



粉じん爆発の危険性とその対策

Risk of Dust Explosions and Safety Measures for Them

土橋 律

Ritsu DOBASHI

東京大学大学院工学系研究科 教授

Professor, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, JAPAN

抄 録

粉じん爆発の危険性とその対策について概説した。可燃性粉じんは、空気中に分散されてある条件が揃うと粉じん爆発を起こす危険性がある。粉じんは固体であるので、ガス爆発のような完全な予混合燃焼が起こるわけではないが、高速の火炎伝播が発生し爆発現象となる。粉じん爆発で起きているのは燃焼現象であるため、粉じん爆発発生には燃焼の3要素と呼ばれる、①粉じん雲（燃料）、②着火源、③酸素が必須となり、この点が粉じん爆発防止対策を考える基本となる。粉じん爆発危険性評価に用いられる主要な特性値（爆発下限界濃度、最小着火エネルギー、限界酸素濃度、最大爆発圧力、圧力上昇速度）について説明した。特性値は、リスク評価の観点から、爆発発生特性（発生可能性）と爆発強度特性（被害の大きさ）を表すものに大別される。また、爆発防止・被害軽減措置のいくつかの例を説明した。

ABSTRACT

Risk and safety measures of dust explosions are described in this article. Combustible dust has the risk of dust explosion when it is suspended in air under some conditions. The dust is solid and it cannot burn like a premixed flame appeared in gas explosions, however, a flame can propagate rapidly and the phenomenon becomes explosion. The three factors of combustion, suspended combustible dust, ignition source, oxygen, are necessary for dust explosion. This point is important to think about safety measures of dust explosions. The main characteristic values (lower explosion limit, minimum ignition energy, limiting oxygen concentration, maximum explosion pressure, rate of pressure rise) used for hazard estimation are explained, which are categorized using risk concept into two kinds, characteristic values for occurrence and that for severity of dust explosion accidents. Also some of safety measures are explained.

1 粉じん爆発とは

1.1 はじめに

可燃性の粉体は、粉じん爆発を起こす危険がある。
図1に示すように、例えば可燃性固体のプラスチックはかたまりの状態では火をつけると燃焼はするが

爆発はしない。火災現象となる。固体を粉体状態としても、堆積した状態では火がつきやすく燃えやすくなるものの爆発は発生しない。粉体を空気中に分散させると着火後粉じん雲中を火炎が伝播し、粉じん爆発が発生する¹⁻⁴⁾。



■ 固体(塊)の燃焼 ⇒ 火災

↓ 粉砕

■ 粉体(堆積)の燃焼 ⇒ 火災(燃えやすい)

↓ 浮遊分散

■ 粉じん雲の燃焼 ⇒ 粉じん爆発



図1 粉体の燃焼

Fig. 1 Combustion of combustible powder.

1.2 粉じん雲中の火炎伝ば

粉じん爆発は、粉じん雲中の火炎伝ばである。火炎伝ばは高速であるため、エネルギー発生速度が速く危険性の高い爆発現象となる。

火炎伝ばについて説明するため、まず燃焼の2つの形態、すなわち予混合燃焼と拡散燃焼について説明する。身近で理解しやすいブンゼンバーナー上に形成される可燃性ガスの火炎を例に、図2で説明する。図2の左側の図は空気を混合せずに可燃性ガスのみをバーナーから放出して燃焼させた場合であり、拡散燃焼が起こり拡散火炎が形成される。右図は可燃性ガスに空気を予め混合してバーナーから放出して燃焼させた場合であり、内側の火炎(内炎)では予混合燃焼が起こり予混合火炎が形成される。拡散燃焼では、燃焼は可燃性ガスと酸化剤である酸素を含む空気の境界で発生する、一方、予混合燃焼では燃焼前の未燃焼予混合ガスが燃焼反応帯で急速

に燃焼反応を開始し、この燃焼反応帯がすなわち予混合火炎である。予混合火炎は未燃焼ガスを加熱し燃焼を起こしながら未燃焼ガスに向かって伝ばしてゆく(バーナーではこの伝ば速度と未燃焼ガスの流速が釣り合っているため静止して見える)。つまり、予混合火炎は伝ばする性質がある。このため、可燃性の固体や液体上で拡散燃焼が起きている火災に比べ、ガス爆発時には予混合火炎が伝ばするため高速な現象となるわけである(図3)。

