

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03664

研究課題名(和文) 高強度な材料創製を伴った竹バイオマス粒子からの石炭に匹敵する高位発熱量の燃料創製

研究課題名(英文) Fuel production from bamboo biomass particles with high calorific value comparable to coal, accompanied by the creation of high-strength materials

研究代表者

田之上 健一郎 (Tanoue, Kenichiro)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：70293892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：竹/廃プラの共熱分解で得られる固体燃料の最適条件は、粉碎性、HHV、エネルギー収率の観点から、TS = 623 K、wp = 10 wt%であり、HHVは30 MJ/kg以上となった。竹粉をPPに1 wt%の添加により、破断ひずみを大きくさせることに成功した。竹バイオマス燃焼時の灰付着はMgO添加によって、75%以上も低減できることが明らかとなった。一方、SiO₂を添加した場合は、灰中に含まれるK₂Oとの比率により融点が低くなり、灰付着量が増加した。CaO添加の場合は、燃焼時のチャーとの相互作用により低融点のCaCO₃やCa(OH)₂も生成されるため、灰付着の低減は出来なかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バイオマスや廃プラスチックの燃料生成は、通常、800 以上の高温操作で行われる。本研究により400 程度の加熱でしかも石炭に匹敵する高カロリー燃料が生成されることが明らかとなった。また、MgOを1%添加するだけで、灰融点が大幅に上昇することも明らかとなった。このことから、本研究成果は、バイオマスボイラーの2つの大きな課題(1. 低カロリー、2. 低灰融点)を解決するものであり、また竹の材料利用も鑑みながら、エネルギー資源のない日本においても有用なエネルギー生成法の一つになると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Optimal conditions for solid fuels obtained from bamboo/waste plastic co-pyrolysis in terms of crushability, HHV and energy yield were TS = 623 K, wp = 10 wt% and HHV > 30 MJ/kg Addition of 1 wt% bamboo powder to PP successfully increased the strain at break. Ash deposition during bamboo biomass combustion was reduced by more than 75% by the addition of MgO. On the other hand, the addition of SiO₂ decreased the melting point and increased ash deposition due to the proportion of K₂O in the ash. On the other hand, the addition of CaO did not reduce ash deposition due to the formation of CaCO₃ and Ca(OH)₂, which have lower melting points due to their interaction with char during combustion.

研究分野：循環型社会システム関連

キーワード：半炭化 クリンカー シナジー効果 バイオマス/廃プラ パンブーマテリアル

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

竹の半炭化によって高位発熱量を約 18 MJ/kg から約 26 MJ/kg となることが報告されている (P. Rousset et al., 2011; Z. Liu et al., 2014; W. H. Chen et al., 2015). しかし, 石炭の高位発熱量 (25.9 MJ/kg ~ 31.2 MJ/kg) の最小値 (26.0 MJ/kg, Z. Liu et al., 2014) に到達するにすぎず, エネルギー収率を考えれば, 発熱量が高いプラスチックを添加することが有効であると考えられる. また, 研究分担者らはシリコン源を加えなくても SiC を含むバンブーセラミックスに成功しており, シリコン源を添加することにより, 曲げ強度が 200 MPa を遥かに超えるバンブーセラミックスの創製が期待できる. さらに, 竹の燃焼時に生成されるクリンカーを低減させるため, 高融点酸化物である SiO_2 を添加するという研究代表者らしか行っていない技術ではあるが, 理論的な裏づけはなされていない.

以上の学術的技術的な研究動向を踏まえ, 専門分野の異なる研究体制により, 高強度なバンブーセラミックスの創製を伴った竹バイオマス粒子から石炭に匹敵する高位発熱量の燃料創製といった, 竹の高負荷価値カスケード利用法の開発を着想するにいたった.

2. 研究の目的

本研究では以下を目的とする.

