粉体サイズに対する最大圧力勾配の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 花井 宏尚	4. 巻 第42号
2. 論文標題 アクリル粉体の燃焼と乱れの関係	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 群馬高専レビュー	6. 最初と最後の頁 79-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------