

木質バイオマスの粉塵爆発特性

福岡大学工学部化学システム工学科

重松幹二

1. はじめに

木材切削の際に排出される製材屑は、直接燃焼やバイオエタノール化によるエネルギー源として有望である。しかし、その発生過程、輸送や貯蔵時には、他の可燃性粉体と同様に粉じん爆発¹の危険性に配慮しなければならない。粉じん爆発とは、空中に浮遊している粉じんが熱と圧力を発生しながら急激に燃焼する現象をいう。産業技術総合研究所のデータベース²によれば、近年、以下のような木材加工工場等での粉じん爆発事故が発生している。

- ・2002年 バット工場、集塵機内部での粉じん爆発、負傷者1名。
- ・2003年 木材加工工場、集塵機内部での粉じん爆発、負傷者3名。
- ・2004年 パーティクルボード工場、金属片火花による木屑貯蔵サイロでの粉じん爆発、死傷者なし。
- ・2004年 木質板製造工場、チップ貯蔵サイロ内での複数回の粉じん爆発、負傷者10名。
- ・2008年 市役所ボイラ棟、チップ搬入作業時における粉じん爆発、死傷者なし。

そこで本研究では、粉じん爆発に関連する測定から、様々な木質バイオマスの危険性の評価を試みた。

2. 木質バイオマス粉体の燃焼速度

まず、バイオマス粉体の火災延焼による危険性を評価するため、針葉樹、広葉樹、タケの鋸屑について高位発熱量³と国連燃焼速度試験⁴を実施した。高位発熱量はボンベ式熱量計で測定した。国連燃焼速度試験とは、危険物の輸送に関する国連勧告の評価方法であり、可燃性固体粉末を 250×20×10mm の三角柱状に寝かせ、バーナーで着火して燃焼時間を測定する簡便な方法である。燃焼速度が 2.2 mm/sec (=13.2 cm/min) 以上のとき、その物質はクラス 4.1 の易可燃性物質とみなされる。

¹ 粉じん爆発に関する成書：日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会(編集)「粉じん爆発火災対策」オーム社(2007)、「実務者のための粉じん爆発火災安全対策」オーム社(2009)

² リレーショナル化学災害データベース (RISCAD): <http://riodb.ibase.aist.go.jp/riscad>

³ 高位発熱量は、乾燥状態の物質を燃焼させたときに発生する熱量をいう。水蒸気が発生する場合は凝縮潜熱のために実際に利用できる燃焼エネルギーはこれより低い。これを低位発熱量と呼ぶ。

⁴ 国連燃焼速度試験は、海洋輸送する時などで表示するよう勧告されている。

United Nations, "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods/Manual of Tests and Criteria", 2nd Ed. (1995)

表1 木質系バイオマス(絶乾)の高位発熱量と国連燃焼速度試験の結果

	高位発熱量 [MJ/kg]	燃焼速度 [mm/s]
セルロース (75 μm 以下)	16.7	0.67
針葉樹鋸屑 (177~350 μm)	19.9	0.21
広葉樹鋸屑 (177~350 μm)	19.9	0.63
タケ鋸屑 (177~350 μm)	20.0	0.23

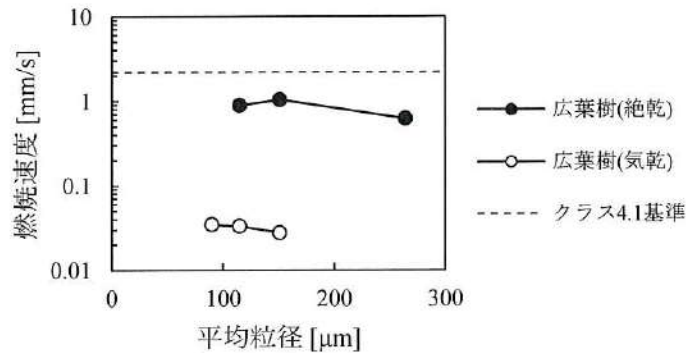


図1 広葉樹鋸屑の燃焼速度(国連燃速試験)