- 1) 竹 + 廃プラスチックの共半炭化による高位発熱量 30 MJ/kg 以上の燃料創製のため, 燃焼における最適な炭化条件を明らかにする. さらに燃料としては適合しない大きさの竹粒子の副次的利用としてのバンブーセラミックス製造法を開発する.
- 2) 上記炭化条件でのクリンカー発生量を 80 % 低減させる半炭化燃料 (竹) 粒子の安定燃焼に必要な高融点酸化物の添加量について明らかにする.

3. 研究の方法

3. 1 竹とプラスチックの共半炭化実験

本実験で使用した試料は, 竹, ポリエチレン (PE), ポリプロピレン (PP), ポリスチレン (PS), ポリエチレンテレフタレート (PET) であった. プラスチックの構成比は, プラスチック製容器包装廃棄物の分析結果を基に, PE (29 %), PP (31 %), PS (23 %), PET (17 %) とした. また, PET はペットボトルを 7 mm 四方に裁断したものを使用した. 本研究では, これらのポリマーの混合物 (PE, PP, PE, PET) を「模擬廃プラスチック」と定義した. 竹は, 383 K に設定した恒温乾燥機で半日以上乾燥させたのちデシケーター内で冷却した. 竹とプラスチックを所定の割合 (プラスチックの質量混合%, w_p) で混合し, 試験炉の反応管内に充填させた. その後, 所望の温度 (T_s) に設定された試験炉のヒーターを起動し, 試験炉中心部に設置されたステンレス管から N_2 ガス 0.5 SLM で供給しながら, 共熱分解実験を行った. 発生した水分およびタール分は水冷されたコールドトラップによって捕集した. 捕集し切れない気体は生成ガスとした.

3. 2 竹粒子の燃焼に伴うクリンカー生成とその低減効果に関する実験

試料は, 山口県産モウソウチク粉末 ($D_{p50} = 453.3 \mu\text{m}$) に MgO ($D_{p50} = 2.856 \mu\text{m}$), CaO ($D_{p50} = 0.553 \mu\text{m}$), SiO_2 ($D_{p50} = 0.283 \mu\text{m}$) を充填質量のそれぞれ 0, 0.50, 1.0 wt% 添加した. 実験装置は, メタンおよび空気の供給部, 混合部, バーナー部, 試料充填層および排気用ブロウから構成される. メタンおよび空気の流量はマスフローコントローラ (HORIBA STEC 製 SEC-E40) によって制御した. また, ステンレス製円筒容器にガラスビーズおよびアルミナビーズを充填した混合部を用意した. メタンの等量比は 0.7 とし, 70 分間の燃焼を行ったあと, 灰の生成量および灰の付着量を測定した.

さらに, 火災燃焼実験より回収した残留灰を乳鉢で 5 分間粉碎して, 加熱ステージ (ジャパンハイテック 製 10016) 付きの顕微鏡 (オリンパス 製 SZ61) を用いて灰の熔融試験を行った. 室温から 10 °C/min 温度を上昇させ, 1400 °C までの試料の変化を観察し, 撮影画像をパソコンに記録した. 実験後, データから収縮, 部分融解, 完全融解を調査した. この時, 収縮は試料の凝縮が始まった温度, 部分融解は一部で融解が始まった温度, 完全融解は, 試料全体が丸みを帯びた温度と定義した.

4. 研究成果

4. 1 竹とプラスチックの共半炭化実験結果と考察およびバンブーマテリアル製造実験

竹の熱分解 ($w_p = 0 \text{ wt}\%$) では, 小さな繊維状の粒子が含まれており, 温度が上昇するにつれて色が茶色から黒色に変化した. 共熱分解により生成した炭化物は竹熱分解とほぼ同様の傾向を示したが, w_p の増加とともに粒子の形状が小さな繊維状粒子から大きな粒状粒子に変化した. 模擬廃プラスチックと PS の熱分解では, 固形物はそれぞれ白色の粒状粒子と黄色の粒状粒子であった. したがって, w_p を使用すると, 熔融プラスチックの大部分が共熱分解後に固化し, 粉碎性が低下することがわかった.

