

近畿大学

バイオコークス研究所報告

2023 第21号



近畿大学バイオコークス研究所



バイオコークス事業化推進プロジェクト

近畿大学バイオコークス研究所報告

第21号 (2023)

目 次

「技術論文」

成形条件により粒子密度が異なる極小バイオコークスの熱物性	水野 諭、井田 民男 ... 1
バイオコークスの燃焼特性に及ぼすヒノキ炭混合の効果	金田 奈実、井田 民男 ... 9

「社会貢献活動」

最先端再生可能エネルギー研究 ジュニアセミナー	13
-------------------------------	----

成形条件により粒子密度が異なる極小バイオコークスの熱物性

水野 諭、井田 民男

(近畿大学バイオコークス研究所)

【緒言】

現代社会において、環境問題は人類生存にかかわる根深い問題となっている。1970年代に問題視され始めた地球温暖化は、今では世界154カ国・1地域が2050年までにカーボンニュートラルの実現を表明するほどに喫緊の課題として取り組まれており、脱炭素社会の構築に向け温室効果ガス削減の動きが重要視されている。

我が国における二酸化炭素排出量は、エネルギー転換部門、産業部門、運輸部門の3部門が多くを占めている。近畿大学で開発されたバイオコークスは、産業部門における鉄鋼業での利用をターゲットとしており、カーボンニュートラルの考えに基づき、石炭コークスを代替することによる直接的な二酸化炭素の削減が可能な固体バイオ燃料である。

現在、バイオコークスは鑄鉄溶解炉で使用される石炭コークスの一部代替を実現している。従来の固体バイオ燃料では不可能であった溶解炉での利用を可能にしたのは、バイオコークスが持つ高強度かつ高密度といった物理的特性である。特に、溶解炉内では通気・通液性が重要な特性であり、炉内で強度と燃焼持続性が保持できなければガスや溶融鉄の流路が確保できず、運転停止に繋がる。木材などの生バイオマス、木チップから成形されるペレットやブリケットが有し得ない機能的特性が、バイオコークスには付与されている。

本研究ではバイオコークスが通気・通液性を有する機能的要因に着目する。高温場となっている炉内における強度ならびに燃焼持続性には、バイオコークスを形作る骨格となる固定炭素分の残存率が影響している。密度が異なる固体バイオ燃料をもとに、1173 Kの高温雰囲気下において残存する固定炭素分率の違いを調べ、空隙率と固定炭素分率との連関を導き、検討する。

【実験条件および実験方法】

・粒度分布の測定方法

バイオコークスの成形には、原料粒径が1 mm 以下のヒ

ノキと緑茶滓を用いる。1 mm 以下の広範な粒径における粒度分布が、バイオコークスの粒子密度に影響を及ぼす可能性がある。そのため、1 mm 以下に前処理したヒノキと緑茶滓を、250 μm 以下、250~500 μm 、500~1000 μm の3つの粒径範囲にふるい振とう機を用いて篩分け、粒度分布を調べる。このとき、粒度分布を調べるための原料質量は100 gとする。また、各原料の粒度分布測定は6回行い、平均値を算出する。

・バイオコークスの成形条件

表1にバイオコークスの成形条件を示す。原料は粉砕機により粉砕したのちに設定含水率に調湿し、ふるい振とう機を用いて原料粒径を1 mm 以下に篩分けする。バイオコークスの成形は、加圧・加熱することにより行う。内径4 mmのシリンダーに所定量の原料を挿入し、油圧プレス機を用いて原料に設定圧力まで印加する。圧力を印加した状態を保持したまま、管状炉を用いてシリンダーの周囲より加熱する。設定温度に達したのち所定時間温度を保持し、所定時間が経過したのちはシリンダーから管状炉を外し、工場扇にて冷却を行う。本実験では、成形圧力と成形温度をパラメータとしてバイオコークスを成形し、その粒子密度を次式により算出する。

Table 1 Molding conditions of Bio-coke

Materials	Japanese cypress, Green tea
Diameter [mm]	4
Particle size [mm]	Less than 1mm
Initial moisture content [wt.%]	3
Quantity [mg]	70
Loading pressure [MPa]	5.7, 11.4, 22.8, 45.6, 68.4
Forming temperature [K]	343, 383, 423, 463
Retain time [min.]	1.5

$$\text{Particle density } \rho_p [\text{g/cm}^3] = \frac{\text{Mass of biocoal } m_b}{\text{Volume of biocoal } V_b}$$

・熱重量分析 (TGA) の測定方法

本実験では、空隙率の差異が1173 Kの高温雰囲気下における固定炭素分率の違いに影響を与えるか調べることを目的とする。表2に熱重量分析の測定条件を示す。

Table 2 Conditions of TGA

Gas atmosphere	Air, N ₂
Gas flow rate [ml/min.]	200
Min. temperature [K]	25
Max. temperature [K]	1173
Heating rate [K/min.]	10

表に示す条件のもとで空隙率の異なる原料ならびにバイオコークスの熱重量分析を行う。環境雰囲気が窒素の場合には、測定室内を十分に不活性雰囲気にするために、室温状態で20分以上の窒素パージを行う。測定には差動型示差熱天秤（株）リガク、TG8120）を用い、空気雰囲気と窒素雰囲気における重量収率（TG）を測定する。

図1にTG曲線のイメージ図を示す。得られたTGから、次式を用いて固定炭素分率を導出する。

$$\text{Fixed carbon FC [\%]} = 100 - (\text{Moisture content} + \text{Ash} + \text{Volatile matter VM})$$

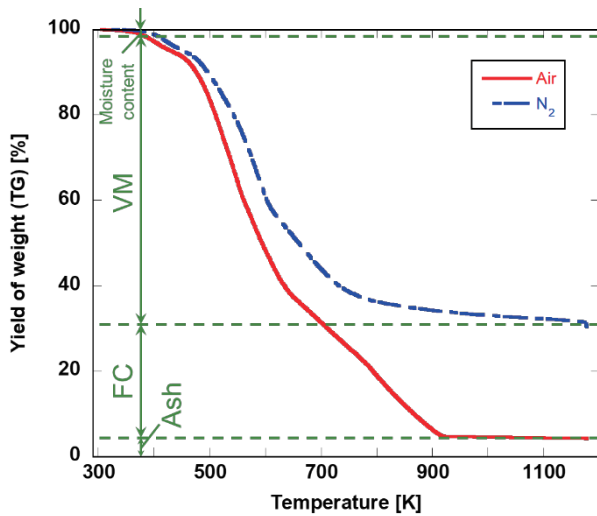


Fig. 1 Image of thermal gravimetric (TG) curve

原料のかさ密度は、熱重量分析に用いるPtパン（φ5 mm × 5 mmh）に高さが2.5 mmになるように原料を圧密充填し、原料充填量 m_r とPtパンの原料が占める容積 V_r から算出する。このときの原料充填量は、ヒノキが8 mg および 23 mg、緑茶滓が27 mg および 41 mg とする。算出したかさ密度とヒノキの真密度 1.46 g/cm³、ならびに緑茶滓の真密度 1.41 g/cm³ から以下の式を用いて空隙率を導出する。

$$\text{Porosity } \varepsilon [\%] = \left(1 - \frac{\text{Bulk density } \rho_b}{\text{True density } \rho_t}\right) \times 100$$

