

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03849

研究課題名(和文)木質バイオマスの粉じん爆発

研究課題名(英文) Dust explosion of woody biomasses

研究代表者

重松 幹二 (Shigematsu, Mikiji)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：00242743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：木質バイオマスの粉じん爆発危険性をJIS Z8818によって評価した。樹種が異なる木粉を比較したところ、板材密度が高い樹種ほど粉じん爆発危険性が高い傾向がみられた。また、針葉樹では抽出成分の粘着性が安全側に作用し、広葉樹では着火性が作用している傾向がみられた。さらに、比較的粉じん爆発は起きにくい石炭や木炭に木質系バイオマスが少量混入することで粉じん爆発が生じやすくなった。一方で、トレファクション処理は木質ペレットの最小着火エネルギーを上昇させ、粉じん爆発危険性が緩和した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に板材では材密度が高い樹種ほど難燃性であると言われているが、粉じん爆発の危険性はこれとは逆の傾向を示したことが特徴的である。また、石炭や木炭と木質系バイオマスの混焼は粉じん爆発の危険性が高まること、木質ペレット燃料のトレファクション処理はエネルギー密度の向上や水分吸着能を下げる利点に加えて粉じん爆発危険性を低下させる効果もあることがわかった。ただし、不均質なトレファクション処理は未処理材が混入することになるため、ロータリーキルンなどの熱処理時には注意が必要である。

研究成果の概要(英文)：The risk of dust explosion of woody biomass was evaluated according to JIS Z8818. The comparison of the wood dusts in different species, the tendency of higher risk of dust explosion was observed in the species of higher board density. As the effect of extractives in wood, the sticky in softwoods acted to reduce the risk, and the ignitability in hardwoods acted to increase. Furthermore, a small amount of woody biomass mixed with coal or charcoal caused to raise the risk of dust explosion. On the other hand, the torrefaction treatment enhanced the minimum ignition energy of the wood pellets and reduced the risk of dust explosion.

研究分野：バイオマス利用学

キーワード：バイオマス 粉じん爆発 安全工学 燃焼 再生可能エネルギー 抽出成分 粘着性 着火性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、二酸化炭素排出抑制を目的として、製材屑を成形したペレット燃料、バイオエタノール原料としての微粉化処理、プラスチック複合材製造での混練工程など、バイオマスの新たな利用法や製造工程が導入されようとしている。また、ペレット燃料については、燃焼コントロールの向上のために木質バイオマスを直径 5~8 mm 程度に機械的に固めた木質ペレットが使用されている。さらに、燃焼熱の向上のために半炭化(トレファクション)処理した木質ペレットの実用化も進んでいる。しかしこれらは、振動等により崩壊ダストを発生するという欠点もあり、それが微粉末であれば粉じん爆発を引き起こす可能性がある。実際、木質ペレット工場で粉じん爆発事故が発生している。これらを安全に取り扱うには、製造過程、原料の輸送や貯蔵時において、粉じん爆発の危険性を認識して利用開発を進めなければならない。さもなければ福島第一原子力発電所や三重 RDF 発電所などのような重大事故を引き起こし、バイオマスが国民からの支持を失うことに成りかねない。

木質系材料の粉じん爆発事故は古くから報告されているが[1]、深く研究はされていない。それは、金属粉や炭塵と比べて規模が小さく危険性が低いと思われること、紙パルプ産業では湿式工程が多いことから、安全工学の専門家からは研究対象として注目されなかったためと思われる。木粉の粉じん爆発の測定結果はいくつか報告されているが[2]、それらは単に「木材」との記述があるだけで、樹種の違いや切削方法の違いには言及されていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、木粉の粉じん爆発危険性について、JIS Z8818 による爆発下限濃度(MEC)および最小着火エネルギー(MIE)の測定値で判定した。ここで、木粉の特性を表す独立変数には、樹種、粉体サイズ、含水率、切削方法に依存する粒子形状などが考えられる。特に含有する抽出成分が揮発性であれば着火性を促進し、粘着性であれば粉体凝集性を増して粉じん爆発を抑制すると考え、この相反する作用を抽出成分の量と質に注目し、樹種の違いについて明らかにすることを目的とした。また、木質ペレットからの崩壊ダストの粉じん爆発危険性について、トレファクション処理の影響も含めて判定し、運搬、貯蔵、燃焼時における安全指針につながる情報を提供することとした。

### 3. 研究の方法

サンプルはローターミルにより 75  $\mu\text{m}$  以下に粉碎し、絶乾状態を標準試料とした。粉じん爆発危険性は、JIS Z8818 による MEC および MIE の値で評価した。いずれのパラメータも低値ほど危険性が高いことを示す。