図 1 は、 $T_S=673\text{ K}$ (T_S は炉壁面設定温度) における共熱分解後の生成物収率と w_p との関係を示す。図 1a は測定結果を示し、図 1b は竹 100% の時の結果とポリスチレン 100% の結果から推定できる予想収率を示した。図 1a より $10\text{ wt}\% < w_p < 90\text{ wt}\%$ では生成物の収率はほとんど変化が見られなかった。図 1b に示すように予想収率は w_p とともに変化することがわかった。このことより、ポリスチレンの熱分解が竹の添加により促進される相乗効果の発現がみられた。一方、図 1c に示すように、竹と模擬廃プラスチックの共熱分解後のチャー収率をみると、いずれの w_p でも竹-PS のみのチャー収率 (図 1a) よりも高くなることが分かった。これは、Singh らが示しているように (*J. Energy Inst.*, 2020, 93(3) 1020–1035), 模擬廃プラスチック中に含まれる PET が PS の熱分解を低減させることによるものと考えられた。

図 2 は $T_S=673\text{ K}$ で竹と PS を共熱分解したチャーの HHV を示している。これより、HHV は全体的に w_p とともに単調に増加することが分かった。 $30\text{ wt}\% < w_p < 70\text{ wt}\%$ では、HHV の測定結果にバラツキが生じている。これは、実験後に竹リッチのチャーの場合 HHV が低めに検出され、PS リッチの場合 HHV が高めに検出されるためである。それ以外の w_p ではバラツキは生じなかった。また、図中に示されている ▲ は、 773 K で共熱分解したときの結果 (Thuan et al, 2022) である。これより、熱分解温度を高くすると、PS 添加による HHV 増加の効果が小さくなることが予想された。

図 3 は、竹と模擬廃プラスチックを共熱分解した後の炭化物の HHV を示している。全体的な傾向として、HHV は w_p に比例して増加しなかった。 $w_p=0\text{ wt}\%$ では、HHV は TS とともに増加した。 $w_p=10\%$ では、 $T_S=673\text{ K}$ での HHV を除き、HHV は $w_p=0\%$ とほぼ同じであった。 $30\text{ wt}\% < w_p < 70\text{ wt}\%$ では、 $T_S=673\text{ K}$ での HHV は、 $T_S=573\text{ K}$ および $T_S=623\text{ K}$ での HHV よりもほとんど低かったが、これは、図 1c に示すように、 $T_S=673\text{ K}$ でのバイオマス存在下での模擬廃プラスチックの熱分解の進行により、混合物中のチャー収率が期待されるチャー収率よりも低くなったためである。 $w_p=90\text{ wt}\%$ では、 T_S が変化しても、HHV は $w_p=100\text{ wt}\%$ の場合とほぼ同じであった。

図 4 はチャーのエネルギー収率を示している。 573 K での竹炭のエネルギー収率は約 70% であった。 $w_p=10\text{ wt}\%$ でエネルギー収率は約 90% まで大幅に増加したが、これは共熱分解中に溶融プラスチックが被覆されることによりチャー収率が増加したためである。 $10\text{ wt}\% < w_p < 50\text{ wt}\%$ では、共熱分解中の揮発性物質の相互作用によりガス化が促進されたため、エネルギー収率は極小値を示した。 $w_p > 70\text{ wt}\%$ では、共熱分解中に竹よりも HHV の高い模擬廃プラスチックが残存するため、エネルギー収率はほぼ 100% であった。一方、 $0\text{ wt}\% < w_p < 90\text{ wt}\%$ では、竹と PS の共熱分解において、溶融 PS の被覆よりも PS の熱分解が進行するため、エネルギー収率は w_p とともに単調減少した。