一方、バイオコークスの空隙率は、粒子密度を算出し、原料と同様にヒノキと緑茶滓の真密度から以下の式を用いて導出する。

$$\text{Porosity } \varepsilon [\%] = \left(1 - \frac{\text{Particle density } \rho_p}{\text{True density } \rho_t}\right) \times 100$$

【実験結果および考察】

・原料粒度分布

図2に各原料の粒度分布を示す。木材は繊維方向の強度が大きいので、球形に粉碎されにくいことが知られている¹⁾。ヒノキも多くの繊維成分を含んでおり繊維方向には短くなりにくいと考えられる。しかしながら、図より、ヒノキは250 μm 以下、250~500 μm、500~1000 μm の3つの範囲の粒子がほぼ等しい割合で混在していることが分かる。これは、ヒノキは繊維方向には切断しにくいものの、繊維の幅（直径）方向には小さくすることができることを示唆している。このことから、原料粒径が1 mm 以下のヒノキを用いたバイオコークスは、繊維長さにより強度を保持しながら、細かい粒径により空隙が少ない構造を有する可能性を示している。緑茶滓については、250 μm 以下の粒子がもっと多く、80% 以上を占めていることが分かる。他方、250~500 μm と500~1000 μm の粒子が250 μm 以下に比べて極めて少ない。このことから、緑茶滓は繊維が少なく、粉碎しやすい性質を有しているものと洞察される。また、250 μm 以下の粒子が大部分を占めることから、原料の充填ならびにバイオコークス成形においては圧密化しやすいと理解できる。

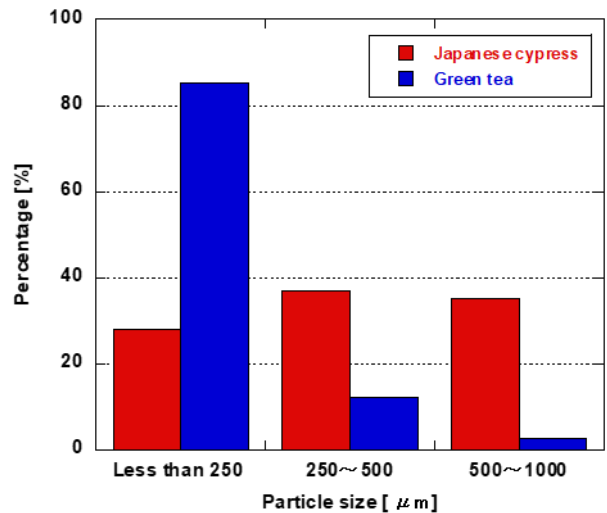


Fig. 2 Particle size distribution for each material

・成形条件と粒子密度の関係

図3にヒノキバイオコークスの成形圧力と粒子密度との関係を示す。成形圧力 22.8 MPa に着目すると、成形温度が上がるに連れ、粒子密度が増加していることが分かる。成形温度 343 K の粒子密度は、 1.0 g/cm^3 を下回っており、圧密化が不十分である。成形温度 383 K 以上の粒子密度は、 1.0 g/cm^3 を超えているものの、成形温度 423 K の粒子密度が 1.16 g/cm^3 、463 K の粒子密度が 1.17 g/cm^3 とほぼ等しいことから、成形圧力 22.8 MPa では成形温度 423 K 以上に熱を加えても熱塑性変形が生じず、粒子密度は 1.17 g/cm^3 程度が上限値と考えられる。そのため、より圧密化するためには成形圧力を大きくする必要がある。成形温度 463 K の成形圧力を変化させたときの粒子密度に着目する。成形圧力 5.7 MPa と 11.4 MPa は粒子密度 1.0 g/cm^3 を下回っている。成形圧力を上げるに連れ粒子密度は増加し、成形圧力 22.8 MPa では 1.0 g/cm^3 を超え、成形圧力 45.6 MPa 以上では真密度に漸近した約 1.40 g/cm^3 となり、極限值に達している。

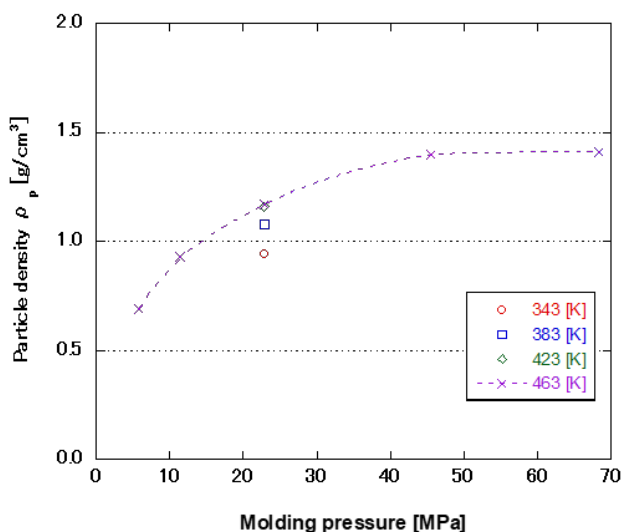


Fig. 3 Correlation between molding pressure and particle density for Japanese cyapress

この真密度に極めて近い粒子密度は、粒子同士の接触面積を最大化し、バイオコークス成形における化学的接着が最も生じやすくなっていると洞察する。本実験条件においては、直径 4 mm のヒノキバイオコークスを成形する際の成形圧力と成形温度の適正範囲は、成形圧力 45.6 MPa 以上、成形温度 463 K であると考えられる。

図4に緑茶滓バイオコークスの成形圧力と粒子密度との関係を、図5に成形温度が 383 K、成形圧力が左から 5.7 MPa、11.4 MPa、22.8 MPa、45.6 MPa、68.4 MPa