#### (1) セルロースおよびセルロース誘導体

バイオマスの主要構成成分であるセルロースを本研究の基準試料とした。ただし、セルロースには結晶形の違いにより吸湿性が異なるため、セルロース I 型と II 型を区別して取り扱った。さらに、セルロースの水酸基を種々の官能基に置換したセルロース誘導体も対象とし、吸湿性の違いによる粉じん爆発危険性を評価した。また、吸着水の挙動を見るため、粉体体積抵抗率を測定した。

#### (2) 樹種の異なる木質バイオマス

樹種の異なる針葉樹と広葉樹を準備し、粉じん爆発危険性を評価した。このとき、抽出成分の影響に注視して研究を行った。抽出成分には次の 2 つの作用が考えられる。ひとつは、可燃性揮発性物質が着火を促進させることで危険性が増すという化学的作用である。これを確かめるため、脱脂前と脱脂後での危険性を比較し、抽出成分が含有することで着火しやすくなるか調べた。もうひとつは、粉じんが気流で飛散し、粉じん雲が形成されやすいかという物理的な作用である。例えば、粘着性の抽出成分を含んでいれば粉じんは凝集しやすいため粉じん雲の形成が抑制され、結果として粉じん爆発の危険性は低下する。そこで、木粉の粉体凝集性を、安息角・圧縮度・スパチュラ角等から得られる流動性指数(いわば静摩擦係数に相当)ならびに崩壊角・差角・分散度等から得られる噴流性指数(いわば動摩擦係数に相当)を求め、樹種による木粉の粉体凝集性を評価した。また、抽出成分そのものの粘着性を、粘着テープの評価法であるピーリングテストで評価した。

#### (3) トレファクション処理した木質ペレット

スギ材の木質ペレットに対して、種々の温度において酸素欠乏下で加熱することにより、トレファクション処理を行った。この試料を再度粉碎して粉じん爆発危険性を評価するとともに、石炭や未処理木材との混合、種々の湿度下での危険性を評価した。また、吸着水の挙動を見るため、粉体体積抵抗率を測定した。

#### (4) スパイス

木材の粉じん爆発危険性に対する抽出成分の影響を検討する過程で、揮発性の芳香成分を多く含むスパイスについても木材の抽出成分と同様の作用があると考えた。そこで市販のスパイスについても検討した。ただし、スパイスの場合は熱乾燥を行うと成分の揮発が無視できないため、含有水分量のコントロールを工夫した。また、一部の試料は燃焼ガスの分析も行った。

### 4. 研究成果

#### (1) セルロースおよびセルロース誘導体

絶乾状態のセルロース I 型の MEC は  $55 \text{ g/m}^3$  と測定され、JIS Z8818 の評価基準で危険性レベル「中」と判定された。また、MIE は  $12.8 \text{ mJ}$  であり、静電気対策を必要とする危険性レベル「中」と判定された。

一旦絶乾状態となったセルロースは吸湿性が低下する。そのため、環境湿度を上昇させても MEC の上昇は小さく、例えば相対湿度 90% で吸湿させても MEC は  $85 \text{ g/m}^3$  までの上昇に留まった。一方で、MIE は相対湿度 90% で  $115 \text{ mJ}$  まで上昇し、危険性は大きく緩和したが、粉じん爆発が発生しないレベルには到達しなかった。セルロース II 型は絶乾状態で既に  $150 \text{ g/m}^3$  であり、相対湿度 25% において  $220 \text{ g/m}^3$  まで急激に上昇、相対湿度 57.6% になると  $400 \text{ g/m}^3$  の高濃度でも不爆と判定され、I 型と比べると安全性が高かった。

セルロース I 型について、乾燥履歴を経たものと、乾燥履歴を経ずに湿潤状態から順次乾燥したものを比較したところ、前者のほうが含水率は低いにも関わらず体積抵抗率は同等であった。セルロースは吸湿に伴い粉じん爆発の危険性が少なからず緩和するが、乾燥履歴を受けることで粉体内部への水分吸収が低下して表面に水分が局在化し、このわずかな水分で着火性が低下して粉じん爆発の危険性が緩和されると推定した。

セルロースの水酸基を置換したセルロース誘導体では、特に吸湿性が低いエチルセルロースの MEC が  $25 \text{ g/m}^3$ 、MIE が  $1 \text{ mJ}$  以下といずれも低く、極めて危険な粉体であった。さらには高湿度環境下でも吸湿量が低いため、危険性は緩和されなかった。