粉碎性、高位発熱量およびエネルギー収率

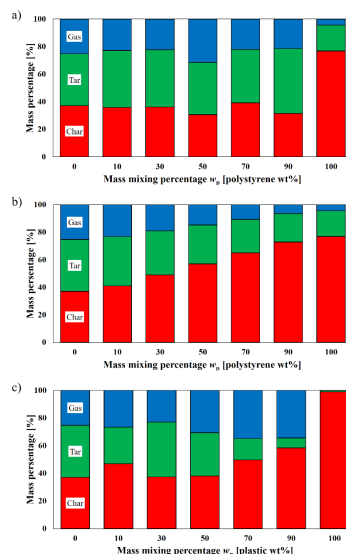


図 1 $T_S=673\text{ K}$ における生成物収率の w_p 依存性 a) 竹と PS の共熱分解結果, b) 予想された竹と PS の共熱分解結果, c) 竹と模擬灰プラスチックの共熱分解実験結果

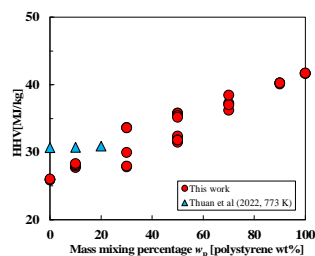


図 2 $T_S=673\text{ K}$ における竹—PS の共熱分解後の高位発熱量測定結果

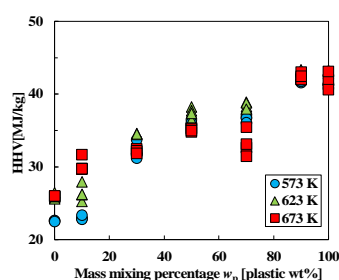


図 3 $T_S=573\text{ K}$ における竹—模擬灰プラスチックの共熱分解後の高位発熱量の w_p 依存性

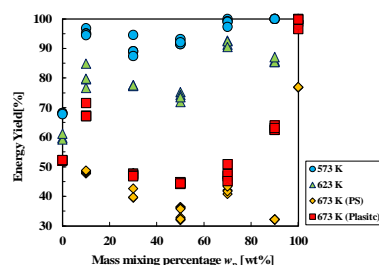


図 4 $T_S=573\text{ K}$, 623 K , and 673 K における竹と模擬廃プラスチックの共熱分解後のエネルギー収率の w_p 依存性

の測定結果から、本実験条件で最適条件として $T_{s,opt} = 623 \text{ K}$ 、 $w_{p,opt} = 10 \text{ wt\%}$ となる事が分かった。

また、竹粉 1wt% と PP を混練し、射出成形し、それを試験片に加工して引張試験を行った。竹粉を混練させることで引張強さは PP 単体に比べると高いものの、破断ひずみはわずか 1 wt% の含有率にもかかわらず大きく減少することがわかった。一方で分級竹粉より微粉碎竹粉が破断ひずみにおいて優れていることが確認できた。原因として前者は寸法が大きいことで亀裂が入りやすくなった可能性が考えられる。また、形状・寸法の観察時に細長い繊維以外に竹粉の凝集体が存在し、これが低ひずみの原因になったと考えられる。凝集なく均一に分散させることが必要となることが分かった。

4. 2 竹粒子の燃焼に伴うクリンカー生成とその低減効果に関する実験結果と考察

図 5 は、竹の燃焼後に生成した灰の質量を示した。図 5a において、竹燃焼のみの灰の総量は約 0.3g ~ 0.4g であり、投入竹粉の約 2% であった。この灰は、前報 (K. Takata, K. Tanoue et al., *J.Inst. Energy*, 2020, 99, 108–116) と同様に、インコネルメッシュを通過して流下したフライアッシュと溶融灰を除いたボトムアッシュであった。総質量は、無機物の種類に関係なく、無機添加剤濃度が高くなるにつれて直線的に増加した。一方、インコネルメッシュへの灰の付着率は、図 5b に示すように無機物の種類によって異なっていた。竹のみの燃焼の場合、付着質量は約 0.08g であったが、 SiO_2 粒子を含む竹の場合、付着質量は竹のみの燃焼よりも高く、ばらつきが大きかった。 $w_{\text{add,CaO}} = 0.5 \text{ wt\%}$ での付着質量は竹燃焼のみの場合よりも低かったが、 $w_{\text{add,CaO}} = 1 \text{ wt\%}$ での付着質量は竹燃焼のみの場合とほぼ同じであった。 MgO 粒子を添加した竹では、付着質量は、約 0.02 g であり、竹のみの場合よりも 75% 以上の付着率の低下がみられた。

