

研究成果報告書

所属機関 職名 氏名
 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授 石神 徹

研究テーマ

粉体プロセス制御に基づく廃棄物の再資源化と合板用接着剤への応用

研究報告

1. 研究の背景と目的

近年、再生可能エネルギーの1つである木質バイオマス発電が広く普及している。しかし、排出されるバイオマス燃焼灰は産業廃棄物として処理されており、その費用が高額であることが問題となっている。バイオマス燃焼灰は主に K(カリウム), Ca(カルシウム), Si(ケイ素)で構成されている。一般に合板用グルー充填剤は炭酸カルシウム粉体やシリカ粉体を使用されている。そこで、Ca, Si 含有率の高い燃焼灰を合板用接着剤充填剤の代替原料として再利用することを初めて提案する。なお、木質バイオマス発電所と合板工場は隣接していることが多く、燃焼灰の輸送コストの削減も期待でき、工業規模での実現性が高いと言える。具体的には、木質バイオマス発電プラントから排出される燃焼灰を接着剤充填剤として再利用するにあたり、燃焼灰の分級により水溶性成分であるカリウムを除去し、木質バイオマス発電プラントに組み込み可能なカルシウム成分を濃縮するプロセス技術、ならびにバイオマス燃焼灰を接着剤の充填剤として用いた合板の開発を行う。ここでは、合板の作成において、特に接着強度に注目し、実用化されている合板と同程度の接着強度を有しているか確認を行った。また、接着強度の向上策についても検討を行った。

2. 研究成果および考察

2.1. 実験方法

・サイクロン内の流動シミュレーション

燃焼灰の分級に使用する予定のサイクロン内の流動シミュレーションモデルの構築を行った。汎用CFD (Computational Fluid Dynamics) ソフトウェアPHOENICSを使用し、流動解析を行った。流体物性として空気を用いて、非圧縮性流体との仮定の下、構造格子系にて、SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) 法により、数値計算を行った。また、乱流モデルとして、 $k-\epsilon$ モデルを使用した。

・接着剤及び合板試験片作製方法

本研究では炭酸カルシウム及び三種類のバイオマス発電所（以降Plant A, B, Cと称す）から排出された3種類のバイオマス燃焼灰を充填剤として使用した。Table 1に試料粉体の中位径と主成分を示す。充填剤 1.0 g、フェノール樹脂 5.0 g、増量剤 0.5 g、重合開始剤 0.15 g、水 0.4 gを攪拌機で十分攪拌混合させて合板用接着剤を作製した。調製した合板用接着剤を木材に0.02 g/cm²で塗布し、2種類の木材同士（杉、赤松）を室温下にて1.0 MPaで30 min圧着した後、130℃にて1.0 MPaで5.0 h圧着した。その後、90℃で60分間乾燥し、さらに室温で1日静置したものを試験片とした。Fig. 1に合板試験片の形状の詳細を示す。

Table 1 Properties of tested fillers

	Standard	Plant A	Plant B	Plant C
Median diameter [μm]	10.2	18.9	38.9	83.9
Component	CaCO ₃	KCl CaCO ₃ Ca(OH) ₂ CaO	KCl CaCO ₃ K ₂ (CO ₃) SiO ₂	KCl SiO ₂

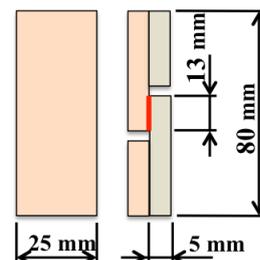


Fig. 1 Dimension of test specimen

・接着力試験及び評価方法

接着力試験として通常の引張試験と以下に示す雰囲気温度を変化させた2種類の耐水引張試験を行った。なお、各引張試験は、引張試験機（島津製作所製、SBL-500K-350）を用いて、引張速度0.5 mm/minの条件で測定した。