表1に示すように、木質バイオマスは約20 MJ/kgの高位発熱量を持つ。この値は、重量ベースで石油系燃料の約半分に相当する。燃焼速度は0.2~0.7 mm/s程度であり、国連クラス4.1の基準である2.2mm/sには及ばず、易可燃性危険物とはみなされなかった。粒子サイズの影響では、細かい粒子ほど燃焼が若干速い傾向が見られるが、その影響は大きくはなかった。乾燥状態の影響は大きく、気乾状態(含水率約8%)になるだけで燃焼速度は顕著に下がった。以上より、通常取り扱う状況では、延焼に対する危険性はさほど大きくはないと結論付けられる。ただし、燃焼速度が遅いだけであり、着火と延焼が進行する材料であることは間違いないため、可燃物であるという危険性の認識は忘れてはならない。

3. 粉じん爆発の危険性評価

粉体の粉じん爆発の危険性の特徴を示す「爆発下限濃度」の測定は、JIS Z8818 に規定されている⁵。これは、75 μm以下の粉体を空気流で飛散させて粉じん雲を生成させ、電気火花による試料の着火および粉じん爆発の有無を判定する方法である。ある濃度以下になると連鎖燃焼せず粉じん爆発しなくなるため、その最小濃度を爆発下限濃度として危険性の評価に用いる。その指標は、濃度40 g/m³以下を示すとき危険性が最も高いとされるが、100 g/m³以上であっても粉じん爆発の可能性を否定するわけではないため、軽視してはならない。一般に、粒径が小さいほど粉じん雲が形成しやすいとともに、表面積が大きくなるため連鎖燃焼が起きやすくなり、危険性が増す傾向となる⁶。

⁵ JIS Z8818「可燃性粉じんの爆発下限濃度測定方法」

⁶ S Calle, L Klabá, D Thomas, L Perrin, O Dufaud (2005) Influence of the size distribution and concentration on wood dust explosion: Experiments and reaction modeling, Powder Technology 157: 144-148.

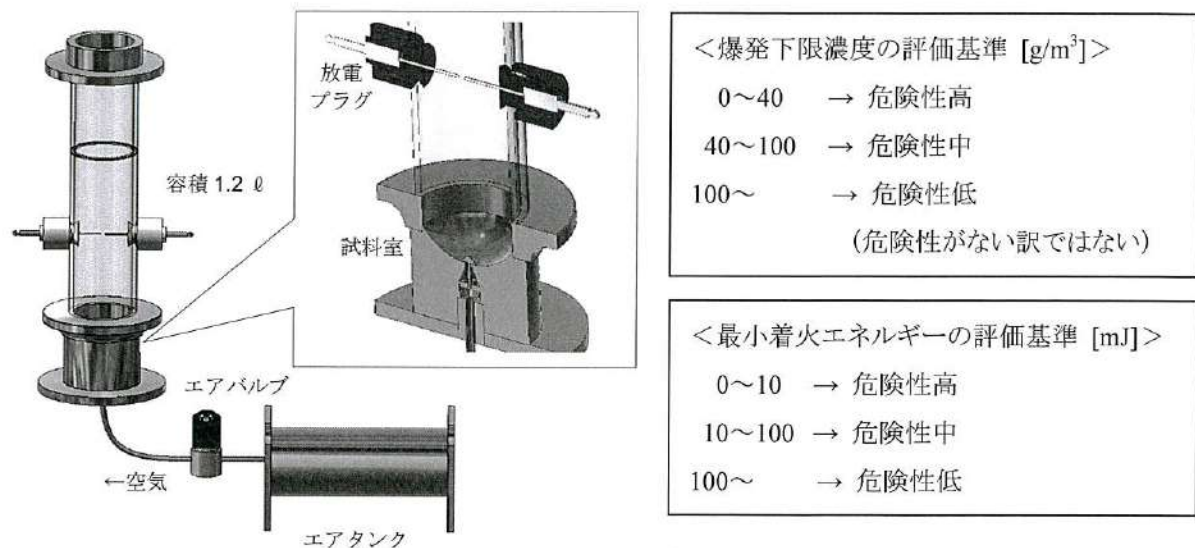


図2 吹上式粉塵爆発下限濃度測定 (JIS Z8818)