図 6 は、室温から 1400 °C まで昇温速度 10 °C/min で昇温したホットステージ上の酸化竹灰のスナップショットである。620 °C では灰の形状は変化しないが、灰は収縮した。これを収縮温度 (SHT) と定義した。温度が 630 °C から 680 °C に上昇すると、灰の収縮は十分に進行した。690 °C で、灰は部分的に融解した。無機組成が生成灰と均一であれば、それらはすべて同じ温度で一緒に溶融するはずである。しかし、実際には、バイオマスに含まれる無機組成が局所的に変化し、灰が部分的に融解し始める。これを部分融解温度 (PFT) と定義した。その後、灰の融解は約 1020 °C でほぼ完了する。これを完全融解温度 (FFT) と定義した。

図 7 は、酸化竹灰、燃焼竹灰、および添加剤入り燃焼灰の SHT, PFT, および FFT を示した。図中の点線は、燃焼中の竹バイオマス充填層の最高温度 $T_{\text{max}} (= 900)$ を示している。酸化灰の場合、SHT と PFT は T_{max} より低く、FFT は T_{max} より低かった。したがって、灰付着は SHT または PFT に起因すると考えられる。なお、竹の燃焼中、灰が融解し、その一部がインコネル・メッシュを通過して流れ落ちたことは、我々の既往の研究結果で示した通りである。これは、低融点物質の組成を変化させ、燃焼灰と酸化灰の間の組成を変化させたと考えられる。その結果、無添加の燃焼灰の SHT および PFT の温度は酸化灰の温度よりも高くなった。 SiO_2 を添加した燃焼灰の SHT と PFT は、無添加の燃焼灰よりも低かった。 MgO を添加した燃焼灰の SHT と PFT は、無添加の燃焼灰よりも高かった。このことから、無添加、 SiO_2 および MgO を添加した燃焼灰の SHT および PFT は、図 5b の灰付着率結果の理由を説明することができる。なお、 CaO を 1% 添加した燃焼灰のこれらの温度は、無添加の燃焼灰の温度よりも高くなるものの、図 5b より灰の付着は変化しなかった。