- ① 常温耐水試験：試験片を水に室温で1分間浸し、30分ずつ減圧（0.085 MPa）、加圧（0.45 MPa）処理を行った。
- ② 高温耐水試験：試験片を水に室温で2時間浸し、蒸気で暴露（130℃、2.0 h）する処理を2回行った。評価項目は引張応力と木部破断率とした。なお、木部破断率は次式で定義されるので、木部破断率の値が高いほど接着性が良好であると判断される。

$$\text{木部破断率} = \frac{\text{木部破断面積}}{\text{接着面積}} \times 100$$

2.2. 結果および考察

・サイクロン内の流動シミュレーション

Fig. 2にサイクロン内の流動解析の結果を示す。断面図より、サイクロン上部入口から侵入した気流が円筒形状に沿って流れており、サイクロン特有の旋回流の形成をシミュレーション上で表現できていることがわかる。また、これまでに取得した実験結果と比較を行ったところ、概ねシミュレーション結果と一致していた。

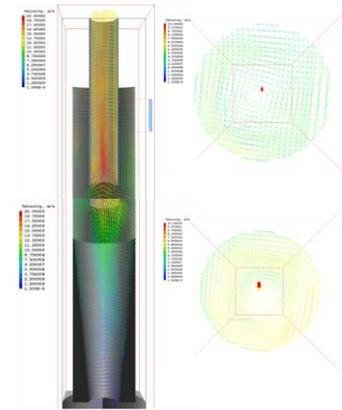


Fig. 2 Velocity vectors in a cyclone

・燃焼灰を接着剤として使用した合板の接着強度

Fig. 3に各プラントから排出された燃焼灰を充填剤として用いた合板の引張応力 (Fig. 3(a)) と木部破断率 (Fig. 3(b)) を示す。図より、多少のばらつきはあるものの、Plant Aの燃焼灰の接着剤を使用して作製した合板は引張応力、木部破断率いずれも市販品に使用されている炭酸カルシウム粒子を充填剤として用いた場合と同等または凌駕する値となっており、十分な接着性能を示している。このことから、バイオマス発電から排出された燃焼灰は炭酸カルシウム粒子の代替原料となりうることを確認できた。それに対し、Plant B, Cの燃焼灰の接着剤を使用して作製した合板の場合、いずれの値も炭酸カルシウム粉体およびPlant Aの燃焼灰よりも強度は低く、特に耐水性能が著しく低下していることが確認できる。よって、充填剤に使用する燃焼灰の性状により接着性能が異なることがわかった。

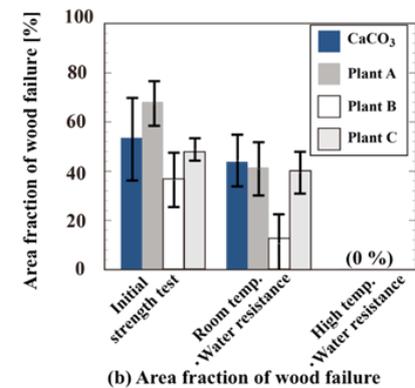
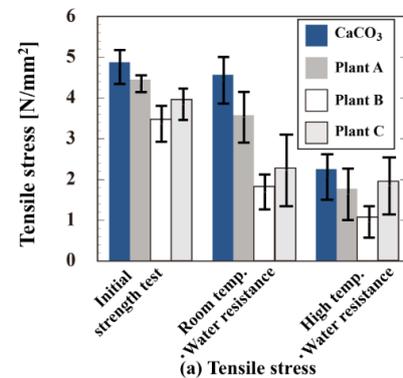


Fig. 3 Effect of kind of tested filler on tensile stress and area fraction of wood failure. (a) tensile stress, (b) area fraction of wood failure

Fig. 4に調製した合板用接着剤のpHと引張応力、木部破断率の関係を示す。合板用接着剤のpHは水酸化カリウム水溶液を適宜添加することにより調製した。引張応力、木部破断率ともにpHが増加するにつれ低下し、pH = 11程度で極小値となった後、再び向上した。この原因は現状不明であるが、フェノール樹脂の分子鎖の絡み合いが変化し、分散媒自体の粘度低下が影響したことなどが考えられる。接着剤の強度の機構解明は今後の検討課題としたい。何にせよ、接着剤pHが合板強度に顕著に影響を与えることが明らかとなった。