ここでは、JIS Z8818 に従い、吹上式粉じん爆発試験装置 (図2) により爆発下限濃度を測定した。なお、JIS では微細粒子である 75 μm 以下の粉体を用いて測定することとなっている。通常の鋸屑ではこのような微粉末は全体の数%であるが、この成分割合が少ないからといって危険性を軽視することはできない。なぜなら、微細粒子は空中に浮遊しやすく、その濃度が爆発下限濃度以上に達していれば粉じん爆発が発生する可能性がある。さらには、浮遊しやすい一部の粉じんが爆発することにより、その爆風が周囲の堆積粉じんを舞い上げ、2次爆発の危険性もある。そのため、JIS ではその存在量に関わらず、微細粒子画分の粉じん爆発特性を明確にするよう規定されている。なお、試験では石松子⁷を標準物質として使用する。

また、粉じん爆発の危険性に対する二つ目の指標として、最小着火エネルギーがある。すなわち、より低エネルギーで着火するものほど危険性が高いとみなす。これは、同装置を用いて、放電エネルギーを下げたときの爆発の有無で判定する。

3.1. 製材屑の粉じん爆発特性

木粉の粉じん爆発特性値の一例として、発火温度 430 $^{\circ}\text{C}$ 、爆発下限濃度 50 g/m^3 、最小着火エネルギー 20 mJ、最大爆発圧力 6.6 kg/cm^2 、最大昇圧速度 598 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{sec}$ と報告されている⁸。これら値は、木粉はおよそ中程度の粉じん爆発危険性があることを示している。しかし、その粒子形状や含水率などの影響については考慮されていない。そこで、様々なファクターを考慮した爆発下限濃度の測定を行った。

⁷ 石松子とはヒカゲノカズラの胞子で、内部に油分を多く含むため吸湿しにくく流動性が良く、燃焼しやすいため、粉じん爆発試験の標準物質として用いられる。爆発下限濃度は 40～45 g/m^3 である。

⁸ 例えば、飯塚義明 (2012) 粉じん爆発について: 化学と教育 50(3): 184-185

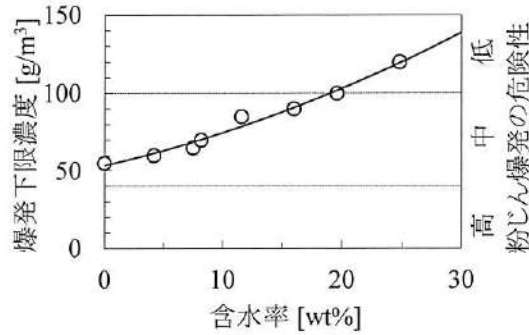


図3 セルロース粉末の爆発下限濃度

まず、セルロース粉末(アビセル)を標準試料として、爆発下限濃度に対する含水率の影響を測定した結果を図3に示す。絶乾状態では 55 g/m^3 の爆発下限濃度を示し、含水率が増すにつれて安全側へと移行した。しかし、含水率 20 wt%に至るまで 100 g/m^3 未滿の爆発下限濃度を示すことから、中程度の危険性があると評価される。含水率 20 wt%以上では爆発下限濃度が 100 g/m^3 を越えるため危険性は低いと評価されるが、粉じん爆発の発生を否定するわけではないため、十分な配慮が必要である。以上より、通常の保管状態と想定される気乾状態においても十分な安全管理を必要とし、特に乾燥処理など含水率を下げる工程においては危険性が増すことに留意しなければならない。

3.2. 切削方法が異なる鋸屑の粉じん爆発特性

続いて、異なる製材機からの製材屑は形状が異なると想定し、スギ板材から得られた5種類の製材屑の粉じん爆発特性を検討した。各製材屑の爆発下限濃度を図4に示す。製材屑の爆発下限濃度は $40 \sim 100 \text{ g/m}^3$ の範囲にあり、危険性は中程度と判定された。75 μm 以下の粒子サイズで比較した場合、丸鋸や帯鋸からの製材屑はほぼ同じで約 50 g/m^3 の爆発下限濃度を示し、ベルトサンダー屑はやや高い値を示した。含水率の影響では、当然ながら絶乾状態の方が危険であるが、含水率 8 wt%程度の気乾状態でも危険性はほとんど緩和されないことに留意すべきである。