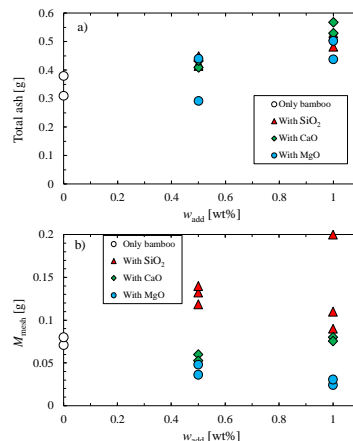


図 5 竹燃焼後の a) 灰生成質量および b) 灰付着量の添加物濃度依存性

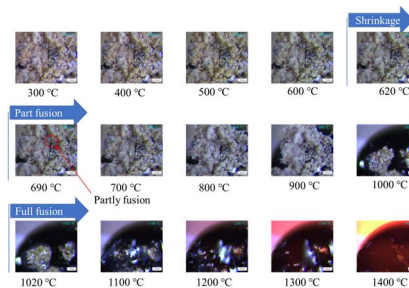


図 6 竹酸化灰の 10 °C/min の加熱中における顕微鏡内のスナップ写真

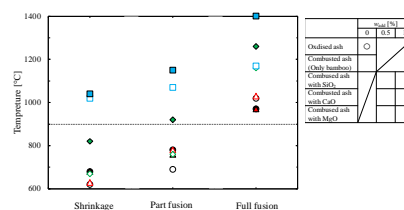


図 7 竹の酸化灰および燃焼灰の収縮温度、部分融解温度および完全融解温度の添加物濃度依存性

図 8 に燃焼灰の XRD パターンを示す。竹灰のみの図 8a では、主な結晶は石英 (SiO_2) で、 2θ (回折角) = 22° と 26° に観察された。さらに、シルバ이트 (KCl)、ダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)、サニディン ($\text{K}_{0.65}\text{Na}_{0.35}\text{AlSi}_3\text{O}_8$)、オルソクレーズ (KAlSi_3O_8) も観察された。リートベルト分析によると、 K_2O の質量百分率は蛍光 X 線分析よりも低かった。 SO_3 と P_2O_5 の質量割合が前報より低いことから、燃焼中に硫酸塩とリン酸塩が生成する可能性はない。したがって、 K_2O は非晶質化合物の一部であると推定された。 $w_{\text{add, SiO}_2} = 1\%$ の図 8b において、 $2\theta = 26^\circ, 22^\circ, 50^\circ$ の主結晶は石英 (SiO_2) であった。さらに、ダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)、シルバ이트 (KCl)、カルシライト (KAlSi_3O_8) も観察された。リートベルト分析によると、竹の灰分にはすでに約 48% の

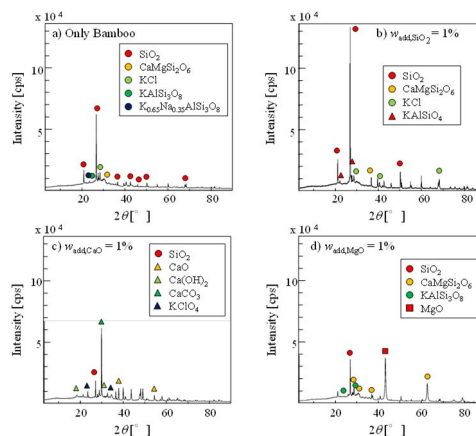


図 8 竹燃焼灰の XRD パターンの添加物依存性

SiO_2 が含まれているため、 SiO_2 を添加しても Si-Al-Ca-K-O 化合物の極端な増加は見られなかった。Schairer によると、 SiO_2 と KAlSi_3O_8 の融点はそれぞれ 1713°C と 1750°C であり、 KAlSi_3O_8 は KAlSi_3O_8 - SiO_2 相図上の最小融点付近に位置する (Schairer, J. F., *J Geology* **1950**, 58(5), 512–517)。検出された KAlSi_3O_8 は非晶質状態であると想定されたため、 SiO_2 の添加により燃焼表面で急速に融解し、残った燃焼灰は融点の高い KAlSi_3O_8 になると予想される。次に、図 7 の SHT と PFT は SiO_2 の添加に伴って増加した。竹中の K_2O と SiO_2 の比率は灰中で均一ではないため、最小融点 $x_{\text{SiO}_2} = 0.63$ (Wu, P. et al., *J Am Ceram Soc* **1993**, 76(8), 2059–2064) を満たすことができれば、灰は急速に溶融し、メッシュ上に付着し、インコネル・メッシュを流れ落ちる (K. Takata, K. Tanoue et al., *J. Inst. Energy*, 2020, 99, 108–116)。一方、 $x_{\text{SiO}_2} = 0.63$ が 1 に近い場合、灰はあまり溶融できず、堆積量は減少する。