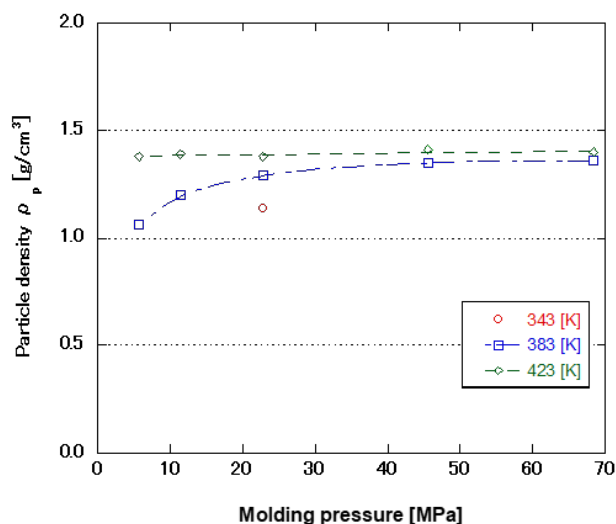


Fig. 4 Correlation between molding pressure and particle density for green tea



Fig. 5 Surface appearance of green tea biocoke for each molding pressure at molding temperature 383 K

で成形した緑茶滓バイオコークスの外観写真を示す。図4より、成形圧力 22.8 MPa に着目すると、ヒノキバイオコークスと同様に、成形温度が上がるに連れ、粒子密度が増加していることが分かる。しかし、緑茶滓バイオコークスは、成形温度 343 K における粒子密度が 1.14 g/cm^3 と 1.0 g/cm^3 を超えている。これは、前述した粒度分布が影響しており、細かい粒子が多いため、初期充填時にある程度の圧密化がなされ、成形時に加熱・加圧されることにより、圧密が進行し、粒子密度が大きくなっているものと推察する。

また、緑茶滓は繊維質が少ないことから、圧縮時に繊維による反発力が小さくなり、圧密化しやすかったものと考えられる。成形温度を上げた 383 K と 423 K では、粒子密度はそれぞれ 1.29 g/cm^3 と 1.38 g/cm^3 となっている。図5より、成形温度が 383 K、成形圧力が 22.8 MPa のバイオコークスは、全体的に緑がかっており、バイオコークスの特徴である表面の黒色化が生じていない²⁾。そのため、成形圧力 22.8 MPa においては、成形温度が 423 K 以上は必要であるといえる。一方、成形圧力を大きくした場合にも、圧密を促すことができる。図4より、成形温度 383 K に着目すると、成形圧力

を上げるに従い粒子密度が増加していることが分かる。図5と対比して考えると、成形圧力 11.4 MPa までは緑茶の緑色を呈していた表面が、成形圧力 22.8 MPa では全体的に黒ずんでおり、粒子密度が 1.35 g/cm^3 を超えた成形圧力 45.6 MPa 以上では表面全体が艶のある黒色を呈している。これは、固体接触反応が生じていることを示しており、成形温度 383K では成形圧力 45.6 MPa 以上は必要であるといえる。成形温度 423 K に関しては、成形圧力にかかわらず粒子密度が 1.35 g/cm^3 を超えており、十分に圧密ができていると理解できる。このように、本実験における直径 4 mm の緑茶滓バイオコークスの適正な成形条件は、成形温度 383 K では成形圧力 45.6 MPa 以上、成形温度 423 K では成形圧力 5.7 MPa 以上であると考えられる。

・空隙率と固定炭素分率の関係

図6にヒノキの原料圧縮物とバイオコークスの密度と空隙率の関係を示す。原料圧縮物のかさ密度と空隙率との関係は、かさ密度 0.16 g/cm^3 に対し空隙率は 89%、かさ密度 0.48 g/cm^3 に対し空隙率は 67% である。一方、バイオコークスは、成形圧力 5.7 MPa および 68.4 MPa、成形温度 463 K で成形し、それぞれ粒子密度 0.69 g/cm^3 に対し空隙率は 53%、粒子密度 1.41 g/cm^3 に対し空隙率は 3.4% である。

図7に緑茶滓の原料圧縮物とバイオコークスの密度と空隙率の関係を示す。原料圧縮物のかさ密度と空隙率との関係は、かさ密度 0.56 g/cm^3 に対し空隙率は 60%、かさ密度 0.84 g/cm^3 に対し空隙率は 40% である。緑茶滓原料は $250 \mu\text{m}$ 以下の細かい粒子が多いため、かさ密度は 0.56 g/cm^3 以下になることはなく、空隙率は 60%

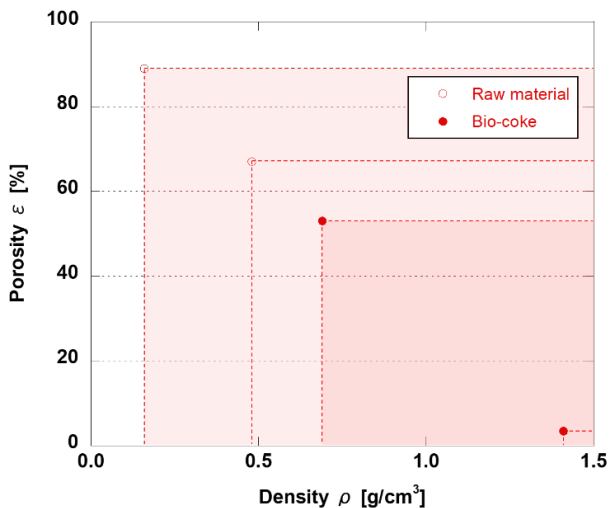


Fig. 6 Correlation between density and porosity for Japanese cypress

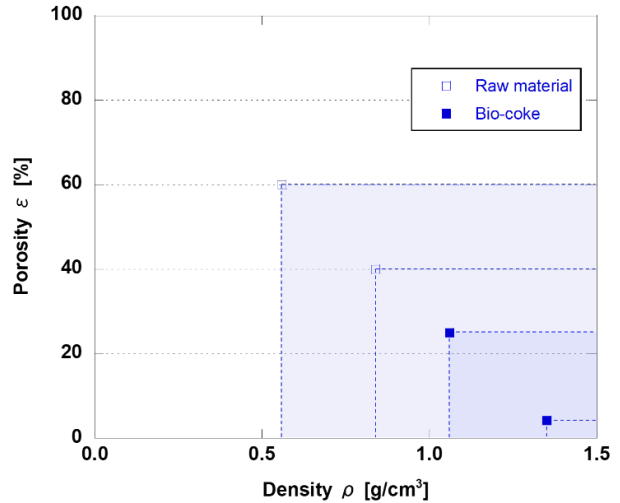


Fig. 7 Correlation between density and porosity for green tea

が上限であった。一方、バイオコークスは、成形圧力 5.7 MPa および 45.6 MPa、成形温度 383 K で成形し、それぞれ粒子密度 1.06 g/cm^3 に対し空隙率は 25%、粒子密度 1.35 g/cm^3 に対し空隙率は 4.3% である。