粉じん爆発では、燃焼するのは固体であるため拡散燃焼が起こることが予想されるが、固体が小さな粉末となると火炎の熱によりガス化する速度も速くなることなどの影響により、粉じん雲中の火炎伝ばが発生する。これが粉じん爆発現象である。

1.3 粉じん爆発の発生要因

以上のように、粉じん爆発は可燃性粉じんの燃焼現象であるため、燃焼の3要素として知られる燃料、着火源、酸素で粉じん爆発の発生に必要な要因を整理することができる。3要素を粉じん爆発に当てはめると、

- ・粉じん雲(燃料)
- ・着火源
- ・酸素

が粉じん爆発の3要素となる。これらについて以下に多少コメントする。

①粉じん雲

可燃性の固体を粉末状にした粉じんが空気中に分散した状態のもの(粉じん雲と呼ぶ)の存在が必要

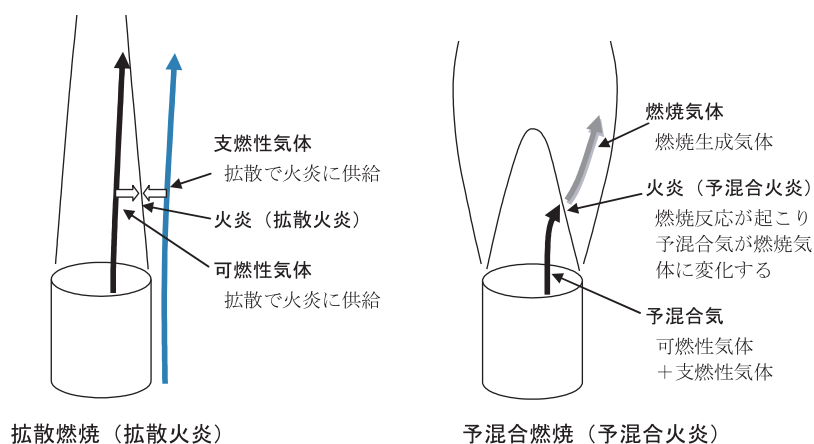


図2 燃焼の2つの形態

Fig. 2 Two types of combustion phenomena.

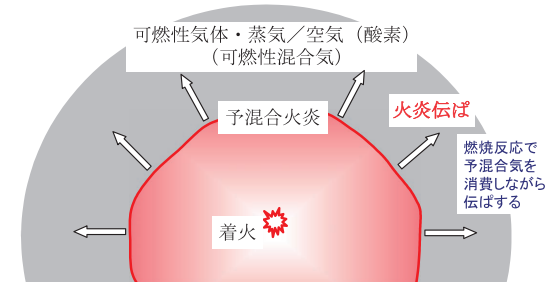


図3 予混合火炎の伝ぱ
Fig. 3 Flame propagation in a premixed gas.

となる。粉じん雲がある濃度範囲の場合に粉じん爆発が発生する。

②着火源

粉じん爆発が開始するためには、一定以上のエネルギーを与えて着火が起こることが必要となる。

③酸素

燃焼には酸素が必要である。酸素でなくとも支燃性の亜酸化窒素などでも燃焼は起きる。酸素濃度が低くなると粉じん爆発が発生しなくなる。

2 粉じん爆発の危険性評価と安全対策

2.1 粉じん爆発の過程と被害

粉じん爆発の一般的な過程について図4に示す。最初に可燃性粉体の空気中への分散が起こり可燃性粉じん雲が形成される必要がある。ここで前述の3要素の粉じん雲と酸素の条件が達成され、そこに着火が起こると粉じん爆発発生の要件がそろそろ。その後粉じん雲中を火炎が伝ぱし急速な温度上昇により圧力上昇が発生する。その結果、粉じん爆発の被害としては圧力上昇による建造物の破壊、周囲への圧力波の伝ぱ、燃焼による焼損などが発生する(図5)。爆発では圧力上昇による被害が大きくなる傾向があるが、粉じん爆発での圧力上昇挙動とガス爆発での挙動の比較を表1に示した。粉じん爆発でも、ガス爆発と同程度の圧力上昇を引き起こすことが分かる。以上の過程では、粉じん雲の形成に粉体の分散が必須であり、また発生空間は閉塞性があると分散した粉体の濃度が高まりやすかつ圧力上昇が起きやすくなる。そのため、分散と閉塞性を加えた「燃料、酸素、着火、分散、閉塞性」を粉じん爆発の5要素あるいはそれを図6のように図示して粉じん爆発発生の5角形と呼ぶこともある。