これらの事実は、図 5b に示すように、 SiO_2 添加によって灰の析出量が増減すること、およびそのばらつきが大きいことを示している。 $w_{\text{add, CaO}} = 1\%$ の図 8c では、主な結晶は石灰 (CaO) ではなく方解石 (CaCO_3) であった。さらに、ポートルダイト (Ca(OH)_2) や塩素酸カリウム(VII) (KClO_4) も観察された。リートベルト分析によると、竹の灰にはすでに約 3.6% の CaO が含まれているため、 CaO を添加しても Si-Al-Ca-K-O 化合物の極端な増加は見られなかった。また、 SO_3 、 P_2O_5 、 Cl の質量割合は竹灰のみの場合とほとんど変わらないため、XRD ではカルシウムを含む塩は検出できなかった。上述のように、竹は完全には燃焼せず、燃焼灰中に約 13.6% の炭が含まれていた。Wang らは、バイオマス熱分解に CaO を添加すると、 CaO はバイオマス熱分解で生成した CO_2 と反応して CaCO_3 を生成することを示した (Wei, L. et. al, *Int. J. Hydrog. Energy* 2014, 39, 15416–15423)。 $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ 可逆化学反応は、化学ヒートポンプの分野でよく知られている (Gupta, A. et. al, *Chem. Eng. Sci.*, 2021, 230, DOI: 10.1016/j.ces.2020.116227)。竹を燃やすと H_2O が発生するので、 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ の化学反応が起こると仮定した。すると、燃焼中に方解石だけでなく、 CaO よりも融点の低いポートルダイトも生成した。これらの事実から、 CaO 添加の場合、灰の堆積が促進されるか減少するかは、燃焼灰中に存在するチャーの分布によって決定されると考えられ、その結果、図 5b に示すような堆積が生じる。この事実は、図 7 の CaO 1% 添加の場合、PFT が 920°C までしか上昇しないことでも説明できる。 $w_{\text{add, MgO}} = 1\%$ の図 8d では、主な結晶はペリクレーズ (MgO) と石英 (SiO_2) であった。さらに、ダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) とオルソクレーズ (KAlSi_3O_8) も観察された。リートベルト解析によると、竹灰にはすでに約 5.2% の MgO が含まれているため、 MgO を添加しても Mg による Si-Al-Ca-K-O 化合物の極端な増加は見られなかった。 SO_3 、 P_2O_5 、 Cl の質量割合は竹灰のみの場合とほとんど変わらないため、XRD ではカルシウムを含む塩は検出できなかった。秋山らは、石炭灰に MgO 粒子を添加すると、溶融スラグ量が減少し、堆積速度が著しく低下することを見出した (Akiyama, K., *Fuel*, 2011, 90, 3230–3236)。これらの結果に基づき、彼らは、石炭粒子周囲の MgO 粒子の付着が溶融スラグ量を減少させるというモデルを提案した。本研究でも、Akiyama らの結果 (Akiyama, K., *Fuel*, 2011, 90, 3230–3236) と同様の現象が起こると予想された。したがって、図 7 に示す SFT と PT の増加、および図 5b に示す灰堆積量の減少は、 MgO の添加により竹灰粒子の周囲に MgO が析出したためと考えられる。