#### (2) 樹種が異なる木質バイオマス

針葉樹 6 種および広葉樹 14 種を評価したところ、その半数の 10 種はセルロースと同等の MEC 値である  $50 \sim 60 \text{ g/m}^3$  の範囲にあった。低 MEC のため危険性が高い樹種にはシタンとカリンが見いだされ、高 MEC でセルロースより危険性が低い樹種としては、針葉樹ではスギ、トドマツ、アカエゾマツ、アカマツが、広葉樹ではマホガニー、ナラ、ウルシ、タモが見いだされた。全体的に、材密度が高い樹種ほど MEC が低く危険性が高い傾向がみられた。ここで、一般に板材では材密度が高い樹種ほど難燃性であると言われており [3]、粉じん爆発の危険性はこれとは逆の傾向があった。また、抽出成分含有率が高い樹種の方が MEC が低く、危険性が高い傾向もみられた。

アルコール・ベンゼン混液での抽出成分の除去によって MEC が低下する樹種では樹木中の抽出成分が粉じん爆発の危険性を妨げる作用を持っていること、逆に MEC が上昇する樹種では樹木中の抽出成分が危険性を助長する作用を持っていることを示している。全体を概観すると、針葉樹では実験に供した 6 種のうち、抽出前の方が安全なものが 2 種、変化しないものが 4 種で、抽出によって安全側にシフトするものはなかった。また、広葉樹では実験に供した 14 種のうち、抽出前の方が安全なものはなく、変化しないものが 10 種、抽出によって安全側にシフトするものが 4 種であった。このように、抽出成分の作用には広葉樹と針葉樹とで逆の傾向がみられ、針葉樹では概ね粘着性が支配的に作用し、広葉樹では着火性が作用しているものが多いといえる。

なお、抽出成分を除去しても樹種による差異が完全に消え去るわけではなかったことから、細胞壁厚、リグニンや灰分の含有率の違いが影響しているものと考えられる。さらには、アルコール・ベンゼン混液では抽出されない成分が関与しているとも考えられる。

#### (3) 木質ペレットおよびそのトレファクション処理

バイオマス発電所での石炭、木炭、未処理バイオマスの混焼を想定し、これらの混合状態での粉じん爆発危険性を調査したところ、石炭や木炭は着火温度が高いため比較的粉じん爆発は起きにくいだが、着火しやすい未処理の木質系バイオマスが少量混入すると粉じん爆発を生じやすくなることがわかった。例えば、石炭とホワイトペレットの MEC はいずれも  $40 \text{ g/m}^3$  であるが、MIE は  $15.2 \text{ mJ}$  および  $2.3 \text{ mJ}$  と木材の方が低値であった。これらの混合物では、石炭に 25% の木材が混合するだけで MIE は  $1.7 \text{ mJ}$  まで低下し、危険性が高まった。

木質ペレットは燃焼熱の向上のため、半炭化処理 (トレファクション処理) が行われる。トレファクション処理は木質バイオマスが木炭に移行する途中過程とみなせ、処理温度や処理時間とともに安全性が高まる傾向を示した。木質ペレットの 230 におけるトレファクション処理過程を追跡したところ、15 min 処理時点では MIE が危険レベル高の  $10 \text{ mJ}$  以下にまで一旦低下するものの、25 min 以降では  $180 \text{ mJ}$  程度にまで急上昇して安全側に移行した。これは、初期では熱分解に伴う揮発成分の増加によって着火性が上がるものの、炭化が進むと揮発成分が減少して着火しにくくなり、最終的に木炭に近づくことで安全側に移行すると解釈される。ロータリーキルンなどによる加熱処理中では一旦極めて危険な状態を経由することになるため、酸素が混入しないよう注意を要する。

なお、トレファクション処理によって吸湿性が低下することもトレファクション処理の利点であるが、セルロースⅠ型と同様に、少ない吸湿率にも関わらず安全側に移行した。これは、表面に局在化したわずかな水分で着火性が低下して粉じん爆発の危険性が緩和されていると推定した。

以上総じて、木質ペレット燃料のトレファクション処理は、エネルギー密度の向上や水分吸着能を下げるといった実用面での利点のみならず、粉じん爆発の危険性を減少させる効果もあると結論付けられる。ただし、不均質な処理によって未処理材が混入している状況となった場合は危険性が高まる恐れがある。