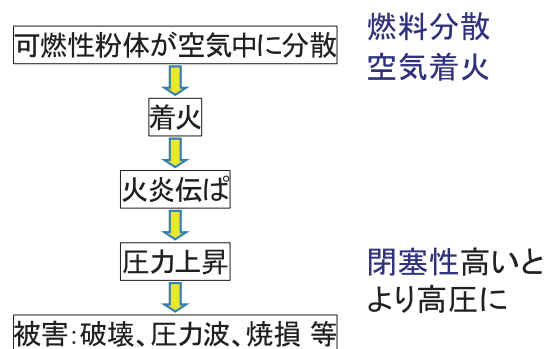


図4 粉じん爆発の一般的な過程
Fig. 4 Ordinary process of dust explosion.

- 火炎伝ぱ ⇒ 熱的影響(焼損等)
燃焼生成ガス
- 圧力上昇 (この影響が重大)
⇒ 建造物等の破壊
破壊物の飛散
爆風の伝ぱ

図5 粉じん爆発の主な被害
Fig. 5 Main damages by dust explosions.

表1 圧力上昇の特性
Table 1 Characteristics of pressure rise.

物質	最大圧力上昇速度 (爆発指数 K_{St}) MPa m/s	最大爆発圧力 MPa
ポリエチレン粉 (69 μm)	12.3	0.84
木粉 (43 μm)	10.2	0.95
アルミニウム粉 (12 μm)	47.5	1.20
メタン (気体)	5.5	0.73
水素 (気体)	55.0	0.70

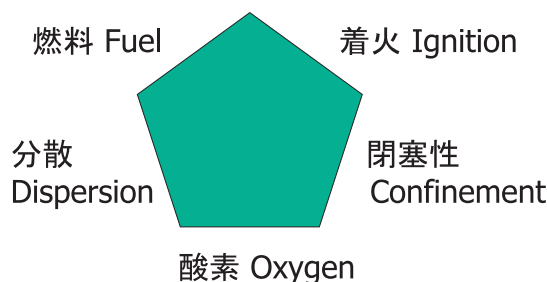


図6 粉じん爆発発生の5角形
Fig. 6 Hexagonal of dust explosion.

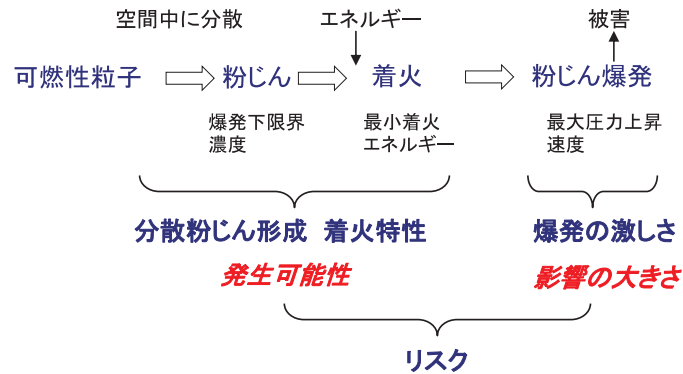


図7 粉じん爆発事故の一般的なシナリオ
Fig. 7 Ordinary scenario of a dust explosion.

爆発発生特性(発生可能性)

- 爆発の発生する条件
- 爆発の発生可能性の見積り

爆発強度特性(被害の大きさ)

- 爆発が発生した時の激しさ
- 爆発が発生したときの被害の大きさの見積り

$$\text{リスク} = \text{発生可能性} \times \text{被害の大きさ}$$

図8 リスクによる爆発危険性評価
Fig. 8 Estimation of explosion risk.

爆発発生特性(発生可能性)

- 爆発下限界濃度、爆発上限界濃度
- 発火温度
- 最小着火エネルギー
- 爆発限界酸素濃度

爆発強度特性(被害の大きさ)

- 最大爆発圧力
- 圧力上昇速度(爆発指数)
- 火炎速度

図9 爆発危険性評価と特性値
Fig. 9 Estimation of explosion risk and characteristic values.