以上の結果から、竹燃焼灰のような融点が低い場合には、クリンカー生成を低減させるうえで MgO 添加が有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 LOONG Glen Khew Mun, MORISHIGE Naoto, YAMAJI Keito, TANOUE Ken-ichiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Consecutive Reaction Model of the Pyrolysis of Polystyrene, Polyethylene and Polypropylene under an Isothermal Condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Energy	6. 最初と最後の頁 162 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3775/jie.101.162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Yuta, Kato Mai, Komiyama Masaharu, Loong Glen Khew Mun, Tanoue Ken ichiro	4. 巻 42
2. 論文標題 Influence of tar-char interaction on solid fuel formation by co pyrolysis of bamboo and waste plastic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Progress & Sustainable Energy	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ep.13994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tanoue K., Umehara N., Fujita M., Ninomiya Y.	4. 巻 43
2. 論文標題 Influence of inorganic additives on ash adhesion to a metal mesh during bamboo powder combustion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Wood Chemistry and Technology	6. 最初と最後の頁 138 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02773813.2023.2198999	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Loong Glen Khew Mun, Okada Keita, Morishige Naoto, Konakahara Naoya, Yokota Morihisa, Tanoue Ken ichiro	4. 巻 43
2. 論文標題 Investigation of the uptake and catalytic effect of calcium and potassium based additives under low temperature pyrolysis of polyvinyl chloride	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Environmental Progress & Sustainable Energy	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ep.14352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Y.Yokogawa, Mai Kato, K. Tanoue
2. 発表標題 Solid fuel production and characterization by torrefaction of biomass
3. 学会等名 7th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Glen Khew Mun Loong , Okada Keita , Konakahara Naoya , Tanoue Ken-ichiro
2. 発表標題 Investigation of the inhibition of HCl during dechlorination of PVC using metal oxides as additives under a low temperature pyrolysis
3. 学会等名 The 11th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦大晟 , 佐々木佑太 , 田之上健一郎
2. 発表標題 バイオマス粒子の半炭化による高カロリー燃料生成および特性評価
3. 学会等名 第17回バイオマス科学会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川大樹, 藤田聖之, 田之上健一郎
2. 発表標題 杉粉灰の高温空気場における金属表面付着および熔融挙動
3. 学会等名 第17回バイオマス科学会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Glen Khew Mun Loong, Ken-ichiro Tanoue, Naoto Morishige
2. 発表標題 Analysis on the Thermal Degradation of Plastic Waste
3. 学会等名 JCREN 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta SASAKI, Taisei MATSURA, Ken-ichiro TANOUE
2. 発表標題 Influence of tar-char interaction on solid fuel formation by co-pyrolysis of bamboo and waste plastic
3. 学会等名 JCREN 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoto MORISHIGE, Ken-ichiro TANOUE, Morihisa YOKOTA
2. 発表標題 Study on simultaneous low temperature pyrolysis of plastic powder including PVC and biomass ash
3. 学会等名 JCREN 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken-ichiro Tanoue, Kazuma Takata, Nao Umehara
2. 発表標題 Ash Adhesion on Inconel Mesh during Bamboo Powder Combustion
3. 学会等名 2021 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森重 直人, 田之上, 健一郎
2. 発表標題 PVC含有プラスチック粉末とバイオマス燃焼灰との低温同時熱分解による 塩素及びカリウムフリー固体燃料の製造に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木祐太, 加藤舞, 田之上健一郎
2. 発表標題 竹と廃プラスチックとの低温共熱分解による固形物の 高位発熱量および生成物収率の混合率依存性
3. 学会等名 日本エネルギー学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横川賀信、加藤舞、田之上健一郎、秀野晃大
2. 発表標題 木質バイオマスの半炭化による燃料生成および特性評価
3. 学会等名 第18回バイオマス科学会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳碧深、藤井幹也、田之上健一郎
2. 発表標題 木質バイオマスの燃焼中における灰付着に及ぼす燃焼温度の影響
3. 学会等名 第18回バイオマス科学会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田聖之、小中原亨、田之上健一郎
2. 発表標題 バイオマス燃焼灰の灰融点に関する研究
3. 学会等名 第18回バイオマス科学会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken-ichiro Tanoue, Nao Umehara, Masayuki Fujita and Yoshihiko Ninomiya
2. 発表標題 Ash Adhesion on a Metal Mesh during Combustion of Bamboo Powder with Inorganic Additives
3. 学会等名 2023 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Bishen Chen, Kazuya Sanmi, Ken-ichiro Tanoue, Naoya Konakahara, Morihisa Yokota
2. 発表標題 Study on Fusion and Adhesion Behavior of Biomass Combustion Ash
3. 学会等名 JCREN 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陳 碧深 , 三美 和也 , 田之上 健一郎 , 小中原 亨 , 横田 守久
2. 発表標題 バイオマスボイラーの熱交換器に付着する燃焼灰に関する研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山根 雄大, 金本 直樹, 下門 直幹, 田之上 健一郎
2. 発表標題 竹とポリスチレンの共熱分解実験
3. 学会等名 第35回中四国伝熱セミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 グレンキューマンロング, 岡田京大, 田之上健一郎, 小中原 亨, 横田守久
2. 発表標題 バイオマス燃焼灰に含まれるカリウム・カルシウム化合物を添加したPVCの低温脱塩化水素過程における反応解析
3. 学会等名 日本エネルギー学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken ichiro Tanoue, Yuta Sasaki and Mai Kato
2. 発表標題 Solid Fuel Formation By Co Pyrolysis of Bamboo and Simulated Waste Plastic
3. 学会等名 2022 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	合田 公一 (Goda Koichi) (10153743)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	

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			
マレーシア	ペトロナス工科大学			