図8にヒノキに対する空隙率と空気および窒素雰囲気における残渣取率との関係を示す。図より、空気雰囲気について、バイオコークスは空隙率が大きくなっても残渣である灰分率はほぼ変化していない。バイオコークスは大きな圧力で粒子を圧壊して成形するため、低粒子密度であっても内部空隙は連続していないと考えられる。そのため、内部で高温空気の拡散が生じないので急激な燃焼が起きず、ゆっくりと完全燃焼し灰化していると理解できる。一方、圧縮した原料は空隙率が大きくなるに従い、灰分分率が大きくなっている。また、圧縮した原料は、バイオコークスに比べて灰分分率が大きい。これは、原料圧縮物はバイオコークスのように大きな圧

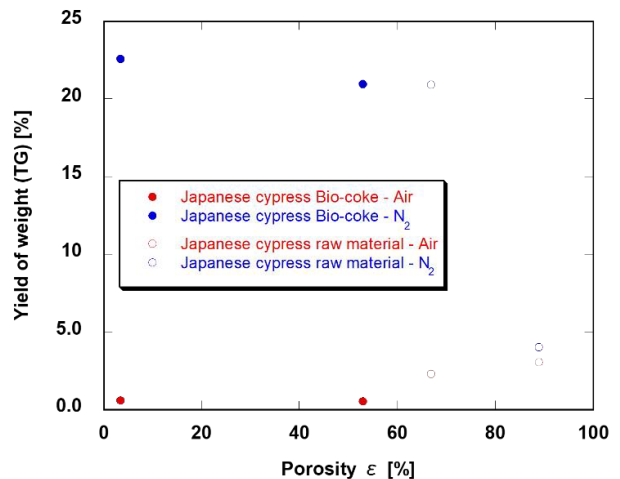


Fig. 8 Correlation between porosity and yield of weight under air / N_2 atmosphere for Japanese cypress

力を加えていないことから、粒子が圧壊されておらず、内部空隙が連続した構造を形成しており、高温空気が拡散しやすくなっているためと考えられる。この結果、原料内部で局所的に急激な燃焼による灰溶融が生じ、未燃分が多く残存したものと推察する。

窒素雰囲気については、バイオコークスは空隙率が大きくなることにより、約 1.5% のチャー（固定炭素分率 + 灰分分率）質量分率の減少が見られる。高粒子密度のバイオコークスは、化学的接着により高温においても形状ならびに小さい空隙率を保ちながら熱分解するので、内部への高温ガスの拡散が生じていない。そのため、バイオコークス内部へは熱伝導が主となり温度上昇しにくく、熱分解によるガス放出が少なくなっていると洞察する。一方、原料圧縮物は、空隙率が大きくなることにより、約 17% の大きなチャー質量分率の減少が見られる。空隙率が 89% の圧縮物のチャー質量分率は、空気雰囲気の灰分分率と比べて、約 1.0% の違いしかない。灰分分率には約 2.5% の未燃分が残っていると考えると差異は小さく、ヒノキの固定炭素分率は約 10% であることから、約 9% の固定炭素分率が揮発していると考えられる³⁾。また、バイオコークスと原料圧縮物とで空隙率の差異が小さい 67% と 53% とを比べると、チャー質量分率に大きな違いがない。これは、低粒子密度の成形条件では、粒子圧壊による機械的接着により高温で原料圧縮物に比べて形状を保持し、急激なガス化は抑えているが、内部の熱分解は生じるために原料圧縮物のガス化量と差異がないと推察する。

図 9 に緑茶滓に対する空隙率と空気および窒素雰囲気における残渣取率との関係を示す。図より、空気雰囲気について、バイオコークスと原料圧縮物ともに、空隙率

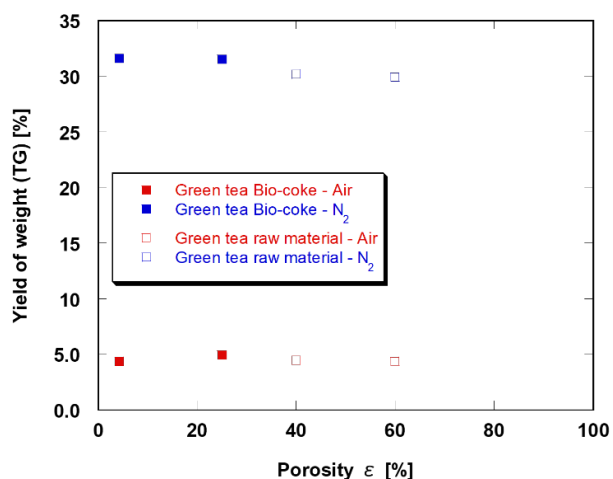


Fig. 9 Correlation between porosity and yield of weight under air / N₂ atmosphere for green tea

が大きくなっても灰分分率は変化していない。また、バイオコークスと原料圧縮物の灰分分率は同程度であることが分かる。このことから、緑茶滓の原料圧縮物では、ヒノキのような局所的な激しい燃焼は生じていないものと理解できる。これは、原料の粒子が細かいことにより、原料圧縮物の内部空隙が連続せず、高温空気の拡散が抑制されたためと推察する。

窒素雰囲気については、空気雰囲気と同様、空隙率が大きくなっても、バイオコークスと原料圧縮物ともにチャー質量分率に変化はない。先行研究から茶滓はガス化速度が緩やかな原料であることが分かっている^{4),5)}。このことが、空隙率が増加し、内部に高温ガスが拡散してもチャー質量分率の変化に影響しない要因の一つであると推察する。チャー質量分率の絶対値については、バイオコークスの方が原料圧縮物に比べて約 1.5% 大きい。これは、バイオコークスは原料圧縮物よりもガス化量が少ないことを示しており、バイオコークスの接着機構が原料圧縮物とは異なっており、高温においても緻密な構造を保持しているため、内部により多くのガス成分を残していると理解できる。

図 10 に各原料に対する空隙率と固定炭素分率との関係を示す。図より、ヒノキバイオコークスの固定炭素分率は、空隙率が 3.4% で 22.0%、空隙率が 53% で 20.5% である。ヒノキの圧縮物は、空隙率が 67% で 18.6%、空隙率が 89% で 1.0% である。これらのことから、空隙率を減少させることにより、固定炭素分率を増加させる効果があることが分かる。特に、バイオコークスに関しては、ヒノキ原料の固定炭素分率が約 10% であることを考慮すると、空隙率が大きいものであっても固定炭素分率は原料状態から約 10% もの向上があ

