

産業現場の粉じんの爆発と火災について

独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所
化学安全研究グループ 統括研究員・部長代理

八島正明 *Masaaki Yashima*

1. 粉じん爆発と火災の発生状況と背景

産業現場において、1952年以降2015年までの64年間で把握されているだけでも373件の粉じん爆発火災が国内で発生している。ただし、炭じん爆発は除く。死傷者は869人（死亡132人、負傷737人）である。図1の折れ線で示されるように、発生件数は増減を繰り返し、減る傾向は見られない。2015年時

点で減少を示しているが、図に示していない2017年頃からの発生件数には増加傾向が見られる。2019年に報道された粉じん爆発と火災の発生状況を表1に示す。必ずしも粉じん爆発とはいえない可能性はあるが、赤字で示した粉を扱っている産業現場での爆発や火災が増加しているようである。

1987年以降2010年までに発生した粉じん爆発・火災の災害について、当研究所の調査結果より、原因となった粉じんを整理したも

図1 粉じん爆発・火災の発生状況（1952～2015年）

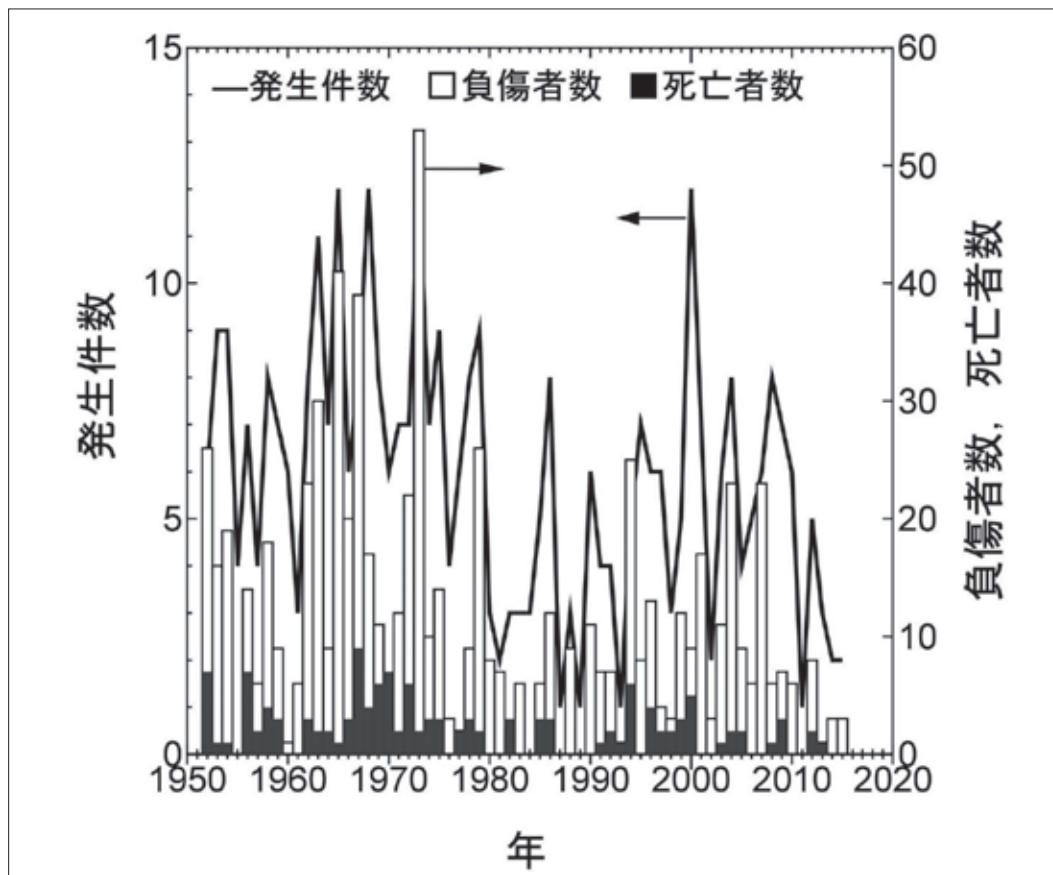


表1 2019年の発生状況

月	場所	概要
1	愛媛	製紙工場で燃料として使う木などを粉砕する機械から出火し、紙の原料のパルプを運ぶベルトコンベヤーの一部を焼いた。(死傷者0人)
2	埼玉	リサイクル工場で廃プラスチックを砕いて粉にしてタンクにためる作業中、タンクから火が出た。作業を行っていた3人にけがはなし。(死傷者0人)
2	富山	炭素を製造する工場で粉状の製品原材料(ポリシラン)を焼いた。けが人はいなかった。この工場では飛行機のエンジン部品などを製造していた。(死傷者0人)
5	福井	合金工場の金属片の粉砕エリアで爆発が発生し、2人が負傷した。(死傷者2人、うち死者0人)
5	長野	ぬかやもみ殻といった穀物の製粉工場の倉庫で粉じん爆発が発生した。(死傷者0人)
5	滋賀	アルミニウムの製造工場でアルミニウムの加工中に、設備の一部が爆発し、2人が負傷した。粉じん爆発かどうかは不明。(死傷者2人、うち死者0人)
7	三重	ポリアセタール樹脂製造プラントにおいて、ポリアセタール樹脂の中間保管ミキサーで爆発し、内部での火災が発生した。(死傷者0人)
7	茨城	アルミ材料乾燥前処理設備にて火災が発生した。粉じんの爆発あるいは火災かどうかは不明。別の工場ではこの5月に火災があった。(死傷者0人)
10	兵庫	金属シリコンを粉砕し、集じんする作業中に爆発が発生した。(死傷者2人、うち死者0人)