2.2 リスクを考慮した危険性評価

近年、事故等の危険性の評価にリスクの考え方がしばしば取り入れられている。リスクは、危険現象を、その「発生可能性」と事故発生時の「被害の大きさ」の2つの指標の組み合わせとして表すものであり、これらを定量評価することでリスクの算定、比較などがおこなわれる。

粉じん爆発事故の一般的なシナリオを図7に示すが、ここでリスクの考え方を入れると粉じん雲の形成と着火が「発生可能性」を決める過程となっており、着火後の爆発の激しさが「被害の大きさ」を決める過程となっていることが分かる。

このような考え方で爆発危険性の評価をまとめると図8となる。このように、発生可能性は爆発発生特性により、被害の大きさは爆発強度特性により評価することでリスクを考慮した危険性の評価が整理できる。

粉じん爆発の危険性評価のための特性値がいくつか使われているが、これらの特性値を上記の爆発発生特性と爆発強度特性に分類すると図9のような

り粉じん爆発の発生可能性と被害の大きさについての評価をおこなうことができる。

2.3 粉じん爆発の爆発危険性評価の特性値

前述の粉じん爆発の危険性評価のための特性値は、ある試験条件において粉じん爆発の危険性を測定したものである。したがって、物質の物性値ではなく測定する装置や条件に依存する値であることを理解しておく必要がある。測定方法や条件を合わせるため、多くの測定方法はJIS等で標準化されている。

これらの特性値の主要なものについて説明する。

- ・爆発下限界濃度 (JIS Z 8818)

粉じん雲の濃度が薄すぎても濃すぎても粉じん爆発は発生しない。粉じん爆発が発生する薄い方の限界濃度を爆発下限界濃度、濃い方を爆発上限界濃度という。安全管理上重要な爆発下限界濃度がしばしば用いられる。爆発上限界濃度は、試験装置で測定困難な場合が多い。燃焼の3要素の「①粉じん雲」の存在に対応する。

爆発下限界濃度の測定値の一例を図 10¹⁾ に示す。同じ材質でも粒径により数値が変化し、粒径が小さいほど下限界濃度が低く、爆発発生危険性が高いことが分かる。

また、図 11¹⁾ に着火エネルギーを変化させた時の爆発限界を示した。これより、着火エネルギーを大きくすると、爆発する濃度範囲が広がることが分かる。すなわち、特性値は条件により変化するわけである。実際には測定法の規格を定めて、ある決まった条件で特性値を測定することにより、比較可能な値として求めている。したがって、対象とする危険箇所の条件と、特性値を測定している条件に違いがある場合はその点も考慮して特性値を用いる必要がある。

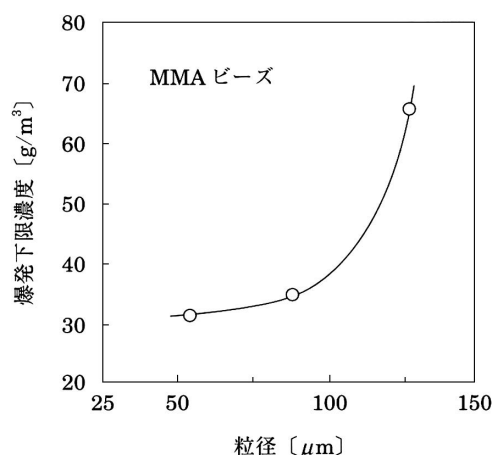


図 10 爆発下限界濃度（粒径の影響）¹⁾

Fig. 10 Lower explosion limit (dependence on particle diameter)¹⁾.

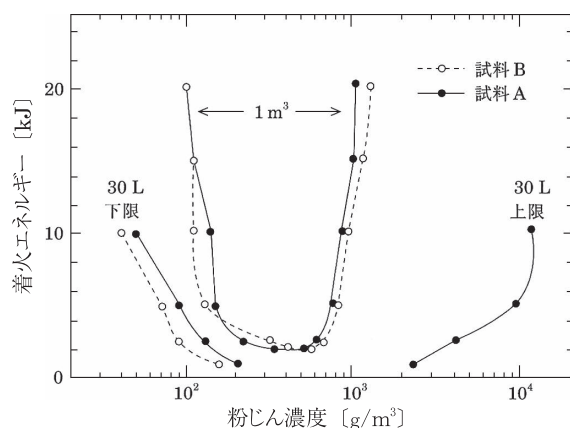


図 11 爆発上下限界濃度（着火源の強度の影響）¹⁾

Fig. 11 Upper and lower explosion limits (dependence on the intensity of ignition source)¹⁾.