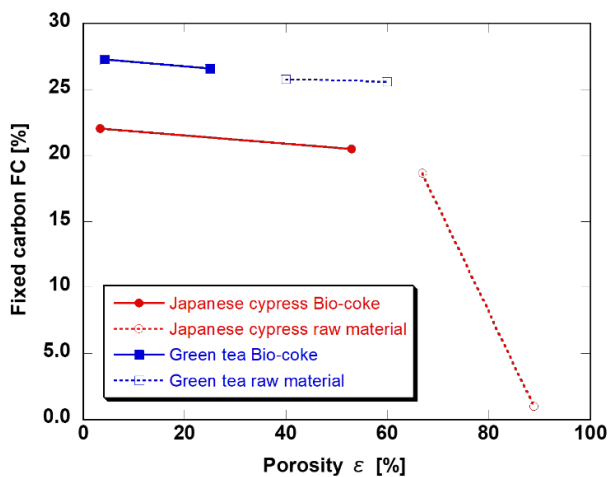


Fig. 10 Correlation between porosity and yield of weight under air / N₂ atmosphere for green tea

り、空隙率を小さくするとさらに1.5%の向上が見られる。これは、より空隙を少なくすることで化学的接着が生じやすくなり、セルロース繊維の結晶領域が増加したために、炭素構造が残存したものと推察する^{6),7)}。さらに、熱分解により生じたガスが原料粒子を炭化しつつ、粒子に取り込まれ、見かけ上固定炭素分率が増加している可能性も要因の一つと考える⁸⁾。一方、ヒノキの圧縮物に関しては、空隙率が67%のとき、固定炭素分率が約8%向上しているが、これはセルロースの結晶化によるものではなく、原料粒子にガスが残存したためと考える。

緑茶滓バイオコークスの固定炭素分率については、空隙率が4.3%で27.3%、空隙率が25%で26.6%である。緑茶滓の圧縮物は、空隙率が40%で25.7%、空隙率が60%で25.6%である。緑茶滓においても、空隙率を減少させることにより、固定炭素分率が向上している。緑茶滓の原料状態の固定炭素が約22%であることから^{4),8)}、バイオコークスは約5%、圧縮物は約4%である。緑茶滓では、バイオコークスと圧縮物を比べた際の固定炭素分率の差がわずかである。これは、緑茶滓に含まれるセルロース成分が少ないことに起因していると考えられる。ただし、バイオコークスは空隙率を小さくすることによる固定炭素分の向上があり、これはセルロースの結晶領域が増加したことに起因するものと推察する。

【結 言】

本研究では、バイオコークスが有する機能性が発現する要因の一つである高温雰囲気下における固定炭素分の残存状況を調べることを目的とした。バイオコークスは、成形圧力と成形温度をパラメータに異なる粒子密度のものを作成し、成形性について検討した。パラメータとした成形条件の中から大きく粒子密度が異なる条件を選定し、成形したバイオコークスと原料を押し固めた圧縮物を対象に熱重量分析を行い、1173 Kの高温雰囲気下で残存する灰分分率ならびにチャー質量分率を調べた。固定炭素分率は得られた灰分分率とチャー質量分率から導出し、空隙率は原料となるヒノキと緑茶滓の真密度をもとに算出した。灰分分率、チャー質量分率、固定炭素分率それぞれと空隙率との関係を検討し、以下の知見が得られたので報告する。

(1) 1 mm 以下のヒノキと緑茶滓の粒度分布は、ヒノキ

は250 μm 以下、250~500 μm 、500~1000 μm の3つの粒子径がほぼ均等に混在しているが、緑茶滓は250 μm 以下の粒子径が80%以上を占めていることが分かった。

- (2) バイオコークスの成形には圧力と温度が影響し、圧力と温度のどちらか一方が低いと粒子密度が低くなり、バイオコークスの特徴である表面の黒色化が起きないことが分かった。
- (3) ヒノキバイオコークスは、約50%の空隙率の変化があっても灰分分率が変わらないことが分かった。
- (4) ヒノキの圧縮物は、空隙率が大きくなると未燃残渣が増え、見かけ上灰分分率が増えることが分かった。
- (5) 緑茶滓バイオコークスは、約20%の空隙率の変化においては灰分分率が変わらないことが分かった。
- (6) 緑茶滓の圧縮物は、粒子径が細かいために空隙率の上限が約60%となり、これ以下の空隙率においては灰分分率が変わらないことが分かった。
- (7) ヒノキバイオコークスは、空隙率が減少すると固定炭素分率が増加し、その増加率は約1.5%であった。
- (8) 緑茶滓バイオコークスは、空隙率が減少すると固定炭素分率が増加し、その増加率は約1.0%であることが分かった。
- (9) ヒノキと緑茶滓ともに空隙率が減少すると、固定炭素分率がそれぞれの原料状態の固定炭素分率の約10%ならびに22%よりも増加することが分かった。

【謝 辞】

本研究は、近畿大学理工学部機械工学科学生（当時）の川西正晃君の協力を得て実施された。熱分析重量分析は近畿大学共同利用センターにて実施した。ここに謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 遠藤 展, 木粉をつくる一目皿付き衝撃型粉碎機の処理能力と正しいモータ馬力の選定について一, 林産試験場林産誌だより, 1, pp.1-7, 1994.
- 2) 水野 論, 井田 民男, 瀧端 学, 難波 邦彦, 加子坂 篤志, 藤田 修, 草本系バイオマス原料とする高密度・高硬度固形物の成形特性, 日本エネルギー学会誌, 91 (1), pp.41-47, 2012.
- 3) 伊東 弘行, 徳長 稜, 野上 駿平, 三浦 正義, 高密度バイオマスブリケット有炎燃焼挙動に及ぼすバイオマス原料の影響, 日本機械学会論文集, 85 (879), p.19-00208, 2019.

- 4) 水野 諭, 森田 明宏, 井田 民男, 難波 邦彦, 測端 学, 澤井 徹, 多様なバイオマス資源の組成・熱分解分析から抽出した特性とその相関, 高温学会誌, 34 (4), pp.153-159, 2008.
- 5) 井田 民男, 高木 亮伍, 水野 諭, サンチェス エドムンド, 難波 邦彦, 緑茶を原料とする高密度バイオ固形燃料の形成条件による物理的特性に関する研究, スマートプロセス学会誌, 2 (2), pp.83-87, 2013.
- 6) Supitchaya CHERDKEATTIKUL, Tamio IDA, The influence of additional hemicellulose on Japanese cedar based pre-carbonized solid biofuel properties, Mechanical Engineering Journal, 6 (6), p.19-00282, 2019.
- 7) Supitchaya CHERDKEATTIKUL, Yusuke MORISAWA, Tamio IDA, Surface Structural Transformation of Pre-carbonized Solid Biomass from Japanese Cedar via ATR-FTIR and PCA, Analytical Sciences, 36 (6), pp.723-729, 2020.
- 8) Nozomu SONOYAMA, Jun-ichiro HAYASHI, Characterisation of coal and biomass based on kinetic parameter distributions for pyrolysis, Fuel, 114, pp.206-215, 2013.