11	香川	飼料用のトウモロコシ粉を貯蔵したサイロのそばで、バケットエレベーターを溶接で修理していたところ、サイロが爆発した。(死傷者2人、うち死者0人)

表2 爆発・火災災害の原因となった可燃性粉体の種類と件数
(1987～2015年)

粉体	件数	粉体	件数
アルミニウム粉及びその合金粉	28	松脂(ガムロジン)	1
マグネシウム粉及びその合金粉	19	ゴム	2
タンタル粉	2	ビスフェノールA	3
チタン粉	3	ABS樹脂粉	1
亜鉛粉	1	ポリエチレン粉	1
クロム粉	1	ポリスチレン粉	1
ジルコニウム粉	2	粉体塗料	1
フェロマンガン粉	2	ポリビニルアルコール	1
希土類金属粉(合金粉)	2	トナー	5
ステンレス粉	1	樹脂粉(詳細不明)	1
金属粉(詳細不明)	3	有機化合物粉体	1
ケイ素粉	6	ステアリン酸亜鉛粉	1
紙粉	4	ステアリン酸鉛粉	1
石炭粉	5	テレフタル酸	1
活性炭	2	パラニトロフェノキシアセトン	1
小麦粉	2	ベンゾグアナミン粉	1
穀物粉(詳細不明)	1	メチルセルロース粉	1
飼料粉	1	硫黄	2
ショ糖エステル	1	件数の合計	129
おから乾燥粉	1		4.4件/年

のを表2に示す。粉じん爆発を起こした粉の種類は時代によって変化しているが、古くから見られる農産物、木材などの天然有機物の

粉じんによる爆発・火災は相変わらず存在する。石炭は燃料用として一定の需要があり、貯蔵中に爆発や火災が発生している。原因物

質としては金属粉じんの割合が全体の半分を占め、特にアルミニウム、マグネシウムおよびその合金の割合が高い。これら軽金属の粉は浮遊しやすく、融点が低く、また火炎を形成して燃焼するものであり、さらに燃焼時の発熱量は大きく、燃焼温度も高く、激しい爆発となりやすいことから、事故が公になるような大きな災害が発生する。

電子機器などでは、軽量化、小型化、リサイクル化を図るため、軽金属の使用が増えている。代表的な軽金属であるマグネシウムについては、1980年代のダイカスト技術の開発、1990年代のチクソモールドニング^{※1}の携帯用電子機器製造への利用、その後自動車部品への適用量が増加している。1990年代から2000年代初めには、携帯用電子機器製造の際に生じたマグネシウム合金研磨粉じんによる爆発・火災が頻発した。近年、難燃性マグネシウム合金が開発され、航空機や新幹線の構造材料の一つとしての利用が検討されているという。筆者らが調べたところによると、この合金の機械加工で生じた研磨粉は可燃性であるので、難燃性にとらわれて爆発・火災の対策を怠ると、大きな事故につながる可能性がある。