粒子サイズの影響をみると、丸鋸や帯鋸からの製材屑は切削方向や切削刃の大きさに関わらず、粒子サイズが小さいほど危険性が高く、通常の粉体と同様の粒径依存性を示した。しかし、ベルトサンダー屑は粒子サイズが小さいほど爆発下限濃度が高く、一般的な傾向とは逆の結果が得られた。

ベルトサンダー屑の爆発下限濃度に対する特異な粒子サイズ依存性に注目すると、図5に示すように、ベルトサンダー屑は繊維状のため絡み合いやすく、他の製材屑に比べて凝集しやすいため、見かけの粒子サイズが大きくなり、粉じん雲が形成しにくかったのではないかと考えられる。

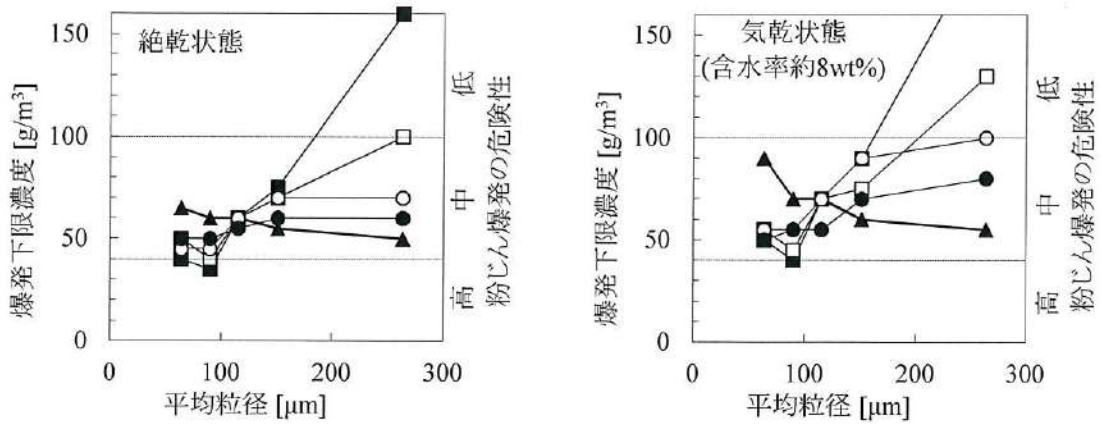


図4 各種製材屑(スギ)の爆発下限濃度に対する粒子サイズの影響

■帯鋸(大); □帯鋸(小); ●丸鋸(横); ○丸鋸(縦); ▲ベルトサンダー(#100)

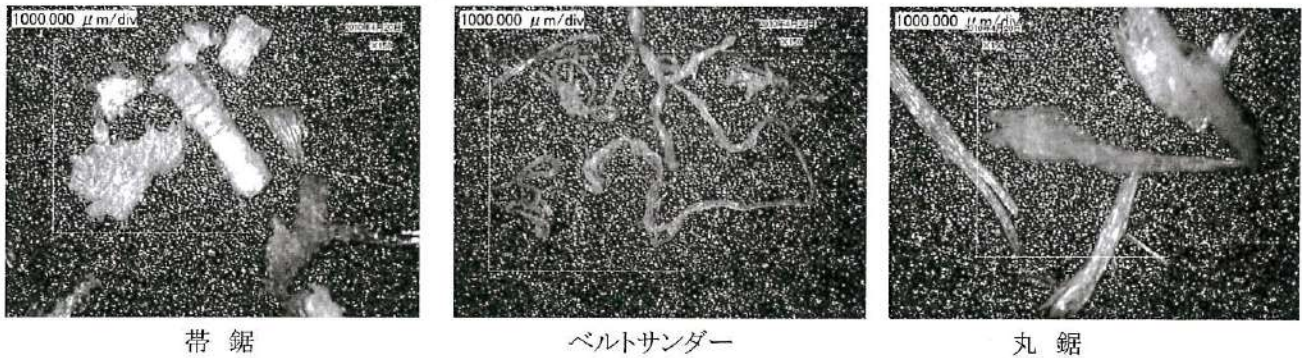


図5 各種製材機から排出されたスギ鋸屑の形状(いずれも 42~80 メッシュの篩面分)