バイオコークスの燃焼特性に及ぼすヒノキ炭混合の効果

金田 奈実、井田 民男

(近畿大学バイオコークス研究所)

【緒言】

バイオコークスは石炭および石炭コークス代替燃料として開発された固体バイオ燃料である。バイオコークスの原料はバイオマス 100% であるが故に石炭コークスと比較して、揮発分含有率が高いため発熱量が低い。そこで、炭化物を混合することによる発熱量向上が提案された。鳥居らは竹にスギ炭化物を混合したバイオコークスを成形し、その成形特性を調査した¹⁾。その結果、炭化物の混合率が同一の場合、成形温度と成形圧力が上昇すると見かけ密度が高くなることが示された。これは炭化物の混合率が増加するほどヘミセルロースやリグニンなどの高密度固化機構に参与する成分の含有率低下が原因であるが、成形圧力を高めることで見かけ密度を向上させ、燃料強度を維持できることが示唆された。また著者らも緑茶にヒノキ炭を混合したバイオコークスを成形し、同様の結果を得た²⁾。本研究では、燃焼特性に着目し、緑茶にヒノキ炭を混合したバイオコークスの燃焼挙動について調査した。バイオコークスの燃焼特性はチャー燃焼が支配的となるため、総燃焼時間の向上が期待される³⁾。

【実験方法】

・原料

バイオコークス基材には緑茶を選定した。緑茶はヘミセルロースやリグニンを多く含むため、良好な成形特性を有する。また、炭素含有量が高く発熱量が高い。炭化物としてヒノキ炭を使用した。ヒノキはスギに次いで多い人口林であり、特に北関東以南太平洋側に植栽されている⁴⁾。Table 1 に総発熱量、元素分析、工業分析の結果を示す。総発熱量はボンベカロリメーター (CA-4AJ、島津製作所) を用いて測定し、元素分析および工業分析は各々 JIS M 8813、JIS M 8812 に準拠し測定された。ヒノキは炭化により炭素含有率が増し、発熱量が向上していることがわかる。また、固定炭素量も 77% と非常に高いことを確認した。

・バイオコークス成形

バッチ式のバイオコークス製造装置を用いて、成形を行った。成形条件を Table 2 に示す。初期含水率が緑茶は 3 mass% に調湿し、ヒノキ炭は気乾状態の約 6 mass% のまま使用した。成形温度は 130、150、170、

Table 1 Material properties.

Gross calorific value [MJ/kg]		Ultimate analysis [mass %-daf]				Proximate analysis [mass %-dry]		
		C	H	N	S	Volatile matter	Fixed carbon	Ash
Green tea	20.4	51.3	5.94	5.19	0.3	72.2	22.2	5.6
Cypress charcoal	29.4	78.93	3.71	0.29	0.006	22.2	77.1	0.7

Table 2 Bio-coke production condition.

Material	Green tea, Cypress charcoal
Diameter [mm]	20
Particle size [mm]	1 mm or less
Moisture content [mass %]	Green tea: 3 mass % Charcoal: 6 mass % (air-dried)
Cypress charcoal blended ratio [mass %]	0, 10, 20, 30
Molding temperature [°C]	130, 150, 170, 190
Molding pressure [MPa]	20, 30, 40



(a) Green tea (b) Cypress charcoal

Fig. 1 Appearance of each sample.

190℃、成形圧力は20、30、40 MPaとした。成形温度190℃で成形可能な成形条件はヒノキ炭混合20 mass%（成形圧力20 MPa）、ヒノキ炭混合30 mass%（成形圧力20、30、40 MPa）のみであった。

・ 燃焼試験

燃焼試験は既報の燃焼試験装置を用いた³⁾。ビデオカメラで燃焼挙動を撮影し、着火から消炎までを有炎燃焼時間、消炎から燃え切りまでをチャー燃焼時間とした。また、有炎燃焼時間とチャー燃焼時間の和を総燃焼時間とした。

【実験結果および考察】

・ 見かけ密度

バイオコークスの見かけ密度を Fig.2 に示す。成形圧力20 MPaに着目すると、ヒノキ炭混合率の上昇は見かけ密度を低下させることがわかる。しかし、成形圧力および成形温度を上げることで見かけ密度を高めることができる。

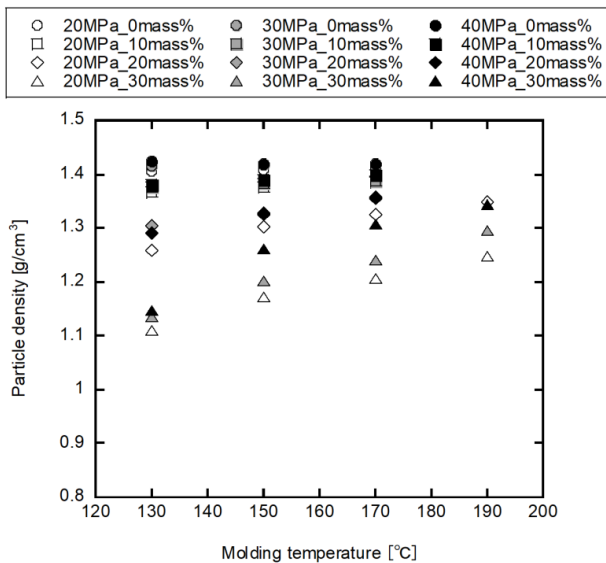


Fig. 2 Particle density of blended biocoke.

・ 燃焼特性

(a) 有炎燃焼時間

成形温度に対する有炎燃焼時間を Fig. 3 に示す。ヒノキ炭混合率が高くなるにつれ、有炎燃焼時間は短縮、成形温度が高くなるにつれて、有炎燃焼時間は延長される傾向が見て取れる。この要因としては、ヒノキ炭を混合することによる揮発分の減少と見かけ密度の低下の2つが考えられる。そこで、Fig. 4に見かけ密度と有炎燃焼時間の関係を示す。見かけ密度が高くなるにつれ、有炎

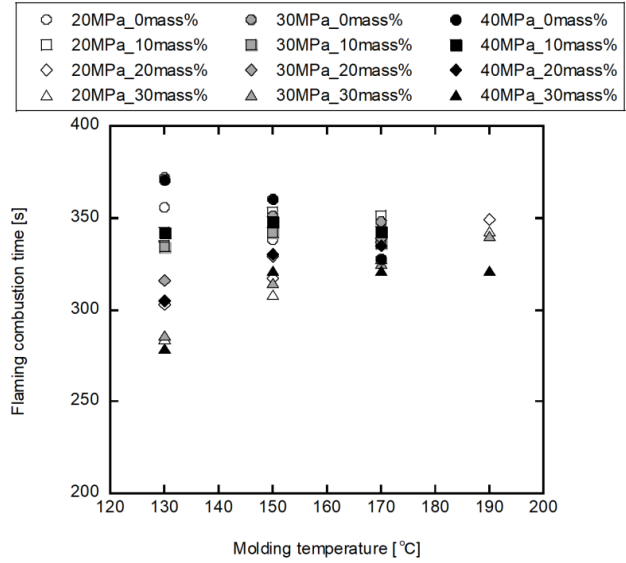


Fig. 3 Flaming combustion time for molding temperature.

