

静電気による金属粉じん爆発災害の動向と事例

独立行政法人 産業安全研究所 山隈 瑞樹*

1. はじめに

数年ほど前、マグネシウム(Mg)とアルミニウム(Al)の合金(以下、マグアル合金という。)を材料とする電子機器用部品の加工を行う工程で粉じん爆発災害が多発したことがあった。とりわけ研磨(鑄造品のバリ取り、パフ仕上げ等)及び集じん作業中に集中的に発生した。金属粉じんは爆発力が極めて大きいので、少量であっても被害は甚大なものとなる場合が多い。相次ぐ爆発災害を受けて、厚生労働省は通達を出し、関係業界への指導を強化した¹⁾。その後、現在まで大きな災害はなく、ひとまず小康状態にある。しかし、本来危険な物質であり、益々需要が伸びる傾向にあるので、依然として予断を許さない状況にあることに変わりはない。そこで、今回は金属粉じんの危険性及び静電気との関連を中心に、事例とともに解説を試みる。

2. マグアル合金の特長と危険性

携帯電話、ノート型PC、MDプレーヤ等の携帯型情報端末、オーディオ機器等の発達に伴い、その筐体の材料としてマグアル合金の需要が高まっている。純粋なMgは化学的活性が極めて高いので、鑄造、研磨等の加工の際に発火の危険があるが、合金にすると大幅に安定化する。マグアル合金のうち、電子機器の筐体用として使用量が最も多いものは、Mg約90%、Al約10%(他にZn、Mn等微量含む)のものであり、加工の容易さ、軽量、強靱さ、衝撃吸収性の良さ、導電性(電磁シールド性)、樹脂に比べ耐熱性・放熱性に優れる、金型へのダメージの少なさ、リサイクルに適する、という機能的、経済的及び社会的要請に対応する特長がある²⁾。

一方、これら金属粉じんは静電気放電程度の小さなエネルギーで着火し、特に浮遊状態では爆燃する。粉じんの危険性は、着火感度及び爆発の威力によって評価される。主な粉体については表1

* 同所 物理工学安全研究グループ主任研究官

表1 各種浮遊粉じんの爆発危険特性

粉じん	平均粒子径 [μm]	爆発下限濃度 [g/m ³]	最大爆発圧力 [bar]	最大圧力上昇速度 [bar·m/s]	発火温度 [°C]	最小着火エネルギー [mJ]
アルミニウム	22	30	11.5	1100	500	
マグネシウム	28	30	12.5	508		
マグネシウム	240	500	7.0	12	760	
シリコン	< 10	125	10.2	126	> 850	54
亜鉛	21	250	6.8	93	790	
トナー	< 10	30	8.7	137	530	< 1
小麦粉	56	60	7.4	42	470	400
褐炭	40	60	8.6	108	440	> 4000
セルロース	51	60	9.3	66	500	250

表2 金属粉じんの爆発災害事例（静電気に起因すると考えられるもの）

年月	発火粉じん	災害の概要
H 1. 1	マグアル合金	マグアル合金製鋳造品を手持式グラインダでバリ取り中研磨粉が発火した。(傷3)
H 2.12	クロム	クロム高純度化のための粉碎工程において、局所排気装置のダクト及び集じん装置(サイクロン及びバグフィルタ)が爆発した。(傷1)
H 4. 7	Mg-Al 混合物	耐火煉瓦の原料となる Mg と Al の混合粉 21kg を金属容器から高さ 1.5m のビニール袋内に投入し、途中で水を散布する実験中、袋内で爆発が発生した。(傷4)
H 7. 6	アルミニウム	飲料用アルミ缶のアルミ再生工場において、新規設備の試運転中にバグフィルタ式集じん機が爆発した。(傷2)
H 8. 4	アルミニウム	研磨作業で発生した Al 粉じんを集じん機から取り出すため、フィルタの払い落とし用のパルスジェットを動作させたところ、集じん機内で爆発が発生した。(傷2)
H 9. 4	タンタル	キャパシタの原料となる高純度タンタル粉の製造工場において、バグフィルタ式集じん機に溜まったタンタルの粉体をポリ袋に回収中、袋内で発火した。(死1, 傷1)
H10. 5	マグアル合金	Mg-Al 合金の鋳造品のバリ取り作業で生じた粉体をバグフィルタ式集じん機から回収中に爆発した。(死1)
H10. 9	マグアル合金	電子機器の筐体の研磨作業場において、バグフィルタ式集じん機のシェーキングレバーを手動で動作させて払い落とし中に爆発が発生、火災となった。(死1, 傷1)
H11.11	マグアル合金	停止中のバグフィルタ式集じん機から、底部に溜まった粉体を真空掃除機で吸引しはじめたところ爆発し、火災となった。(死1, 傷1)
H12. 9	マグアル合金	電子機器の筐体の研磨作業場において、バグフィルタ式集じん機から粉体を回収中に爆発した。(死1, 傷1)
H13. 8	マグアル合金	電子機器の筐体の研磨作業場において、集じん用のスチールパイプに溜まっていた研磨粉が爆発した。(傷8)