・最小着火エネルギー（JIS Z 8834）

着火に必要な最小の着火エネルギーである。電気火花のエネルギーを変えながら最小の着火エネルギーを測定する。着火可能な最小のエネルギーは粉じん雲の濃度に依存する。任意の濃度で着火可能な最低のエネルギーとするために、濃度を変えながら測定した最小の値を最小着火エネルギーとしている。燃焼の 3 要素の「②着火源」の条件を規定する値となる。

・限界酸素濃度

粉じんを分散する空気に含まれる酸素濃度がある濃度以下に低下させると粉じん爆発が発生しなくなる。この酸素の濃度を限界酸素濃度と呼ぶ。燃焼の 3 要素の「酸素」の存在に関するものであり、限界酸素濃度以下の酸素濃度の条件では粉じん爆発が発生しないこととなる。限界酸素濃度は、一般にゼロではない有限の値である。したがって、例えば窒素バージで粉じん爆発発生対策をする場合、酸素濃度を完全にゼロにしなくても、限界酸素濃度数以下にすれば粉じん爆発の発生を防ぐことができるわけである。

・最大爆発圧力（JIS Z 8817）

この最大爆発圧力と圧力上昇速度は、前述の「爆発強度特性」に関するものとなる。最大爆発圧力は、密閉容器内で粉じん爆発を発生させた時、容器内の圧力がどこまで上がるかを測定したものである。

・圧力上昇速度（爆発指数，JIS Z 8817）

密閉容器内で粉じん爆発を発生させた時に、圧力が上昇する速度の最大値を測定したものである。圧力上昇速度の最大値は、容器の体積が大きいほど小さくなる傾向がある。そこで、以下で示される爆発指数 K_{St} を用いて体積に依らない値に換算して用いられる。

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} V^{1/3}$$

ここに、 $\left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max}$ は最大圧力上昇速度、 V は容器の体積である。

2.4 粉じん爆発の安全対策（リスク低減対策）

粉じん爆発の安全対策としては、そのリスク低減と考えると、前述のように「発生可能性」を小さく

しかつ「被害の大きさ」も小さくすることが求められる。

ただし、発生可能性の低減は粉じん爆発の発生防止、被害の大きさの低減は万一爆発が起こった時の被害軽減となるため、発生可能性の低減により注力する場合が多い。以下に、発生の防止と被害の軽減および主要な工程での管理事項について述べる。

①粉じん爆発発生の防止

粉じん雲、着火源、酸素（3要素）が揃わなければ爆発は起こらない

・粉じん雲濃度の制御

粉じん雲の発生を抑える、あるいは少なくとも爆発下限界濃度以下にする。粉じん雲には濃度分布があることに注意が必要であり、粉じん発生源近傍は通常濃度が高いまた、粉じん爆発で発生した爆風で堆積粉じん巻き上がり、二次的爆発を誘発することもある

・着火源管理

最小着火エネルギーを超える強度の着火源を発生させないようにする。

・酸素濃度低下

雰囲気酸素濃度を限界酸素濃度以下にすれば粉じん爆発は発生しない。効果は大だがコストがかかる（リスクの大きいアルミ粉体取り扱い工程などでよく用いられる）。

②粉じん爆発被害の軽減

爆発は高速現象であるため、火災のように発生後対応しても間に合わない。事前に設備化等をおこなって対応しておく必要がある。

・爆発放散装置（圧力を放散する）

破裂板、開閉式ドアなど爆発時の内圧上昇で開放し空間内の圧力の上昇を軽減する。密閉度の高い装置が爆発で全壊するのを防ぐ。

・爆発抑制装置（消火剤を吹き込む）

爆発の発生を瞬時に検出して水噴霧や化学消火剤噴霧をおこない初期の段階で爆発を止める。

・爆発伝ば遮断装置

ある装置で爆発が発生しても、配管やダクトでつながった隣の装置に爆発が伝ばしないように、高速遮断弁、遮断機能のある装置（ロータリバルブ、スクリュコンベア）を用いることがある。