レーザープリンターやコピー機の高性能化、低価格化が進み、トナー（粉）の使用量が増えている。トナーは基剤樹脂、顔料、電荷調整剤、ワックス、表面処理剤などからなる混合物で、8~9割は基剤のプラスチック樹脂からなり、カーボンブラックなどの顔料の割合は少ない。粉の大きさがそろっていて、平均粒径も10 μm（1 μm=1/1,000 mm）程度と小さく浮遊しやすい。また、トナーの最小着火エネルギー^{※2}は小さく、人体帯電による静電気放電レベルでも着火しうる。トナーは化学製品で有機物の一つではあるがマグネシウム、アルミニウムに続いて危険性が高い粉じんの一つに数えられる。公になった事例

は5件と少ないが、実際の災害は多いのではないかと推測される。このほか、最近の爆発事例は文献¹⁾に掲載されているので参照されたい。

2. 着火源について

当研究所の調査結果より1987~2015年に発生した粉じん爆発・火災の着火源と件数を表3に示す。着火源としては、摩擦（熱）と摩擦火花、静電気火花、衝撃火花が多く、最近では静電気火花が多くなっている。粉じん爆発が生じやすい工程としては投入作業が挙げられ、サイロや混合器に投入する工程、あるいはそれから排出する工程も含んでいる。この作業では空間に粉が舞い上がる状態となるため、最も危険性が高い。集じん工程でも粉が舞い上がることが多いため、爆発がよく発生している。非定常作業では保守にかかるガス溶断とアーク溶接が多い。

3. 金属粉じんの爆発や火災の事例

金属材料は空気中では燃えにくいですが、薄片や粒子状になると、空気中でも短時間に酸化、燃焼しやすくなる。表2に示したもののほかに真ちゅうの粉も空気中で燃焼し、爆発や火災の原因物質となりえる。一般にニッケルの粉は酸化被膜を形成しやすく、燃焼しにくいものである。しかし、不活性雰囲気中でサブミクロン（1 μm 付近の大きさで、0.5~3 μm 程度のもの）からナノ（1 μm よりもさらに小さいもの）サイズで製造された粉体で、保護的に作用する酸化膜（不働態）が形成されなければ、空気に触れただけで着火することがある。2019年、触媒用のニッケル粉を廃棄・保管中に自然発火による火災が発生しているが、これは反応防止のためニッケル表面を

※1
チクソモールドニング
米国のチクソ社が開発したマグネシウム合金を半熔融状態で射出成形する方法とその装置。鑄造法のダイカストに比べ熔融温度が低いので、寸法精度や機械的性質が向上する。

※2
最小着火エネルギー
粉じん爆発の着火に関しては、電氣的に火花放電で着火しうる放電エネルギーの最小値をいう。

表3 着火源と件数（1987～2015年）

着火源	件数	割合（％）
衝撃火花・摩擦火花	31	23
高温熱面	18	14
裸火	4	3
静電気火花	36	27
電気火花	3	2
ガス溶断, 電気溶接	9	7
自然発火	12	9
くすぶり・燃焼粒子	7	5
不明	12	9
合計	132	100

覆っていたコーティング層が劣化し、ニッケル表面が空気に触れ、酸化・発熱したことが原因であった。

鉄の粉は空気中でも燃焼する。鉄粉を保管中に雨水が混入すると、発熱し、蓄熱して発火することが知られている。ステンレス鋼は表面に不動態を形成して化学的には安定ではあるが、細かい研磨材を素材の表面に打ちつけて行うショットブラスト加工で生じたステンレス鋼の微粉が加工直後に発火する事故が連続して起きている。比重の大きな金属粉では浮遊状態で爆発しなくとも、堆積状態で火災になる場合も多い。鉄やステンレス鋼の粉の燃焼は表面燃焼を呈し、アルミニウムやマグネシウムとは異なり火炎は形成されず、粉表面が赤熱した状態で燃える。

2018年9月、台風21号による神戸港内の六甲アイランドの高潮により、マグネシウム混合物を貯蔵したコンテナから出火し、火災が発生している。水との反応で発熱し、自然発火が原因であった。同年7月には、西日本豪雨により岡山県総社市のアルミ工場で水蒸気爆発が発生している。近年、自然災害に起因する爆発や火災が産業災害のキーワードの一つになっている。

4. 金属粉の反応性

(1) 金属と水との反応

危険性評価のため、各種金属粉について発熱挙動などが調べられている^{2)~4)}。金属粉には消防法の禁水性物質（GHS分類では水反応可燃性化学品）に該当するものもある。消防法危険物第3類に定める水との反応性試験はよく知られている。マグネシウム粉とアルミニウム粉の発熱性に関して高感度の熱量分析を行った結果によると、湿度が高くなるにつれて発熱速度が大きくなることが明らかになっている⁵⁾。金属粉を保管するには水が混入しないように注意が必要である。