3.3. 異種粒子混在による危険性

細かい粉体を多く含むベルトサンダー屑では、小さな粒子は凝集によって見かけサイズが大きくなり危険性が低下する反面、大きな粒子が混入するとその凝集が妨げられて危険性が増すことが考えられる。これを確かめるために、異なるサイズの製材屑を混合した場合の凝集挙動を調べた。

異種粒子混入によるベルトサンダー屑の凝集特性を表2に示す。まずガラス球を入れて200~270メッシュで分級したベルトサンダー屑を、ガラス球を入れずに再度200メッシュで篩い分けした。その結果、約30%が篩を通過しなかったことから、水平振動を与えることで凝集が生じることがわかった。一方、80~115メッシュのやや大きな帯鋸屑を混入させたところ、例えば7:3での混合比では凝集率は約24%に留まった。これは、大きな帯鋸屑がガラス球と同様に凝集を妨げる作用をしたと解釈できる。この結果から、ベルトサンダー屑に凝集しにくい形状の製材屑が混入したり、異なるサイズの製材屑が混ざった場合では、粉じん爆発の危険性が高まることが示唆される。

製材屑はその処分とエネルギー回収のため燃焼させることが多いが、特に形状の違いや異種サイズ粒子の混在に注意を払うことなく、そのまま焼却炉に投入されている。集塵機では異なったサイズの粉体が混在する状況になりやすく、危険性が高まることが考えられる。

表2 帯鋸屑 (80~115 メッシュ) を混合したベルトサンダー屑 (200~270 メッシュ) の凝集挙動

混合比 ベルトサンダー屑:帯鋸屑	200 メッシュ篩を通過しなかった ベルトサンダー屑 [wt%]
10:0	30.4
9:1	30.8
8:2	26.3
7:3	23.7

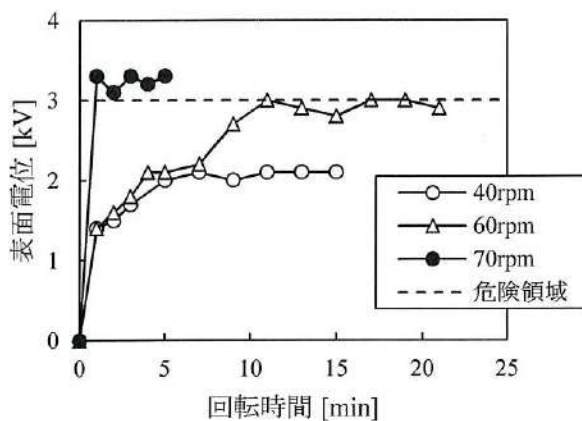


図6 セルロース粉末(絶乾)を回転ドラム中で流動させた時に発生するバルク表面電位

表3 バイオマス粉体を流動させた時に発生するバルク表面電位 (70 rpm での最大値)

バイオマス粉体	バルク表面電位 [kV]
セルロース (75 μm 以下)	3.3
針葉樹鋸屑 (177~350 μm)	2.0
広葉樹鋸屑 (177~350 μm)	2.4
タケ鋸屑 (177~350 μm)	3.2

4. 静電気発生特性

発火事故の原因として、機械摩擦や漏電スパークなどの火種以外にも、材料自身から発生する静電気によるスパークが考えられる。静電気は例えば、粉体を装置に投入するときは粉体と空気との摩擦、あるいは異種材料の粉体を混合するときの摩擦によって発生することがある。これらの作業工程では粉じん雲の発生を伴うことが多いため、粉じん爆発に至る危険性が高い。また、サイロ投入時に発生するバルク表面放電は、粒子径が大きいほど放電エネルギーが顕著に増加すると言われている。さらに、尖った形状ほど放電の可能性が高くなる傾向もある。つまり、粉塵爆発しやすい微粉末と、放電しやすい大きな粒子が混在するとき、相乗的に危険性が増す恐れがある。

バイオマス粉体と空気との摩擦により、実際にどの程度の電圧の静電気が発生するか、絶縁されたアクリル製ドラムを回転させて粉末試料を流動させ、粉末バルク表面の静電気を表面電位計で測定した。なお、静電気の危険領域は 3 kV 以上が目安となる。図6に、絶乾状態のセルロース粉末を回転流動させたときに発生する表面電位を示す。回転数により流動性を上げるほど表面電位が高くなり、70 rpm で激しく流動させたときには1分以内に 3.3 kV の表面電位に達し、静電気スパークの危険領域に達した。