に示すようなデータが得られている³⁾。同表によれば、同様の粒径で比較した場合、Mg 及び Al 粉じんは最大爆発圧力が他の粉体に比べて若干大きく、さらに最大圧力上昇速度にあっては極めて大きい。しかも、爆発時の火災の温度は2,000 を超えるので、器物の損傷以外に火災を誘発したり、作業者に重篤な熱傷を負わせる例が少なくない。

3. 最近の金属物じん爆発災害の傾向

ここ数年の金属粉じん爆発に起因する労働災害事例のうち、静電気との関連が深いと考えられるものを表2にまとめた。最近になるほどマグアル合金に関連する事例が増えている。このような災害増加の背景として次の点が指摘できよう。

加工場の拡散（専門工場から一般工場へ）

従来、Mg 及びその合金の危険性は関係業者には認識されており、加工を行う事業所は安全対策を施した専用の設備を有し、労働者への教育・訓練を十分行った後に従事させていた。しかし、近年の需要の急増の影響で、適切な設備・労働者を有していない事業所までもが既存の設備を転用し

て加工を手がけるようになってきた。なお、日本マグネシウム協会は、会員に対し講習会の実施、安全マニュアル⁴⁾の配布等の教育・指導を熱心に行っている。

軽金属の帯電性、発火性に関する知見の不足と対策技術の不備

マグアル合金は純粋な Mg よりも安定とはいえ、粉じん爆発は比較的容易に起こり得り、その威力も相変わらず大きい。また、表面が容易に酸化され、絶縁性の酸化膜を形成するため、流動、剥離等の物理的操作によって容易に帯電し、これが着火性の静電気放電の原因となる可能性がある。特に、バグフィルタとの関係での帯電性の評価は十分なされているとは言えない。更に、水と接触すると反応して水素を発生するので、着火性が高まることが指摘されている。このような性質を熟知した上で製造及び集じん設備を設計、施工、または運用している事業所は少ないようである。

4. 金属粉じんの静電氣的性質

金属は本来電気の良導体であるが、実際にはそ

技術情報

表3 金属粉じんのみかけの抵抗率

(a) マグアル合金 (バフ研磨)

$D_{50} = 48 \mu\text{m}$ (25.2 °C, 34.0 %)

測定電圧 [V]	抵抗率 [$\Omega\cdot\text{m}$]
1	3.0×10^{12}
10	5.3×10^{11}
30	1.8×10^{11}

(b) Al (切削粉)

$D_{50} = 288 \mu\text{m}$ (23.4 °C, 46.9 %)

測定電圧 [V]	抵抗率 [$\Omega\cdot\text{m}$]
1	5.0×10^7
3	1.6×10^7
10	2.3×10^6

の表面には空気中の酸素等との化合によって生成した絶縁性の酸化膜が存在する。このため、サイズが大きい場合には問題とはならないが、微粉体の集合である粉じんの状態になると無視できないほど大きな電気抵抗を示すことがある。筆者が実際に測定した例を表3に示す。測定電圧を上げると抵抗率が下がるのは一部の酸化膜が絶縁破壊を起こしているためであり、更に電圧を上げると完全に導通する。このように絶縁性を有することで、ポリエチレン等の樹脂粉と同様に帯電性を示すよ

うになる。例えば、Al 粉じんを用いて、バグフィルター式集じん機内で圧縮空気を吹き付けて粉体を払い落とした場合、並びにメッシュを用いてふるい分けを行った場合の帯電量を測定したとすると、前者では約100 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 、後者ではスチールメッシュに対しては0.5 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 、馬毛メッシュに対しては2 $\mu\text{C}/\text{kg}$ の電荷量が得られた。通常、0.1 $\mu\text{C}/\text{kg}$ を超えると警戒すべきレベルと見なされるから、特にバグフィルタとの関係では極めて危険な帯電レベルとなり得ることに注意しなければならない。