Fig. 5に炭酸カルシウム粉体を充填剤として用いた際の接着剤のpHと引張応力、木部破断率の関係を示す。なお、接着剤のpH調整は所定の濃度で作製したKOH水溶液を加えることで行った。pH = 11程度で引張応力、木部破断率は極小値をとり、その後、pHが増大するにつれ引張応力、木部破断率が増大している。

すなわち、燃焼灰を使用した場合の接着性能のpH依存性は、炭酸カルシウムを使用しpHのみ変化させた場合の依存性と一致している。よって、pHが11程度であることが、Plant B, Cの接着性能が低くなる原因の1つであると考えられる。したがって、接着剤のpHを調整することで接着性能が改善できることが

期待される。

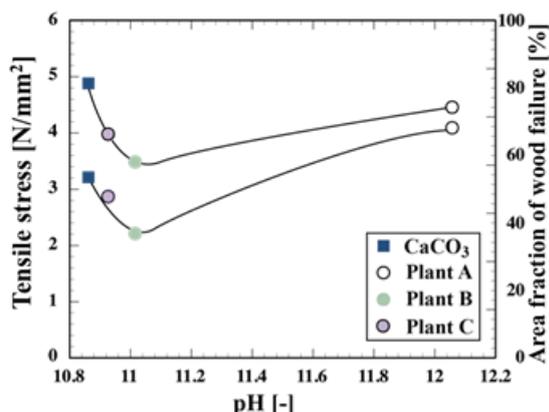


Fig. 4 Relation between pH, tensile stress and area fraction of wood failure for various tested fillers

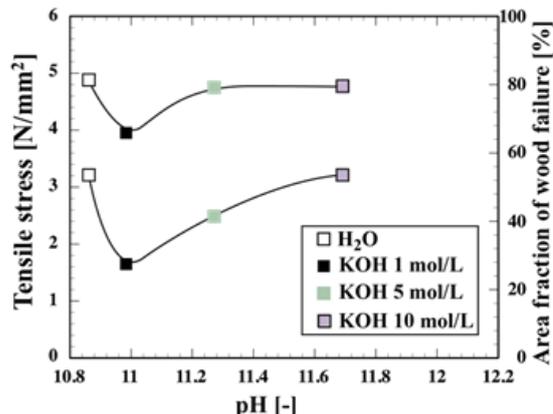


Fig. 5 Relation between pH, tensile stress and area fraction of wood failure for concentration KOH

3. 将来展望

当初の狙い通り、バイオマス発電プラントから排出された燃焼灰は、合板用接着剤に再利用できることが示唆された。また、Plant Aの燃焼灰を用いて調製した合板は、現行の炭酸カルシウム粉体を用いて調製した合板と同程度の接着強度を示した。従って、本研究により、バイオマス発電から排出された燃焼灰は、合板用接着剤の充填剤として使用可能であることが示された。

その一方で、その強度メカニズムの詳細については明らかにできなかった。合板の接着強度を向上させることにより、実用化に近づくと考えられる。以上により、今後の研究方針ならびに将来展望は以下の通りである。

- ・ 合板強度に対する接着剤pHの影響について、機構解明の検討を行う。
- ・ 合板強度に対する接着剤の木材への浸透性や木材表面との親和性について検討を行う。
- ・ 以上の検討結果をもとに、合板強度を向上させるために必要な燃焼灰物性および分級方法について探索する。

4. 研究発表

- ・ 福井国博, 木綿一貴, 深澤智典, 石神 徹, 木質バイオマス発電燃焼灰を充填材として使用した合板の性能評価, 2020年度粉体工学会春期研究発表会 (新型コロナウイルス感染拡大対策のため, オンラインでは未開催)
- ・ M. I. F. Rozy, M. Ueda, T. Fukasawa, T. Ishigami, K. Fukui, Direct numerical simulation of flow resistivity and oil droplet coalescence on x-ray ct images of nonwoven fabrics filters, 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE2019) B14 7, Sapporo, Sep. 26, 2019.
- ・ K. Fukui, K. Momen, G. Ichiba, T. Fukasawa, T. Ishigami, Utilization of woody biomass combustion fly ash as a filler in the glue used for plywood production, Under Review.