#### (4)スパイスの粉じん爆発

木質バイオマスの抽出成分の作用の考え方を拡張させ、揮発成分を多く含むスパイスの粉じん爆発危険性を評価した。スパイスの種類によって含有成分が大きく異なるためそれぞれ特有の挙動を示したが、特にオレガノの揮発成分は粉体特性よりも引火性が優勢に作用することによって MEC の危険性を高める作用を引き起こした。静電気発生の危険性は水分と揮発成分のどちらかが存在すれば接地による対策程度で静電気を抑制できるレベルであった。また、スパイスは構成元素に窒素を含むため燃焼時に NO<sub>x</sub> ガスが発生しやすかった。一酸化炭素や二酸化炭素だけでなく NO<sub>x</sub> 等の毒性のあるガスが発生しやすいことから、スパイスの燃焼事故には特段の注意が必要であろう。

#### <引用文献>

- [1] 安藤直次郎、木村義男：木粉の粉体爆発について：京大防災研究所年報，11A，545-556(1968)
- [2] 労働安全衛生総合研究所：労働安全衛生総合研究所技術指針( 静電気安全指針 2007 )，No.42 (2007)
- [3] 原田寿郎：コーンカロリメーターによる木材の燃焼性評価：木材工業 59，454-457 (2004)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下博正、塚本修平、正本博士、重松幹二、コウハクル ワサナ       |
| 2. 発表標題<br>アセチルセルロースの熱分解挙動と最小着火エネルギーに対する置換度の影響 |
| 3. 学会等名<br>第53回熱測定討論会(福岡)                      |
| 4. 発表年<br>2017年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下博正、永島 大、正本博士、重松幹二、コウハクル ワサナ |
| 2. 発表標題<br>セルロースおよびその誘導体の粉じん爆発特性         |
| 3. 学会等名<br>第50回安全工学研究発表会(北九州)            |
| 4. 発表年<br>2017年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>秋吉 賢、倉地雄太郎、坂本真奈、永島 大、正本博士、コウハクル ワサナ、重松幹二 |
| 2. 発表標題<br>各種バイオマスの粉じん爆発に対する含有揮発成分の影響               |
| 3. 学会等名<br>第50回安全工学研究発表会(北九州)                       |
| 4. 発表年<br>2017年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>坂本真奈、コウハクル ワサナ、永島 大、正本博士、重松幹二 |
| 2. 発表標題<br>木粉の粉じん爆発危険性における針葉樹と広葉樹の差異     |
| 3. 学会等名<br>第25回日本木材学会九州支部大会(福岡)          |
| 4. 発表年<br>2018年                          |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下博正、コウハクル ワサナ、永島大、正本博士、重松幹二      |
| 2. 発表標題<br>セルロースの粉じん爆発に対する乾燥履歴に伴う水の吸脱着の違いの影響 |
| 3. 学会等名<br>第51回安全工学会秋季大会(金沢)                 |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>倉地雄太郎、コウハクル ワサナ、正本博士、永島大、重松幹二 |
| 2. 発表標題<br>スパイスの粉じん爆発危険性に対する水分と揮発成分の影響   |
| 3. 学会等名<br>第51回安全工学会秋季大会(金沢)             |
| 4. 発表年<br>2018年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>重松幹二、山下博正、吉岡 慶、永島 大、正本博士、コウハクル ワサナ |
| 2. 発表標題<br>吸湿性が異なるセルロース微粉体の粉じん爆発危険性           |
| 3. 学会等名<br>セルロース学会第26年次大会(福岡)                 |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>戸高昌俊、外尾祐介、正本博士、コウハクル ワサナ、重松幹二 |
| 2. 発表標題<br>木材の混合に伴う石炭および木炭の粉じん爆発危険性の増大   |
| 3. 学会等名<br>第26回日本木材学会九州支部大会(宮崎)          |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>重松幹二   |
| 2. 発表標題<br>バイオマスの粉じん爆発危険性                                 |
| 3. 学会等名<br>2019年度静電気学会九州支部・第413回生存圏シンポジウム合同研究会(大分) (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>友納優太、秋吉 賢、永島 大、コウハクル ワサナ、重松幹二   |
| 2. 発表標題<br>木質ペレットのトレファクション処理による粉じん爆発危険性の低下 |
| 3. 学会等名<br>第70回日本木材学会大会(鳥取)                |
| 4. 発表年<br>2020年                            |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                            | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)          | 備考 |
|-------|--|--------------------------------|----|
| 連携研究者 | コウハクル ワサナ<br><br>(Kowhakul Wasana)<br><br>(00624280) | 福岡大学・工学部・助教<br><br><br>(37111) |    |
| 連携研究者 | 永島 大<br><br>(Nagashima Hiroshi)<br><br>(50237517)    | 福岡大学・工学部・助教<br><br><br>(37111) |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|