次にマグアル合金の静電気放電に対する感度について述べる。研磨粉を静電気放電で着火させる実験を行ったところ、浮遊状態及び堆積状態において、ともに10mJ 程度の静電エネルギーで着火した。ただし、堆積状態においては、放電回路に抵抗(300k ~ 1M)が必要であった。これは、放電エネルギー以外に放電持続時間の影響が大きいことを示している。

5. 災害事例

筆者が調査を行った事例のうち、教訓的な内容を含んでいるもの二件を紹介する。



写真1
爆発したマグアル合金回収用の集じん機

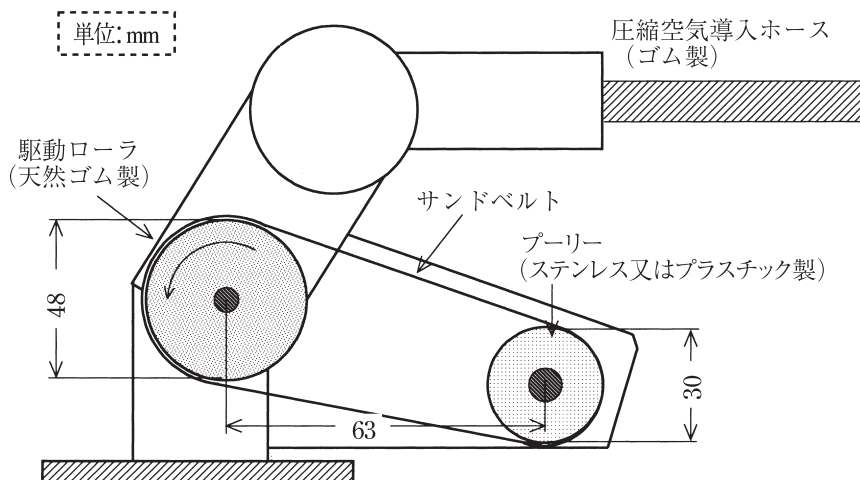


図1
マグアル合金用研磨機の構造

5.1 バグフィルタ式集じん機の粉じん爆発災害の概要

マグアル合金鋳造品の研磨工場において、労働者A及びBは朝の出勤直後、工場が本稼働する前に、前日までの作業でバグフィルタ式集じん機に溜まった研磨粉じんを回収し廃棄する作業に取りかかった。空気圧を利用した湿式の掃除機を動かすため、Aは集じん機からやや離れた場所でその準備に取り掛かった。その間、Bは集じん機の扉を開けて何らかの準備作業をしていたが、突然爆音がしたのでAが駆けつけると、集じん機の前でBが上半身に大やけどを負って倒れていた。Bは数日後合併症により死亡し、被災時の詳細な状況は聴取することができなかった。

災害原因の推定

被災時にBが何をしていただか不明であるが、会社側は、予めバグフィルタに付着した粉じんを払い落とす指示を出していたので、扉を開けて何らかの道具を用いて払い落としを行っていたと思われる。被災した集じん機(写真1)は、調査の結果、帯電防止型フィルタを備えており接地にも問題はなかった。ところが、現場を調査中、一部が焼けこげた細長い棒(長さ91cm、直径2cm。塩化ビニールの被覆あり。)が発見された。状況から推理して、被災者が使用したものと判断された。