(2) 水素の発生

常温で水と反応し、水素を発生する金属としては、リチウム、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウム、鉄などがある。リチウム、ナトリウム、カリウムは禁水性物質としてよく知られ、水と激しく反応する。マグネシウムや鉄の反応性は粉状のものでは、粉の大きさに依存する。高温の水や水蒸気と反応する金属にはマグネシウムやカルシウムのほか、アルミニウム、チタン、ジルコニウム、タンタルなどがある。いずれも反応性は粉の大きさと温度に依存する。最近製造される電子材料用の金属粉については性能向

上のため微細化が施され、比表面積^{※3}の増加によって、従来データ¹⁾よりも危険性が高まっているようである。

ここで、一例として、マグネシウム合金研磨粉（平均粒径90 μm）と水との反応による水素の発生量を図2に示す⁶⁾。ただし、この測定では容器に水と粉を入れて、初めにかくはんした後は静置し、その後は粉の塊をほぐす程度で連続的にかくはんは行っていない。この図より、温度が高いと水素の発生が速いこと、長い時間水素を発生し続けることがわかる。ここでの水素の発生量は理論値の1/12~1/20である。マグネシウムは水との反応で水素を発生し、水酸化マグネシウムとなる。しかし、この程度の大きさの粉となると粉の中心まで反応が進みにくく、粉の内部が未反応で、マグネシウムのまま残る。水酸化マグネシウムは不燃であるが、マグネシウムは可燃である。産業現場で、廃棄のための粉を水に浸して不燃化を図ったつもりが（こ

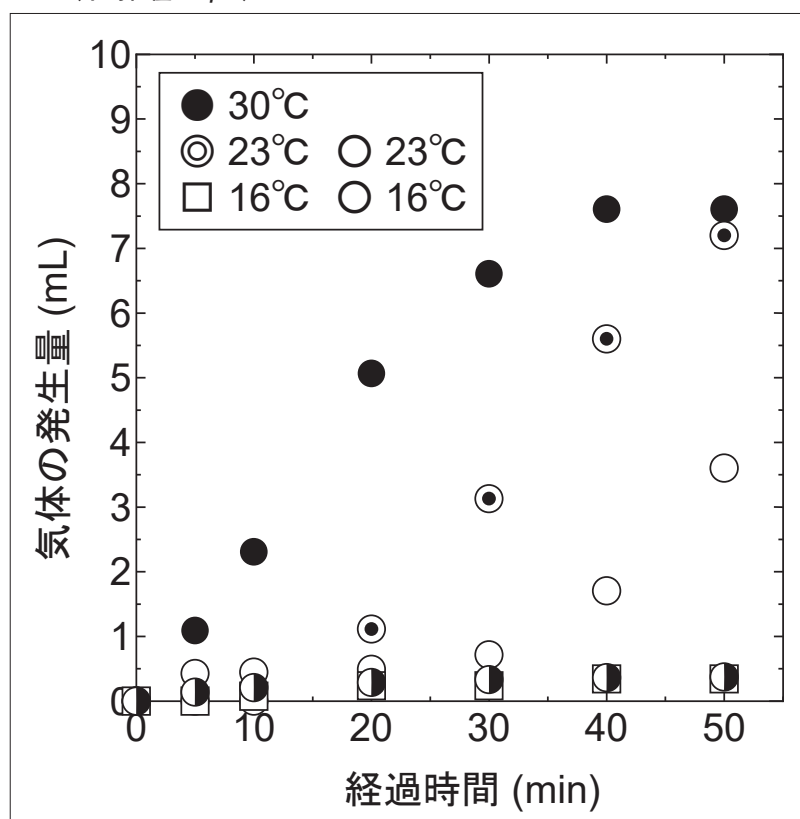
のとき水素が発生しているが）、脱水して乾燥した粉に種火を与えると着火し、むしろ激しく燃焼する場合がある。

また、水素が発生するとなれば、閉空間にガスが滞留することでガス爆発の危険性加わる。粉の表面から水素が長時間発生しているという状況では、粉自体では着火しないであろうレベルよりも小さいエネルギーで着火しうる危険性がある。