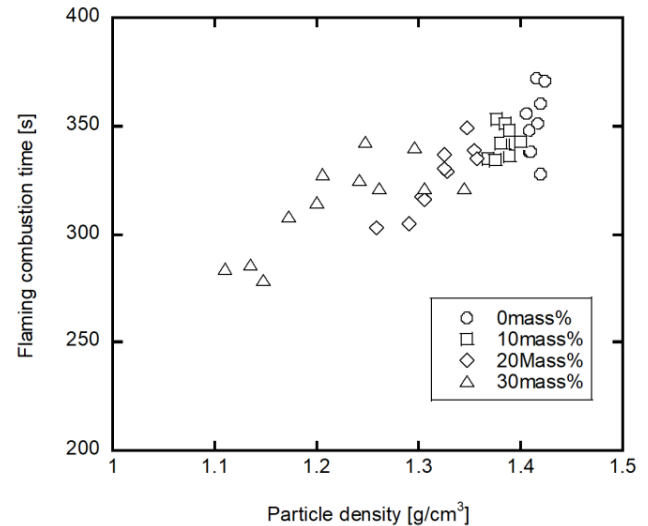


Fig. 4 Flaming combustion time for particle density of biocoke.

燃焼時間は延長する傾向が見られた。これは見かけ密度が高くなることにより温度拡散率が低下し、その結果、ガス化速度が遅延したためであると推察される。また一方で、ヒノキ炭混合率30 mass%で見かけ密度1.2 g/cm³以上では有炎燃焼時間は一定となっている。これは揮発分量低下による有炎燃焼時間の短縮が一因であると考えられる。

(b) チャー燃焼時間

成形温度に対するチャー燃焼時間を Fig. 5 に示す。ヒノキ炭混合率が増加、成形温度が高くなるほど、チャー燃焼時間は延長することがわかる。これらの要因としては、固定炭素量と見かけ密度の増加の2つが考えられる。そこで、固定炭素量とチャー燃焼時間との関係を

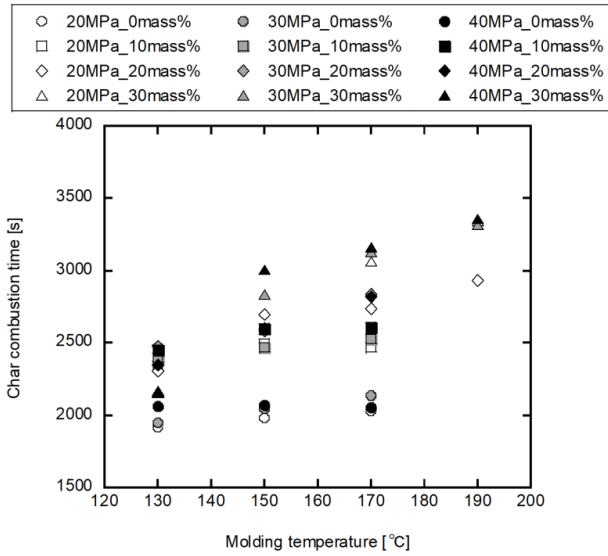


Fig. 5 Char combustion time for molding temperature.

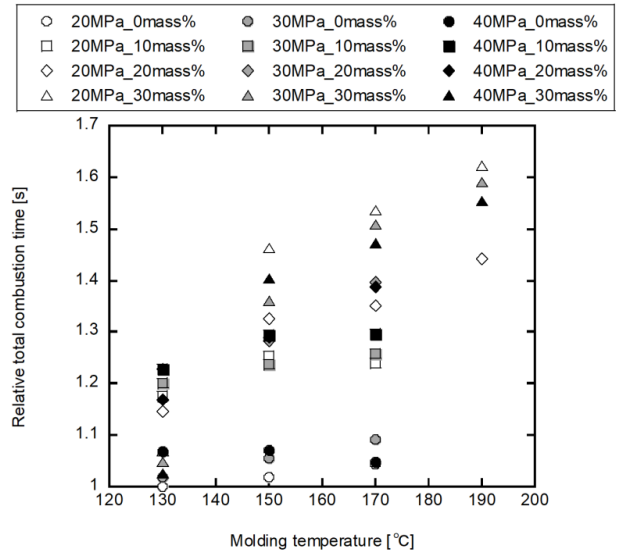


Fig. 7 Relative total combustion time.

Fig. 6a に示す。固定炭素量が高くなるにつれてチャー燃焼時間にばらつきが生じているように見える。Fig. 6b に成形圧力 20 MPa のみの結果を抜粋して示す。成形温度が低い成形条件において、成形温度が低い場合にチャー燃焼時間が低下していることがわかる。これは見かけ密度低下する条件とも一致しており、見かけ密度低下が内部への空気拡散を促進させているものと考えられる。以上より、見かけ密度が十分に高い場合には、固定炭素量とチャー燃焼時間は相関関係にあることが示唆される。

(c) 総燃焼時間

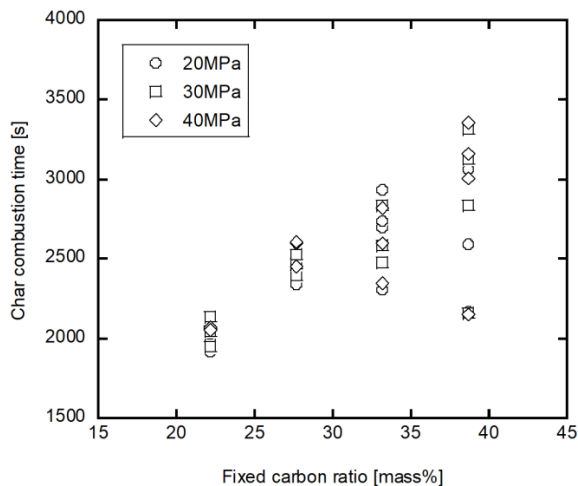
成形温度 130 °C、成形圧力 20 MPa、ヒノキ炭混合率 0 mass % を基準とした相対総燃焼時間を Fig. 7 に示す。成形温度が高く、ヒノキ炭混合率が高くなるにつれて、