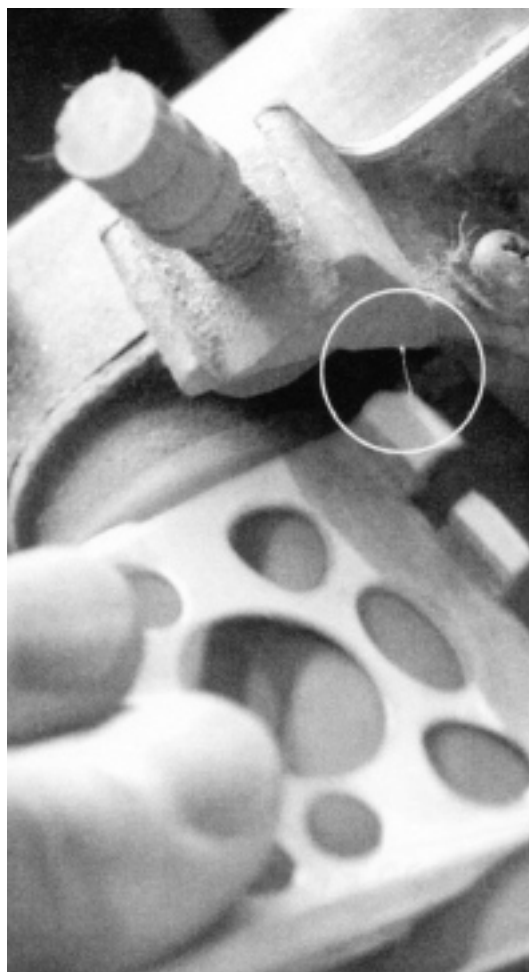


写真2 研磨中の静電気スパークの発生(円内)

技術情報

そこで、ほぼ同様の構造を有する金属棒を作り、帯電実験を行ったところ、フィルタ材料との摩擦により容易に10kV程度に帯電することが判明した。計算上、静電エネルギーは3mJ程度であったが、別途、同様の工程で採取した粉じんの最小着火エネルギーを測定したところ3mJ以下であった。この結果から、バグフィルタに付着した粉体を絶縁された金属棒で叩くことにより、フィルタとの摩擦及び帯電した粉じんが付着して金属棒が帯電し、フレーム等の接地体との間で放電が発生し粉じんに着火したと推定される。なお、本件災害に至る前に、会社側では粉じん爆発の予防策として研磨粉に硝石灰粉を混入して不活性化を図っていた。しかし、これが効果的であるためには硝石灰の含有率が80vol.%以上の均一な混合物にしなければならず、実際上は困難な作業であった。

5.2 鋳造品の研磨作業時の研磨粉の発火 災害の概要

卓上型小型研磨機を用いてマグアル合金鋳造品（携帯電話カバー）をバフ仕上げする工程で、研磨作業中の労働者の手袋が発火する事故が発生した。更に同工場以外の事業所においても、同種の研磨機を使用する工程で同様の発火及び労働者が電気ショックを感じるという苦情が寄せられた。

災害原因の推定

当該作業に用いられていた研磨機は、図1に示すように、リング状のサンドペーパーをローラで回転させるといった構造であった。ローラの駆動には圧縮空気（通常0.5MPa程度）が用いられていた（電気モータは、過熱や漏電による粉じんの発火が懸念されるためこの種の工程では使用されない）。ローラの材質は天然ゴムであり、プーリの材質はステンレス鋼またはポリエチレンであった。サンドペーパーの研磨剤はアルミナであった。

同研磨機を用いて、研磨作業時の帯電、特に、接地不良の作業者の電位変化を測定したところ、研磨開始と同時に急速に電位が上昇し、条件によっては、14kV以上に達することがあった。この

条件では、写真2に示すように研磨物と研磨機の筐体間で火花放電が発生した。更に、この放電でマグアル合金の堆積粉体が着火するか否かを試みたところ、研磨機が接地されている時には決して着火することはなかったが、接地線を外した場合には比較的容易に着火することが判明した。これは、4.で述べた堆積粉体の着火特性に合致する現象である。つまり、あえて接地線を外すことにより、研磨機と大地の間にテーブル、床等の高抵抗物体が入ることになり、放電の着火性を高めたのである。

以上のように、研磨作業においては不可避免的に静電気が発生し、可燃物及び放電の条件が整えば着火・爆発もあり得た。なお、その後研磨機の静電気対策用として導電性ゴムローラが開発され、市販されている。

6. あとがき

本件のように、産業技術や素材の変化により思わぬところで静電気災害が発生することがある。最先端のテクノロジーの陰には危険と隣り合わせで製造に携わっている多数の零細な事業所があること忘れてはならない。これら「末端」における作業工程及び労働者のレベルをも念頭に置いた上で、新しい技術に対応した安全対策の確立と普及に対して、より一層、努力すべきと考える。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成14年3月29日基安発第0329001号
- 2) 小川誠：「マグネシウム合金の需要動向と切削加工技術」, 第10回例会マグネシウム合金の切削加工技術と切削事例, 日本マグネシウム協会（2001）
- 3) 労働省産業安全研究所：可燃性粉じんの爆発圧力及び圧力上昇速度の測定方法, RIIS -TR -94- 1（1994）
- 4) 日本マグネシウム協会：マグネシウムの安全対策