(3) 爆発の危険性評価

粉じん爆発では、平均粒径に対して、爆発下限濃度、最大爆発圧力、最大昇圧速度、爆発指数^{※4}、最低着火温度、最小着火エネルギーなどを測定し、危険性が評価される。このとき注意しなければならないのは、同じ物質名の粉じんであっても爆発の危険性が粉の大きさ、形状、粒径分布に強く依存するため、実測が基本であるということである。ガスに比べて危険性に影響する因子が多いといえ

図2 マグネシウム合金研磨粉の時間経過に対する水素の発生量⁶⁾
(平均粒径 90 μm)



※3
比表面積
単位質量の粉体（群）あたりの全粒子の表面積。単位 [cm²/g あるいは m²/kg]。比表面積測定装置で求められるが、個々の粒子の値ではなく、平均化したものである。

※4
爆発指数
耐圧製の爆発容器内で粉じん濃度を変えて爆発試験を行い、爆発の際の圧力変化より、(最大昇圧速度) × (爆発容器の容積)^{1/3}で求められる値のうち、最大の値をいう。1/3乗とするのは大小の容器の大きさを標準化するため。

る。粉じん爆発では爆発指数がよく使われ、さらに爆発指数を単純化し、4段階にクラス分け（「Stクラス」という）されて評価されることもある。Stクラスは、St 0：不爆、St 1：弱い爆発、St 2：強い爆発、St 3：激しい爆発とする。St 3に該当する金属粉としてはアルミニウム粉とマグネシウム粉で、ほかの金属の多くはSt 1の範ちゅうに入る。労働安全衛生規則では、この二つの金属粉を爆燃性の粉じんとし、第282条において爆発の危険のある場所で着火源となる電気機械器具を使用するときは防爆性能を有するものを使用するように定めている。可燃性の粉じんを取り扱う場合には、全般として除じんなどを行い、爆発や火災の発生の防止が求められる。それでも爆発の危険性のある濃度に達するおそれのある場所では、防爆性能を有する電気機械器具を使用しなければならない（第281条）。

（4）燃焼における限界酸素濃度

金属が粉状になると、酸素の濃度が空気より低くとも燃える場合がある。限界酸素濃度とは、空気を窒素や二酸化炭素などで希釈して酸素濃度を減少していった場合に爆発する限界の酸素濃度をいう。金属粉の限界酸素濃度は有機物のそれよりも小さいものが多く、一般に有機物が11～15%に対して、金属は0～10%である。タンタルの粉は0%に近く、酸素がわずかに存在する環境下で燃焼する。

5. まとめ

以上、粉じん爆発と火災の全般の発生状況を述べ、最近の発生件数が増加していること、着火源としては静電気が多いこと、金属粉じんについて産業現場での発生状況、水との反応性、水素に発生による危険性、爆発の危険性について簡単に述べた。マグネシウムにつ

いては、1990年代から2000年代初めに粉じん爆発・火災が頻発し、産業団体と行政による啓発活動・防止策が施され、また現場での安全教育が進められ、確実に減少した。アルミニウムについては、粉じん爆発・火災が減少していないため、さらなる対策が求められている。新規化学物質が日々開発され、粉体技術の進展とともに、さらに新たな合金や機能性が付与された粉体が作られている。粉じん爆発と火災に対して、単に物質名だけではどの程度の危険性があるのかわからなくなっている。粉体を取り扱う上での難しさがここにある。

参考文献

- 1) (一社)日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会編：粉じん爆発・粉体火災の安全対策-基礎から実務まで、オーム社、2019.
- 2) 岩田雄策、古積博：マグネシウム粉の微少発熱挙動、第40回安全工学研究発表会講演予稿集、147-148、2007.
- 3) 東京消防庁：消防機関における研究活動報告-金属火災に関する検証、火災、58(2)、46-51、2008.
- 4) 内田浩司、新井充、清水芳忠：金属粉の発火・発熱危険性評価に関する研究、第44回安全工学研究発表会講演予稿集、185-188、2011.
- 5) 岩田雄策：金属粉の微少発熱挙動に与える湿度の影響、消防研究所報告、No.112、13-20、2012.
- 6) 八島正明：マグネシウム合金を扱う金属加工工場における粉じん爆発火災、火災66(6)、25-32、2016.

やしま●まさあ

東京大学大学院博士課程修了。高圧ガス保安協会を経て、労働省産業安全研究所に入所、機関統合を経て2019年から現職。機械工学、化学工学、燃焼学を専門とし、可燃性粉体の燃焼危険性、堆積層内の燃え拡がり、火災抑止、消火、ガス溶断器具の劣化・不具合調査、労働災害調査などに従事。