総燃焼時間は延長された。成形温度 130 °C では、成形圧力増加とヒノキ炭混合により、約 1.2 倍の総燃焼時間を得ることができ、成形温度の上昇により、最大約 1.6 倍の総燃焼時間を得た。

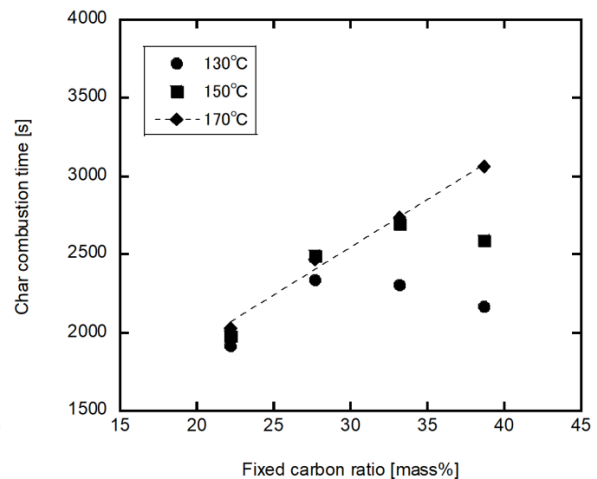
【結 言】

発熱量向上を目的にヒノキ炭を混合したバイオコークスの燃焼特性を調査した結果、次のことを得た。

- (1) 見かけ密度低下は温度拡散率を低下させるため、有炎燃焼時間を短縮させる。
- (2) 炭化物混合率増加は揮発分含有量を減少させるため、有炎燃焼時間を短縮させる。
- (3) 固定炭素量とチャー燃焼時間は相関関係にあることが示唆された。ただし、見かけ密度低下はサン



a) Molding pressure 20, 30, 40 MPa



(b) Molding pressure 20 MPa

Fig. 6 (Char combustion time for fixed carbon ratio.)

プル内部への空気拡散を促進するため、チャー燃焼速度を加速させる。

- (4) ヒノキ炭混合をすることにより、総燃焼時間を延長させる効果を確認した。30 mass % 混合により総燃焼時間は約 1.2~1.6 倍延長された。

【謝 辞】

本研究は、近畿大学工学部機械工学科学生（当時）の奥村元貴君の協力を得て、実施された。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 鳥居祐介, 水野諭, 西健治, 市野善三, 大政光史, 澤井徹, 井田民男, 測端学, 竹とスギ炭化物の混合試料によるバイオコークスの成形特性, スマートプロセス学会誌, 1 (2), 63-70 (2012).
- 2) 金田奈実, 井田民男, 緑茶とヒノキ炭混合バイオコークスの成形特性, スマートプロセス学会学術講演会講演概要, 8 (2022).
- 3) 田上奈実, 井田民男, 草 / 木本計バイオマスを原料としたバイオコークスの固体燃焼挙動, 第 56 回燃焼シンポジウム, C133 (2018).
- 4) 林野庁, スギ・ヒノキ林に関するデータ, https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/kafun/data.html (参照日 2023 年 12 月 11 日).

2022 年度
近畿大学 バイオコークス研究所
【最先端再生可能エネルギー研究 ジュニアセミナー】

後援：恵庭市・恵庭市教育委員会・北広島市・北広島市教育委員会

科学・再生可能エネルギーに興味のある方、集まれ！

近畿大学バイオコークス研究所は、小学生高学年、中学生向けのジュニアセミナーを開催します。エネルギー実験を間近で見てみたい方、科学・再生可能エネルギーに興味のある方、是非ご応募ください。研究所の見学もできます！

セミナー名：最先端再生可能エネルギー研究 ジュニアセミナー

日時：2022年12月24日（土曜日）13：00～17：00

対象：小学生高学年・中学生（2名／組、親子、兄弟、友達等）

継続セミナーにつき、対象者を限定して案内

開催場所：近畿大学バイオコークス研究所（恵庭市南島松 157-1）（駐車可能）

セミナー内容：1 摩擦で火をつけるって何？
2 熱エネルギーの移動って何？
3 再生可能エネルギーって何？

お申込み方法：メールによる申し込み限定； kindaieniwa@gmail.com

氏名、学年、性別、住所、電話番号、保護者同伴の有無を送ってください。

受理され、参加確定者には、確認電話します。

アクセス



◆ 講師紹介 ◆



井田 民男 (いだ たみお)

【プロフィール】 豊橋技術科学大学大学院修了 博士 (工学)
近畿大学バイオコクス研究所 所長/教授

【専門分野】 バイオエネルギー工学、燃焼工学

【コメント】 再生可能 (さいせいかのう) って何だろう? 地球のシステムエネルギーを部分的 (ぶぶんてき) にもらう再生可能エネルギーをかんがえてみましょう。さらに、未来のエネルギーについて考えてみましょう。



澤井 徹 (さわい とおる)

【プロフィール】 大阪大学大学院工学研究科修了 博士 (工学)
近畿大学理工学部教授、バイオコクス研究所副所長

【専門分野】 熱工学、バイオエネルギー工学

【コメント】 バイオマスって何だろう? バイオマスから作られるエネルギーや燃料は、太陽エネルギーの恵みを蓄 (たくわ) えた地球に優しいエネルギー資源 (しげん) とも言えます。バイオマスとバイオエネルギーについて考えてみましょう。



渕端 学 (ふちはた まなぶ)

【プロフィール】 大阪大学大学院工学研究科修了 博士 (工学)
近畿大学理工学部教授

【専門分野】 燃焼工学, 熱工学

【コメント】 エネルギーって何だろう? 電気? 自動車? ストープ? また、エネルギーはどうやって皆さんのところへやって来て、使ったエネルギーはどこへ行くのでしょうか? 普段、エネルギーを便利 (べんり) に使っているしくみを考えてみましょう。

当日、参加受付でご協力ください! (※感染対策のイラスト付きをお願いします)

マスク着用、手指の消毒、検温

37.5 度以上の発熱がある方、発熱・咳・咽頭痛などの症状がある方、同居家族や身近な知人に感染が疑われる方いる場合、過去 14 日以内に政府から入国制限、入国後の観察期間を必要とされている国、地域等へ渡航又は当該在住者との濃厚接触がある場合は、参加を見合わせて下さい。ご協力をお願い致します。

近畿大学バイオコークス研究所報告

第21号 2023

令和6年2月1日印刷

令和6年2月1日発行

発行者 近畿大学バイオコークス研究所



近畿大学
KINDAI UNIVERSITY