表3は、種々のバイオマス粉体を流動させたときの最大到達表面電位を示す。針葉樹、広葉樹、タケで若干の差はあるが 2kV 以上のバルク表面電位が発生しており、加えてこれらの材料は絶縁体で静電気が蓄積

しやすいため、乾燥状態で取り扱う場合は十分な静電気対策を必要とする材料であるといえる。

5. 油分を含むバイオマスの危険性評価

木質バイオマス以外にも、脂肪系の油分を含むバイオマスであるコーヒー粕、ジャトロファなども、バイオディーゼル燃料の原料として多く研究されている。そこで、これらの危険性評価を行った。きな粉も比較的油を多く含む粉体であるため、比較のため行った。表4に示すように、油分を含むバイオマスは高い発熱量を示すが、国連燃焼速度試験や粉じん爆発下限濃度の危険性は、むしろ低いものが多かった。これは、油分を含むために粘着凝集性が高く、酸素との接触や粉じん雲の形成に対して影響したのではないかと考えられる。

表4 含油バイオマスの危険性評価

	含油量*	高位発熱量	燃焼速度	爆発下限濃度
	[wt%]	[MJ/kg]	[mm/s]	[g/m ³]
セルロース	-	16.7	0.67	55
コーヒー粕 (ドリップ)	16.8	24.0	鎮火	-
コーヒー粕 (エスプレッソ)	21.3	23.6	鎮火	35
ジャトロファ (胚乳部)	60.7	29.7	0.21	爆発なし
ジャトロファ (搾油後)	20.1	21.3	鎮火	140
きな粉	20.3	-	鎮火	75

* n-ヘキサン可溶量

6. まとめ

- (1) 今回の実験の範囲内では、国連燃焼速度試験のクラス4.1に相当する易可燃性のバイオマスは見出されなかった。ただし、これは延焼を否定するものではないため、十分な安全配慮は必要である。
- (2) アピセルセルロースを標準試料とした含水率の影響実験から、含水率の上昇とともに粉じん爆発の危険性は低下するものの、含水率20%程度でも中程度の危険性があることがわかった。
- (3) 各種製材機から発生する製材屑の爆発下限濃度は、絶乾・気乾を問わず 40~100 g/m³の範囲にあり、中程度の粉じん爆発の危険性があることがわかった。
- (4) ベルトサンダー屑は凝集しやすいため、一般とは異なり、粒径が小さいほど危険性がやや低下することがわかった。しかし、他の製材屑や異なるサイズの製材屑が混入すると凝集が妨げられるため、粉じん爆発の危険性が高まることが示唆された。
- (5) 乾燥状態のバイオマスは流動により静電気を発生し、危険領域である 3 kV 以上の表面電位を示す場合もあった。
- (6) 含油バイオマスは高い燃焼熱を持つが、粘着性で凝集しやすいため、延焼性や粉じん爆発の危険性はやや低かった。

7. 成果発表

- (1) 重松幹二、村上周宏、矢野 仁、コウハクル ワサナ、正本博士:製材屑の粉じん爆発特性:第62回日本

木材学会大会(札幌)P17-02-1045 (2012.3)

(2) コウハクル ワサナ、朝野 理、正本博士、重松幹二: 製材屑の粉じん爆発に対するリスク評価 - 静電気帯電特性 - : 第 62 回日本木材学会大会(札幌)P15-P-PM07 (2012.3)

(3) 原口雅央、戸高昌俊、内村俊介、コウハクル ワサナ、正本博士、重松幹二: 油分を含むバイオマスの粉じん爆発特性: 第 63 回日本木材学会大会(盛岡)P27-03-1100 (2013.3)

(4) M. Todaka, M. Haraguchi, H. Masamoto, M. Shigematsu, W. Kowhakul: Dust explosion and combustion of oily biomasses: jatropha and spent coffee grounds: 2nd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (Vilnius, Lithuania) PS1.05 (2013.8)