・耐爆発圧力衝撃構造機器（爆発しても装置内に封じ込める）

爆発が発生しても、その圧力上昇で壊れないように装置を設計しておき、封じ込めをおこなう。爆発放散装置で内容物を外部に放出させたくない場合等に用いる。

③主要な工程での管理事項

工程別の粉じん爆発事故発生割合は、図12²⁾のようになっている。事故割合の多いいくつかについて以下に説明する。

・集塵工程

集塵工程では粉じんは濃縮されるため、危険性が高い。バグフィルタでの事故が多い。

防止対策：帯電防止ろ布、アース、堆積物清掃等
被害軽減対策：爆発放散設備等

・粉碎工程

金属片の混入、粉体の摩擦熱などにより着火する事故が多い。

防止対策：異物混入防止（フィルタ）、装置内の堆積防止等

被害軽減対策：不活性ガスパージ、爆発放散設備等

・乾燥工程

高温熱源があり着火しやすい。流動層乾燥機等での事故が多い。

防止対策：供給量の適切な制御、過熱防止、可燃性蒸気（溶剤など）の排除、窒素パージ等

被害軽減対策：爆発放散設備、爆発抑制装置、耐

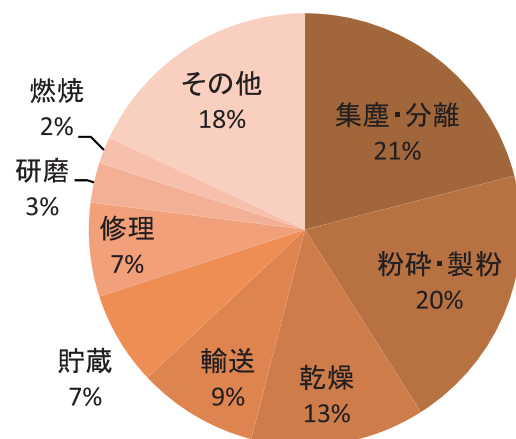


図12 工程別粉じん爆発事故発生割合²⁾

Fig. 12 Occurrence trend of dust explosion accidents for operation processes²⁾.

爆構造機器等

・輸送・貯蔵工程

可動装置の不具合による高温部分や静電気の発生などで着火することがある。バケットエレベータ、貯蔵ビンでの事故が多い。

防止対策：保守（不具合なくす）、異常の感知と対策、突起物をなくす、静置時間をとる等

被害軽減対策：爆発放散設備、爆発抑制装置等

3 まとめ

粉じん爆発とそのリスク低減対策について概説させていただいた。以下に概要をまとめておく。粉じ

ん爆発事故防止に少しでも参考になれば幸いである。

- ・粉じん爆発は燃焼現象によって発生する（火炎の伝ば現象）。
- ・燃焼の3条件（要素）が揃うと着火し爆発が発生する。これらの要素を揃えないようにすることが発生防止方法につながる。
- ・危険性評価（リスク評価）は発生可能性（爆発発生特性）と被害の大きさ（爆発強度特性）により検討できる。
- ・対策として、発生防止対策および発生後の被害軽減対策がある。
- ・効果的な対策を実施するためには、現象を適切に理解することが重要である。

References

- 1) (社) 日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会 編：粉じん爆発火災対策，オーム社，東京（2006）。
- 2) (社) 日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会 編：実務者のための粉じん爆発・火災安全対策，オーム社，東京（2009）。
- 3) 土橋 律，災害防御のための燃焼制御技術—火災・爆発安全への応用例—，日本燃焼学会誌，52 No. 160 (2010) 101-106。
- 4) 土橋 律，火災・爆発現象とその危険性評価・防止対策，バルブ技報，25 No. 1 (2010) 33-39。

〈著者紹介〉



土橋 律 Ritsu DOBASHI

〔経歴〕 1983 年東京大学大学院工学研究科修士課程修了。富士写真フイルム（株），東京大学大学院工学系研究科助手，助教授を経て，2005 年から現職。

〔専門〕 燃焼学，安全工学。最近は，主に火災現象，ガス・粉じん爆発現象の研究に取り組んでいる。

（一社）日本粉体工業技術協会粉じん爆発委員会委員長

〔連絡先〕 dobashi@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp