

鉄鉱石焼結プロセスへの廃熱・バイオマスエネルギー高効率利用システム

研究代表者 東北大学 大学院環境科学研究科 教授 葛西栄輝

1. 緒言

バイオマス・ニッポン総合戦略¹⁾では、「バイオマス」を「再生可能な、生物由来の有機性資源で化石燃料を除いたもの」と定義している。バイオマスの燃焼などによって放出される CO₂ は、生物の成長過程で光合成により大気中から吸収した CO₂ であるため、大気中の CO₂ を増加させない「カーボンニュートラル」と呼ばれる特性を有している。この特性から、主要な CO₂ 排出の原因である化石燃料の一部をバイオマス資源で代替することで CO₂ 排出量の実質的な削減が期待できる。例えば、製鉄プロセスにおいて化石燃料の 20% をバイオマスで置換することができれば、銑鉄 1 トンあたり約 15% (300 kg-CO₂-eq) の CO₂ 排出量の削減が期待できることが報告されている²⁾。

通常、バイオマスは水分を多く含有し、エネルギー密度が小さい等の性質を持つが、炭化処理(乾留)することにより、

- 水分などが脱離することでエネルギー密度が増加し、運搬・保管コストが低減する。
- 無機物化するため、腐敗・分解が進行しない。
- 可燃性の揮発分が脱離するため、表面燃焼主体の安定な燃焼特性を示す。
- 熱分解によりセルロース構造が破壊され、粉碎が容易になる。

などの利点が得られる。したがって、炭化プロセスはバイオマスを利用するために重要な予備処理法の一つである。川口ら³⁾は、鉄鉱石塊成化プロセス(焼結プロセス)の凝結材に農産系バイオマスを直接用いても焼結層内の温度は上昇しない一方で、十分炭化したバイオマス炭では無煙炭やコークスと同等の生産性が得られ、なおかつ排気中の CO₂、NO_x、SO_x およびダストの発生量が減少すると報告している。

現行の木質バイオマスの炭化プロセスは、バイオマス自身の部分燃焼を熱源としているため、バイオマス由来のエネルギーを余分に消費していると言える。スギ木材を外熱(電気炉を用いて 200°C/h で昇温し 800°C で 1 時間保持)で炭化するとその収率は 25.2%⁴⁾であるのに対し、伝統的な炭窯での炭化での収率は約 20%⁵⁾である。この収率の差が部分燃焼によるエネルギーロスだと考えられる。もし、バイオマスの炭化プロセスの熱源として、金属製錬や化学工業などの高温プロセスからの未利用排熱を利用することができれば、より効率的にバイオマスチャーを製造できるだけでなく、排熱を有効に活用することができる。

製錬所やセメント工場、製油所、廃棄物燃焼処理場などの高温プロセスを扱う工場内には、様々な温度の排熱が存在している。例えば、一貫製鉄所では、中高温のエクセルギーの大きな排熱が多く存在し、それは年間で日本全体の 1 次エネルギー消費量の約 4% に及ぶ。粗鋼

の年間生産量が 600 万トン規模の一貫製鉄所では、250～1500 °C程度の排熱が多く存在し、その一部は回収されているものの、これまで利用が難しい排熱の有効な回収技術は開発されてない⁶⁾。これらの廃熱の回収が一定以上進んでいない理由としては、

- 熱交換が困難(液体含有ガス、製品顕熱、高粘性流体など)
- 回収した熱の輸送・貯蔵用の適切な媒体がない
- ダストや腐食性ガスを含み取り扱いが困難

などがあげられる。そのため、製鉄所での排熱全体の回収率はエクセルギー換算で 25%と低く、さらなる回収率向上のための技術開発が求められている。

未利用の高温ガス状の排熱の多くは前述のように高濃度のダストや腐食性ガスを含有しているため、バイオマスの炭化熱源として直接利用するのは困難である。しかし、粒子充填層や耐火物構造体など、固体蓄熱層を使用した排ガス顕熱の回収は、古くから多くのプロセスに適用されているため、排熱の回収媒体としてダストから直接影響を受けない耐食・耐熱性の高い蓄熱体を用いれば、排熱回収の可能性がある。一方、従来の固体蓄熱体に蓄えられた熱を伝える媒体は液体やガスである。しかし、木質バイオマスは固体であるため、従来にはない固体同士の接触により粉砕するボールミルなどを応用した伝熱方法を採用する必要がある。もし、蓄熱体粒子に比重の高い金属鉄粒子を用いることができれば、バイオマスの粉砕処理も同時にすることができる。木質バイオマスの粉砕処理には大きなエネルギーを費やしている⁷⁾ため、炭化と同時に粉砕が可能であれば、より省エネルギーにつながる。

そこで、本研究では、蓄熱体粒子をバイオマスの炭化・粉砕媒体として利用する新しい炭化プロセスを提案する。Fig.1 に提案する炭化プロセスの概略図を示す。提案プロセスでは、製鉄プロセスから発生する転炉ガスや焼結炉ガスなどの排ガスを、蓄熱体粒子を充填した蓄熱装置内を向流方式で通過させ、所定の温度まで蓄熱を行う。蓄熱した蓄熱体粒子と、炭化させたいバイオマスを所定のフィード量比において回転炭化炉に投入し、直接混合することによ

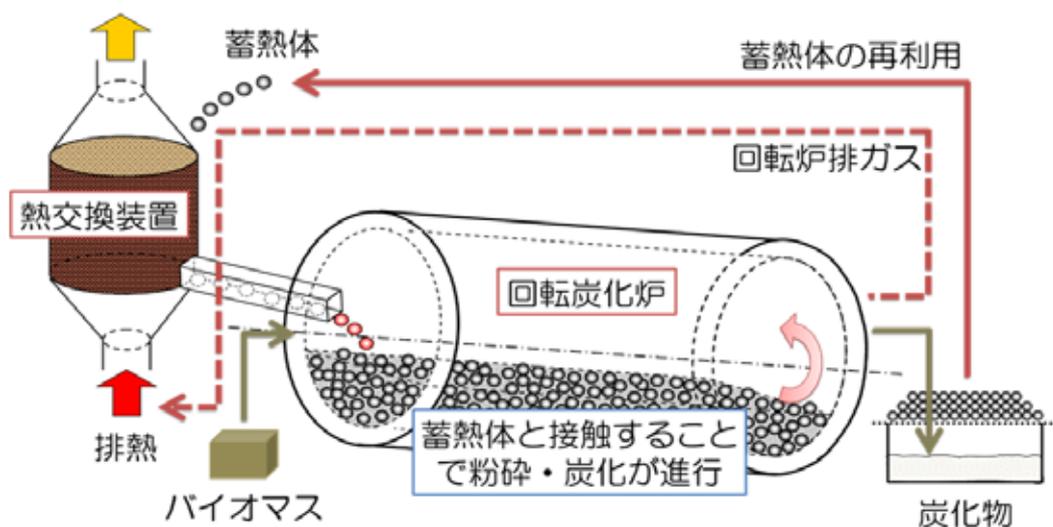


Fig. 1 Image of proposed carbonization process

って、蓄熱体粒子からの伝導伝熱によりバイオマスを乾燥しつつ、粉碎も同時に行いながら、高効率に炭化を進行させる。炭化後はふるい分けや磁力選別などの簡便な操作で蓄熱体粒子と被炭化物とを分離し、蓄熱体粒子は何度も再利用される。

本炭化プロセスの特徴として、以下の項目があげられる。

- 蓄熱体粒子との直接接触により、バイオマスを急速昇温させることができ、乾燥と炭化が同時に進行する。
- 炭化とともに粉碎も進行するため、炭化後の蓄熱体粒子との分離が容易である。
- 蓄熱体粒子を繰り返し利用できる。
- 通常の熱風炭化方式と比べ排ガス量が少なく、顕熱の持ち出しが小さくなるとともに、排ガス処理量が少ない。

本プロセスについて、林ら⁸⁾はコールドモデルを使用した回転炉内混合粒子流れ特性の実験的解析と、離散要素法に基づくシミュレーション、蓄熱体粒子と湿潤粉粒体層からなる複合粒子の回転炉内伝熱・乾燥シミュレーションを行った。その結果、回転炉内における蓄熱体と湿潤粉粒体の混合流れは、完全混合流れと押し出し流れの中間状態であると予想でき、また、炭化プロセスの実機化に際し、シミュレーションの結果を適用すると、回転炉の伝熱容量係数が通常の場合よりも数倍大きく、回転炉のサイズが大幅に小さくなる可能性を示し、蓄熱装置もコンパクトになると報告している。このことから、本提案プロセスの有効性が示唆される。

提案するプロセスでは、接触伝熱によりバイオマスが炭化されるため、昇温速度が非常に大きいことが予想される。Cetin *et al.*⁹⁾は、試料を落下させつつ加熱する装置である Drop Tube Furnace (DTF) を用いて高昇温速度 ($=6 \times 10^6$ °C/min) でバイオマスを炭化した場合、得られたバイオマスチャーの表面組織が熔融したと報告している。しかし、得られたチャーの化学的特性に関する記述はない。さらに、提案するプロセスのような急速加熱と粉碎が同時に進行して製造されたチャーの特性は不明である。

そこで本研究では、バイオマスの炭化プロセスを省エネ・効率化するために、製鉄所をはじめとする未利用の排熱が多量に存在するプロセスに対し、排熱エネルギーを回収・蓄積可能な金属系蓄熱体を利用する新しい炭化プロセスの実現を目指す。そのため、半連続的にバイオマスを投入できる小規模の急速炭化装置を作製し、炉内のバイオマスの流通・蓄熱体との接触・炭化・粉碎などの機構の検討および作成されたバイオマス炭の特性の調査を行うことを目的とする。

2. 実験方法

2.1 試料と装置

市販のスギ木材を小さく切断し、2.0～2.8 mm にふるい分けしたものをバイオマス試料として

用いた。1粒の大きさと質量は $8\sim 10\text{ mm}^3$ 、 $4.0\sim 5.0\text{ mg}$ で含水率は 8.33% であった。直径 9.5 mm の SUS304 製金属球を蓄熱体として用いた。質量は1個あたり 3.6 g であった。

使用した模擬乾留炉の概略図を Fig.2 に示す。反応管は二重構造となっており、外管はインコネル製、内管は SUS316 製、内管中央のチャンバーは内径 36 mm 、長さ 70 mm 、その先の冷却部は内径 36 mm 、長さ 280 mm であり、その間を厚さの 3 mm メッシュで区切っている。メッシュは直径 30 mm 、板厚 3 mm の SUS316 円盤に直径 4.2 mm の穴を同心円上に空けたもので、空隙率は 37.24% とした。内管は $5\sim 15\text{ rpm}$ で回転でき、ガスも内管のみを流通する構造とするため、ガス入口側はクイック・コネクツを、ガス出口側はウルトラ・トール継手を用いている。反応室には $3\times 5\times 70\text{ mm}$ の羽を2枚取り付け、バイオマスと蓄熱体が共に回転するようにした。炭化後の試料が直ちに冷却されるように、チャンバーの両側は水冷されている。

バイオマス試料は図の左側から装入し、チャンバー内で蓄熱体と接触し炭化・粉碎され、その後メッシュによって蓄熱体と分離・冷却される。

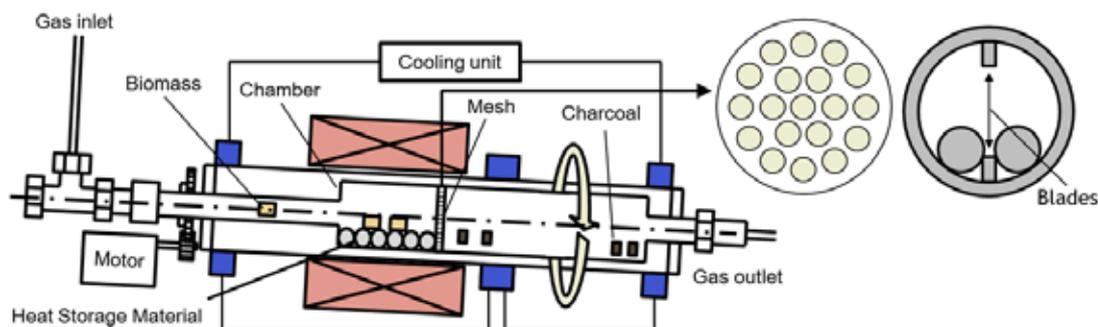


Fig. 2. Schematic diagram of carbonization furnace which simulates new process.

また、本実験装置で製造したバイオマス炭との比較をするため、下記に示す3種類の方法でも炭化実験を行った。

・ Cold および Hot Start Condition でのチャーの作製方法

Fig.3-a)に Cold および Hot Start に用いた装置図を示す。SUS304 製のパイプを用いて作製したボートに SUS 球 10 個とバイオマス片を置いた。Fig.4 に SUS 球とバイオマス片を設置した SUS 製ボートの写真を示す。Cold Start では、上記ボートを炉の中央部に設置し、室温から昇温速度 $0.167\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ で所定温度まで加熱した。3.6ks 保持した後、ボートを直径 6 mm のインコネル 601 製の棒を用いて、Fig.3-a)に示す右側の水冷部分に移動することにより冷却し、チャーを得た。Hot Start では、所定温度まで昇温した炉の反応管の左端に上記ボートを設置し、前述のインコネル棒を用いて反応管の中心部まで挿入し、3.6ks 保持した。その後、Cold Start と同様にボートを右側に移動させることで冷却し、チャーを得た。なお、予備試験として、ボート内の昇温速度を計測したところ、 $4.667\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ であった。

- Hot-Charge Start Condition でのチャーの作製方法

炉を所定温度に昇温した後、SUS 球 10 個のみを入れたボートを反応管内に設置した。Fig.3-b)に示すように、バイオマス片は内径 4mm のアルミナ管の左端に入れ、反応管内のガスを十分に N₂に置換した後に、直径 2.5mm の SUS 棒を用いてボート内の SUS 球上に投入した。その後、所定時間保持し、Cold Start と同様にボートを右側に移動させ、冷却した。なお、保持時間は 0.9、1.8、3.6 ks とした。本方法ではバイオマス片の昇温速度を計測することは困難であるが、Hot Start よりは大い。

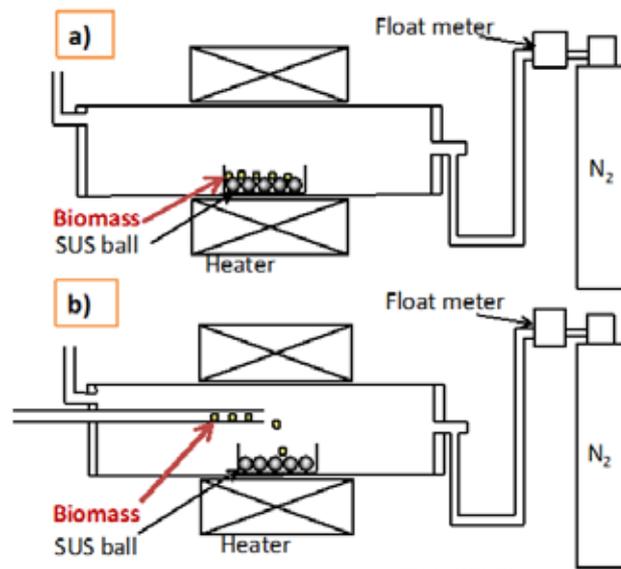


Fig.3 Schematic diagram of carbonization furnace based on conventional methods.



Fig.4 Appearance view of SUS balls and biomass on SUS boat.

2.2 炭化試験

まず、室温において、内管のみを取り出した状態でチャンバーに蓄熱体 10 個とバイオマス試料 100 粒を装入し、所定の速度で回転させた。この際バイオマス試料がメッシュから出てくる様子をカメラで撮影し、その映像から時間に対する反応器内の試料残量を求めた。Fig.5 の点線に回転時間と試料残量の例を示す。これは指数的減衰を示すため、反応器内の試料個数を $N(t)$ 、初期投入個数を $N_0 (= 100)$ とすると、反応器内の試料残留率 $P(t)$ は時定数 τ を

用いて以下のように表すことができる。

$$P(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

本研究では試料残留率 $P(t)$ を時間 t に対してプロットし、この式に当てはめて得られる時定数 τ を平均滞在時間とした。

また、所定数の蓄熱体を入れたチャンバーを N_2 0.5L/min 流通下で 800°C に保持した後、5~15 rpm で回転させ、バイオマス試料 100 粒(約 0.5g)を投入した。所定時間経過後に回転を止め、反応管を冷却しチャンバー内および水冷部にあるバイオマス炭を回収し、冷間と同様に指数的減衰を示すと仮定して平均滞在時間を算出した。解析にあたって、熱間では炭化および粉砕が進行し、試料を粒として数えるのは困難だったため、試料残留率 $P(t)$ は重量の割合を用い、 $P(t) = w_{\text{sample in chamber}}/w_{\text{total sample}}$ とした。

次に、所定数の蓄熱体を入れたチャンバーを、 N_2 0.5L/min 流通下で $600\sim 800^\circ\text{C}$ に保持した後、5~15 rpm で回転させた。まずバイオマス試料 100 粒(約 0.5g)を投入した後、600s ごとにバイオマス試料を投入し、連続炭化を行った。想定する炉内の試料状況を Fig. 5 の実線に示す。投入量は熱間で測定した平均滞在時間より計算した。

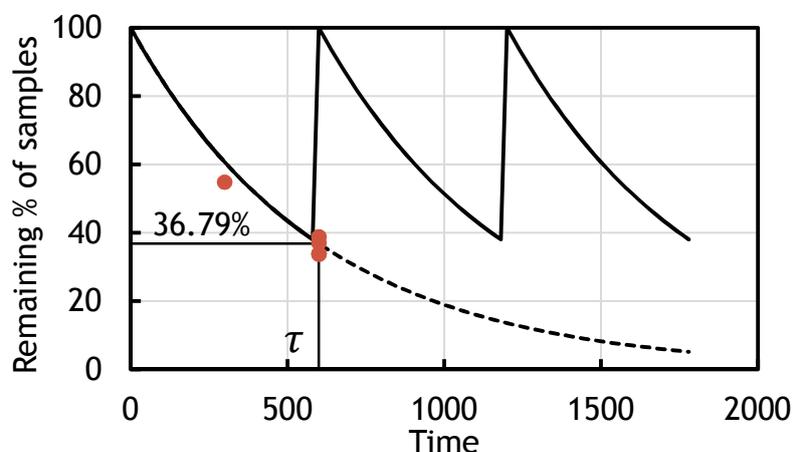


Fig.5 Change in the percentage of samples remaining in the chamber with time.

作製したバイオマス炭の粒度分布(画像解析、最小 Feret 径を採用、0.01mm 以上の粒子を解析)、粒子表面構造(SEM 観察)、比表面積(N_2 ガスによる BET 法)、揮発成分量(N_2 雰囲気、 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ で 1000°C まで加熱時の重量減少率)、ガス化反応性(CO_2 雰囲気、 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ で 900°C まで昇温後、20min 保持した際の重量変化)の評価を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 炭化炉内での粉砕・乾留挙動の検討

回転数を 5 rpm に固定し、蓄熱体数を変化させた際に得られたバイオマス炭の粒度分布を Fig.6 に示す。投入するバイオマス試料は 2.0~2.8mm に篩っているが、画像解析により得られた粒径は 2.1~4.4mm だった。本研究では画像解析と篩分けの相関は考えず、画像解析で得られた試料径のみを用いて評価を行う。炭化前のバイオマス試料に比べ、蓄熱体を入れずに作製したバイオマス炭は均一に収縮し、加えて 0.3~1.0mm 程度の細かい粒子が生成されている。また、蓄熱体数が増えるにつれて平均径(累積頻度 50%の粒径)は小さくなっている。蓄熱体なしの回転炉内では炭化による一様な収縮および脆化に伴う試料同士の衝突による粉砕が起り、蓄熱体を投入するとそれによる破砕効果が表れ、個数が増えるに従いその効果が大きくなったと考えられる。

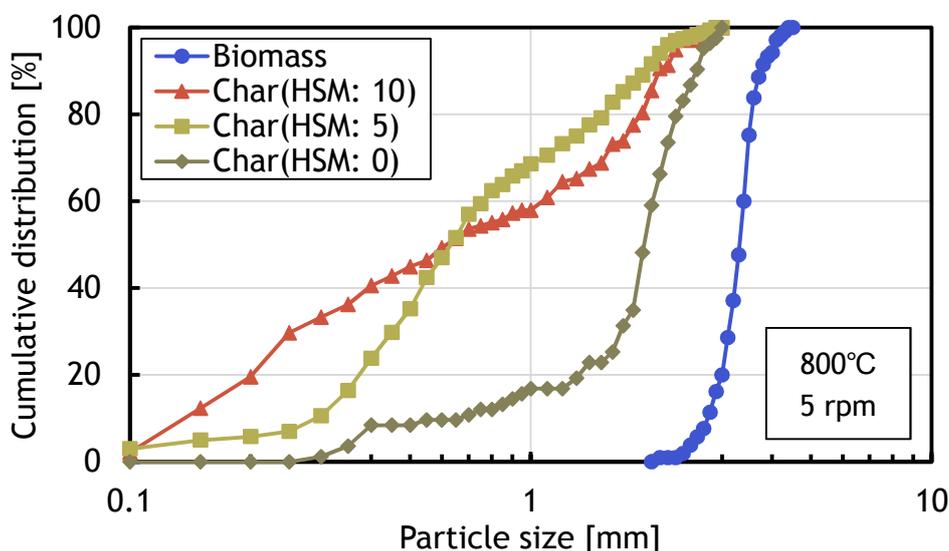


Fig. 6 Particle size distributions of biomass sample and char when changing the number of HSM (Carbonization temperature: 800°C, Rotation speed: 5 rpm).

一方で、Fig.7 に蓄熱体数を 10 個に固定し、回転数を変化させた時の得られたバイオマス炭の粒度分布を示す。この時の粒度分布の変化はあまり大きくなく、15, 5, 10 rpm の順に細かい粒子が多くなる。すなわち、単純に回転数が増えれば粉砕の効果が大きくなるわけではない。これは、回転数の増加に起因する単位時間あたりの粉砕回数の増加と、後述する回転数の増加に起因する滞在時間の減少が影響し合ったためと考えられる。

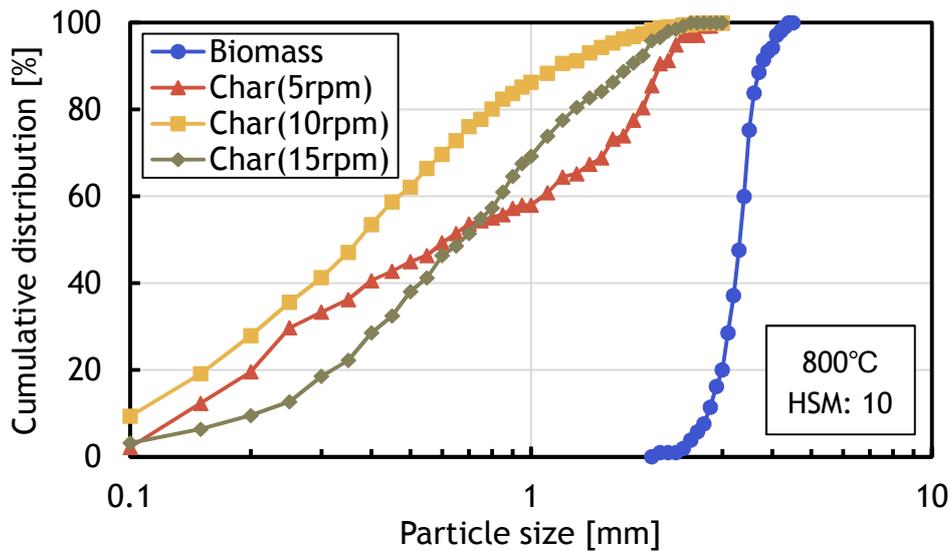


Fig. 7 Particle size distributions of biomass sample and char when changing the rotation speed (Carbonized temperature: 800°C, Number of HSM: 10).

回転数を 5 rpm に固定し、蓄熱体数を変化させた時の炉内滞在時間を Fig.8 に示す。室温での値に比べ、800°Cでの滞在時間は短い。しかし、蓄熱体数は 800°Cにおける滞在時間にはほとんど影響を与えない。一方、Fig.9 に蓄熱体数を 10 個に固定した際の滞在時間の回転数依存性を示す。室温、800°Cともに回転数の増加とともに滞在時間は短くなる。また、Fig.8 と同様に 800°Cにおける滞在時間の方が短い。

以上の結果を Table 1 に要約する。室温と 800°Cの差は炭化粉碎の有無であり、これによって試料径が大きく低下し、さらに滞在時間も短縮する。蓄熱体の数が増大すると、試料径は小さくなるものの、滞在時間は変化しない。また、回転数が増加しても試料径はあまり変化しないものの、滞在時間は短くなる。これらの結果から、滞在時間が回転数 α と炉内での試料径 r の関数であると仮定し、解析を行った。

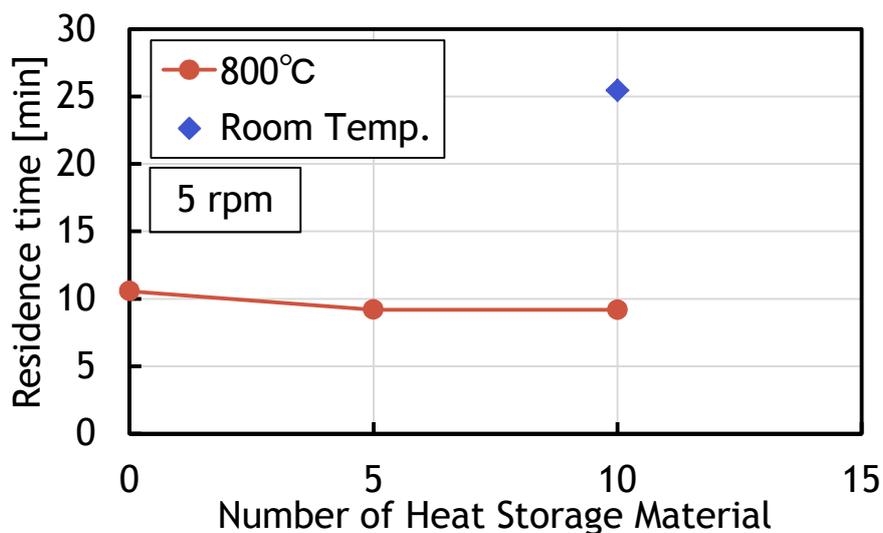


Fig. 8 Relationships between residence time of sample and number of HSM (Rotation speed: 5rpm).

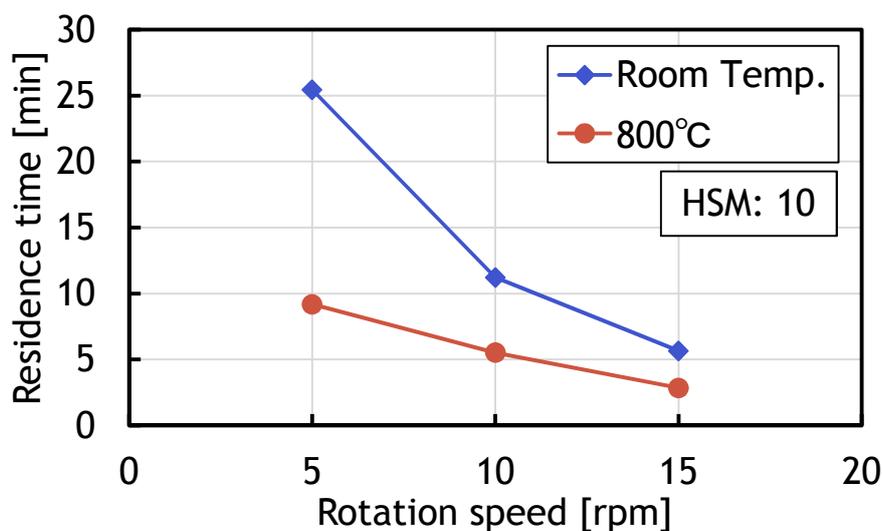


Fig. 9 Relationships between residence time and rotation speed (Number of HSM: 10).

Table 1 Changes in residence time and particle size of sample.

	試料径	滞在時間
室温→800°C	著しく減少	減少
蓄熱体 0→5→10	減少	ほぼ一定
回転数 5→10→15	ほぼ一定	減少

回転炉内では

- 投入された試料が蓄熱体と接触し炭化・粉砕
- 炭化・粉砕された試料がメッシュまで移動
- 試料がメッシュを通過するまで衝突・移動を繰り返す

が起きていると考え、炉内の試料径の代わりに炭化・粉砕後の粒径で評価を行った。

メッシュの通過確率 $P(r)$ はメッシュの通過可能な面積率で評価できると考え、粒径 r 、メッシュの空隙率 P_0 、およびメッシュの穴の径 R を用いて以下の式で定めた。

$$P(r) = \frac{A_{\text{Passable}}}{A_{\text{Mesh}}} = P_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2$$

メッシュを通過できるまでの試料粒子の平均衝突回数 $N(r)$ は通過できるまでの反復回数の期待値であると考え、以下の式で計算した。

$$N(r) = \sum_{k=1}^{\infty} k(1 - P(r))^{k-1} P(r) = \frac{1}{P(r)}$$

またチャンバーには羽を取り付けて、蓄熱体および試料が回転するようにしてあるため、試料粒子は1回転ごとにある長さを進むと仮定すれば、試料粒子の移動速度 v は回転速度 α に比例すると考えられる。

$$v = C_1 \cdot \alpha$$

粒子が進むべき距離 L は衝突を繰り返す回数 $N(r)$ に比例して増えていくと考え以下の式で計算した。

$$L = L_0 + \Delta L \cdot N(r)$$

以上から平均滞在時間 τ は粒子が進むべき距離を粒子の移動速度で割ることで計算でき、以下に粒径 r と回転数 α の関数で表した。 $(A, B: \text{無次元の定数})$

$$\tau = \frac{L}{v} = \frac{L_0 + \Delta L \cdot N(r)}{C_1 \cdot \alpha} = (A \cdot N(r) + B) \cdot \alpha^{-1} = \left(A \cdot \left\{ P_0 \left(1 - \frac{r}{R} \right)^2 \right\}^{-1} + B \right) \cdot \alpha^{-1}$$

横軸を粒径 r/R としたときの各回転数に対する計算結果および実測値を Fig.10 に示す。Fig.8 に示した蓄熱体数により滞在時間が変化しないことがこの図の赤枠部に対応し、Fig.9 に示した回転数の増加により滞在時間が減少したことが青枠部に対応する。また、回転数を横軸としたときの計算結果を Fig.11 に示す。800°Cにおいては実験結果を良く再現しているが、室温においては回転数の増加に伴い実測値とのずれが大きくなっている。これは計算の過程で室温では粉砕は行われずとしてすべて同じ径で計算していたが、炭化が伴わない場合でも元々脆い部分などが SUS 球との接触により破壊され、若干の粒径変動があったためと考えられる。

以上から、炭化の有無で滞在時間が大幅に変化したこと、蓄熱体数の変化によって粒径が変化しながら滞在時間が変化しないこと、回転速度の増加により滞在時間が減少することが説明できた。ただし、今回考慮していない要因として粒度分布の幅、メッシュに跳ね返されてから再突入するまでに炭化粉砕が行われた場合の粒径の変化、実際の粒子の形状などが挙げられる。

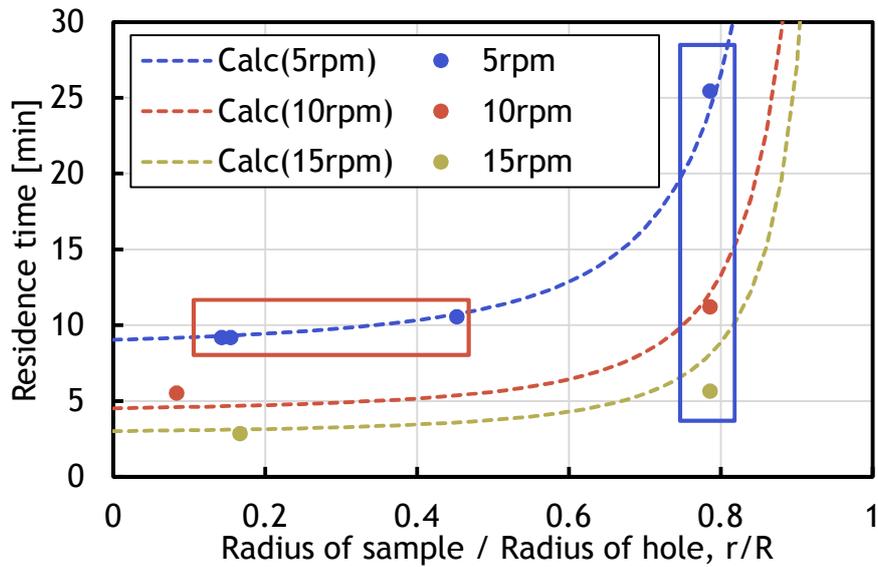


Fig. 10 Calculated value of residence time (line) and experimental value (point) when changing ratio of radius (r/R).

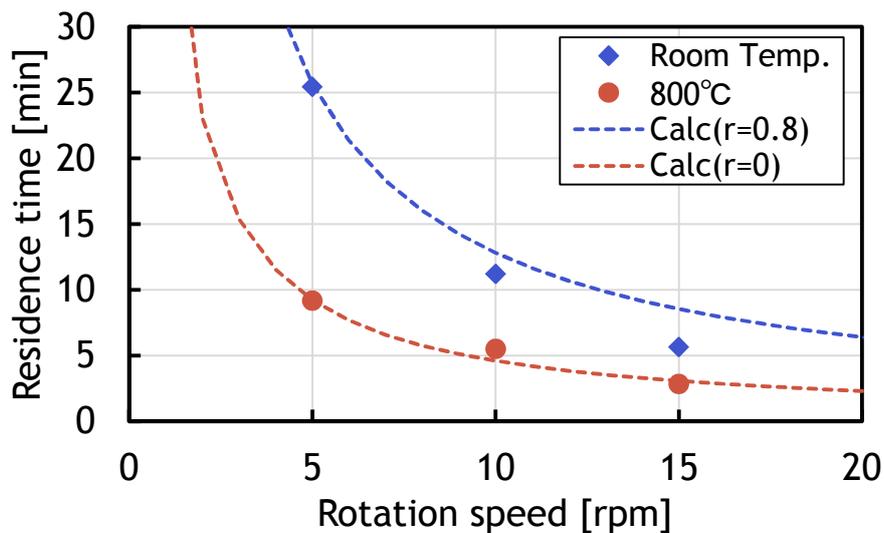


Fig. 11 Calculated value of residence time (line) and experimental value (point) when changing rotation speed.

3.2 バイオマス炭の特性

蓄熱体を 10 個装入、温度 800°C に保持し回転数を変えた際のバイオマス炭の比表面積およびガス化反応温度の変化を Fig.12 に、揮発分量の変化を Fig.13 に示す。前節で記述したように、回転数の増加に伴い滞在時間は短くなるにもかかわらず、これらの特性値に大きな変化は認められない。回転数 5~15 rpm では滞在時間は 3~11 分程度であり、回転数を増すことにより、特性値を維持したままで生産性を向上させる可能性を示唆している。また、同一

温度で 3.6 ks の Cold、Hot、および Hot-charge で得られたバイオマス炭の比表面積は、それぞれ 317.1、70.8、および 26.7 m²/g であり、本方法で得られたバイオマス炭の比表面積よりも大きく、炭化時の昇温速度が大きいほど得られるバイオマス炭の比表面積が小さい。

Fig.14 に炭化温度がバイオマス炭の比表面積およびガス化反応温度に与える影響を、Fig.15 に揮発分量に与える影響を示す。回転数と同様に、炭化温度も本方法で得られるバイオマス炭の特性値に影響を与えていない。一般に炭化温度の増加とともに、得られるバイオマス炭の反応性は低下し、揮発分量は少なくなる⁹⁾。しかし、本条件で得られたバイオマス炭はそれとは異なる挙動を示した。

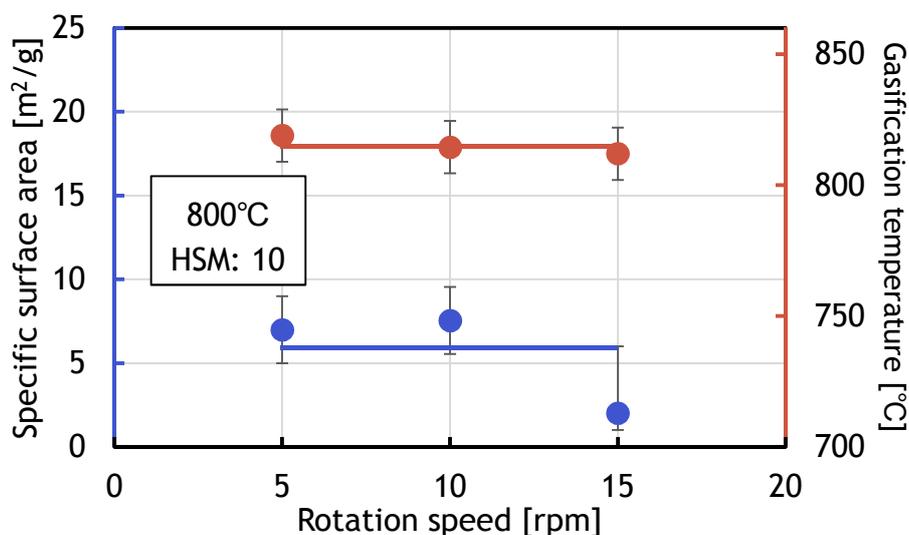


Fig. 12 Changes in specific surface area and gasification temperature of biomass char with rotation speed (Carbonization temperature: 800°C, Number of HSM: 10).

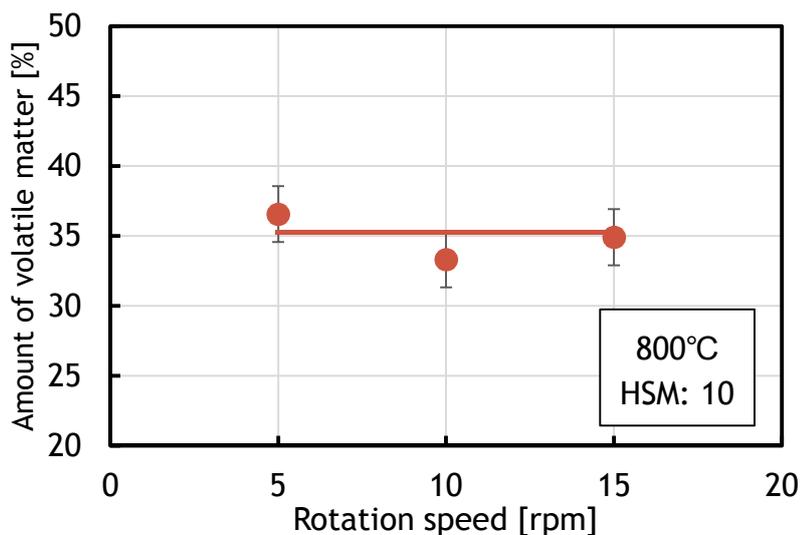


Fig. 13 Changes in the amount of volatile matter of biomass char with rotation speed (Carbonization temperature: 800°C, Number of HSM: 10).

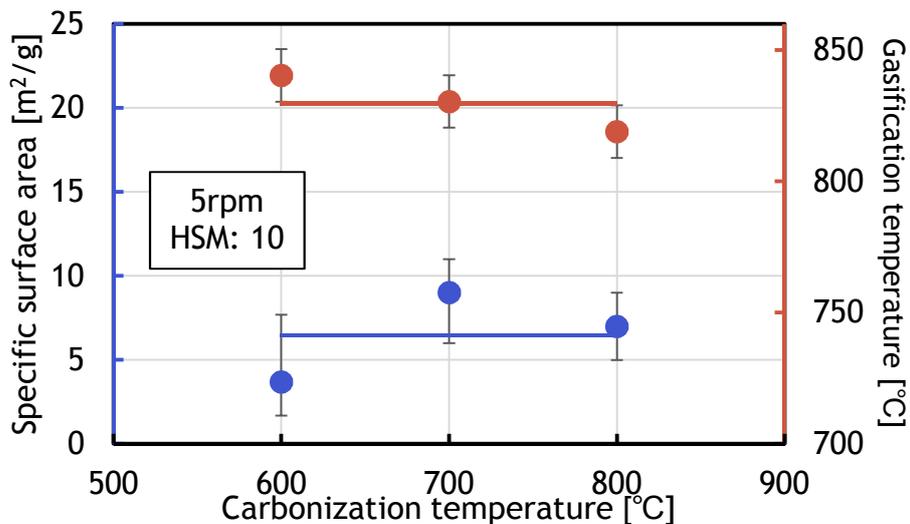


Fig. 14 Changes in the specific surface area and gasification temperature of biomass char with carbonization temperature (Rotation speed: 5 rpm, Number of HSM: 10).

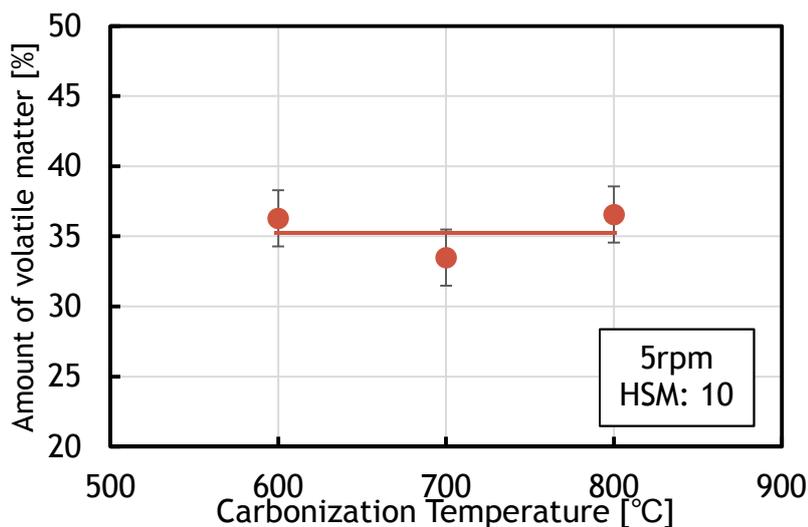


Fig. 15 Changes in the amount of volatile matter of biomass char with carbonization temperature (Rotation speed: 5 rpm, Number of HSM: 10).

これらのバイオマス炭について、表面組織の観察を行った。Fig. 16 にバイオマス炭粒子全体の代表的な表面組織写真を、Cold、Hot、および Hot-charge で作製したバイオマス炭の粒子表面とともに示す。それぞれ異なる表面構造を示している。Fig. 17 に Cold および Hot の粒子表面の拡大図を示す。両者は木質系バイオマス由来のセル構造が認められる。Cold は室温から昇温速度 $0.167\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ で、ゆっくりと昇温された粒子であり、平均セル径 $20\mu\text{m}$ の四角いセル構造を示している。一方で、Hot のセル径は約 $40\mu\text{m}$ と Cold に比較してやや大きく、丸みを帯びた形状をしている。昇温速度が $4.667\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ と Cold よりも大きいため、バイオマスの構成物質であるリグニンの液化の影響を受けたと考えられる。Hot-charge の粒子表面の拡大写真も Fig.17 に示す。前 2 者同様のセル構造が認められるものの、部分的に表面が平滑な

組織が認められる。一方、Fig.18 に本提案プロセスで得られたバイオマス炭粒子の写真を示す。Fig.16d)で示した粒子のほかに、粉碎による微細な破片 (Fig.18a))も多く認められる。これら粒子表面は、b)に示すような、また cold や hot で認められたセル構造を維持した組織や c)に示すような破壊された状態のものが一部では認められるが、主に Fig.17c)に認められた表面が平滑な組織であった。実験条件によらず、この組織が支配的であった。また、この平滑な面には数 μm 程度の穴が多数認められた。

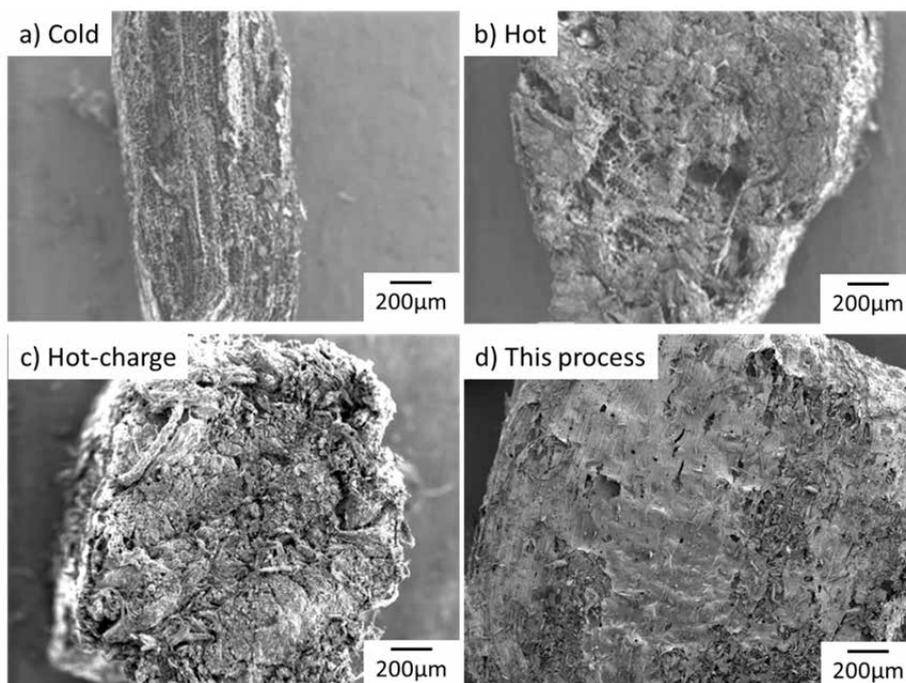


Fig. 16 Surface structure of biomass char particle obtained at 800 °C by a) cold start, b) hot start, c) hot-charge, and d) this process with the rotation speed of 15 rpm.

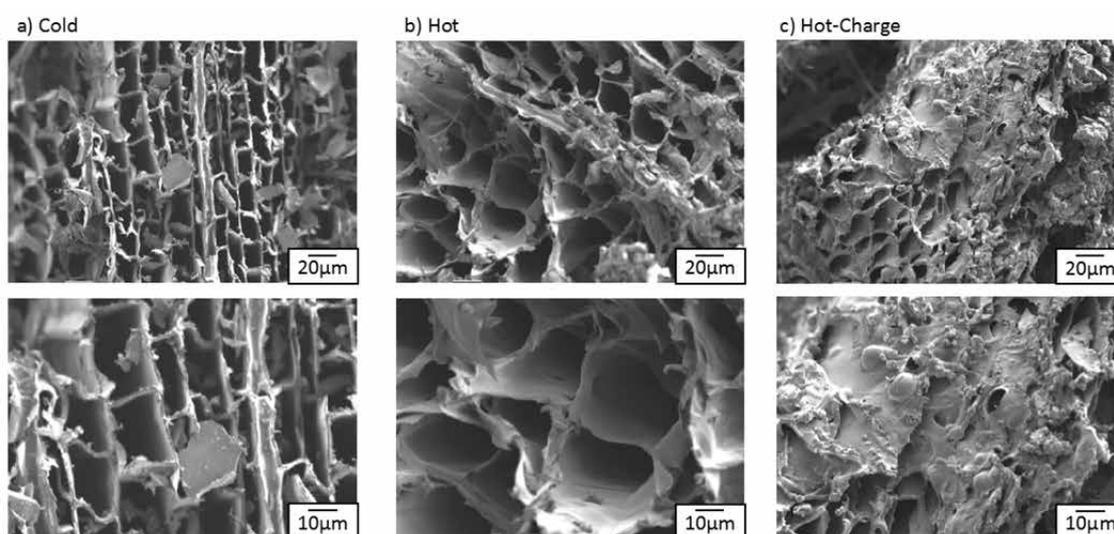
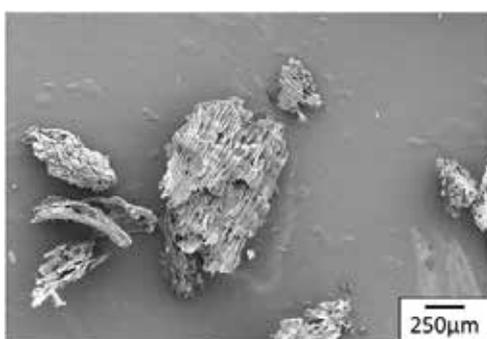


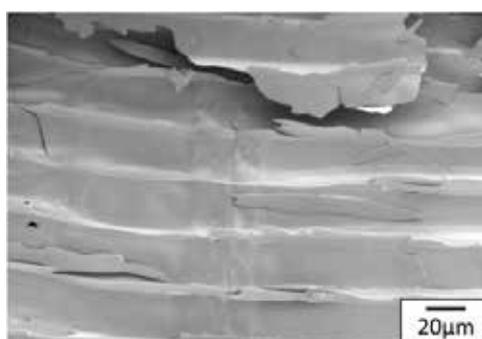
Fig. 17 Magnified surface structure of biomass char obtained by a) cold start, b) hot start, and c) hot-charge at 800 °C.

Biagini ら¹⁰⁾は、高い昇温速度においてリグニンの溶融によりこの組織が生じると報告している。また、Cetin ら¹¹⁾はこの組織について、高い昇温速度では揮発分が十分に放出できない結果、組織の溶融が生じるのではないかと考察している。これらから、昇温速度が非常に大きいと揮発成分が脱離する前に熱分解することで融液を形成および緻密化し、その後の揮発成分の脱離速度が急激に低下したと考えられる。特に本実験では滞在時間を制御し炭化後に急冷するため、揮発成分の脱離が十分に進行する前に凝固することで細かい穴が多数生成されたと考えられる。すなわち、急熱および急冷を伴う炭化では、表面が溶融し揮発分の放出が阻害され、十分に脱気が進行する前に凝固する結果、Fig.12~15 で認められたように炭化温度が揮発分量に影響しなかったと考えられる。

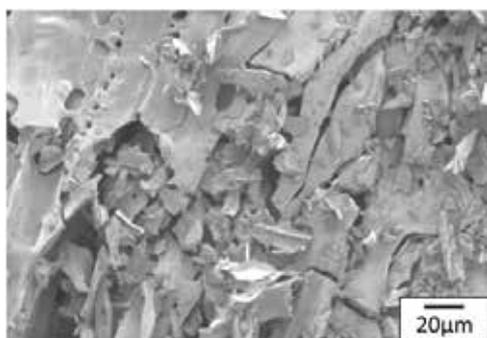
(a) Fragment of char.



(b) Retained cell structure.



(c) Broken cell structure.



(d) Melting structure.

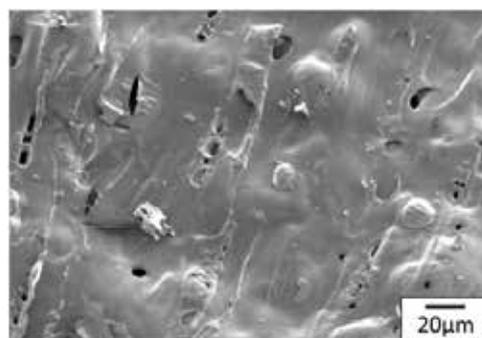


Fig. 18 Surface structures of biomass char obtained by this process.

4. 結言

連続操作が可能な本プロセスの模擬回転炭化炉を構築し、この炉内での炭化機構および作製されたバイオマス炭の特性について調査を行った結果、以下の知見を得た。

1. 模擬回転炭化炉内の試料滞在時間 τ [min] は、試料のチャンバー内での移動速度および試料のメッシュ通過確率に大きく依存し、これらは回転数 α [min⁻¹] および試料径 r [mm] により、以下の式で計算できた。

$$\tau(\alpha, r) = (A \cdot n(r) + B) \cdot \alpha^{-1}$$

2. 炭化温度を 600～800℃、回転数を 5～15 rpm に制御することで滞在時間を 3～11 分に変化させて作製したバイオマス炭の比表面積、ガス化反応温度および揮発分量には変化が認められなかった。
3. 模擬回転炭化炉で作製したバイオマス炭の表面では、粉砕による微細な断片、セル構造を維持した組織、セル構造が破壊された組織および熔融した組織が観察され、いずれの実験条件でも熔融した組織が多くを占めていた。これは高温に加熱された蓄熱球に直接バイオマス片が接触することで急速に加熱されることにより、揮発分が放出されると同時にバイオマスの構成成分の一つであるリグニンが液化したためと考えられる。
4. 急熱および急冷を伴う炭化では、表面が熔融し揮発分の放出が阻害され、十分に脱気が進行する前に凝固する結果、炭化温度が変化しても揮発分量が変化しなかったのではないかと考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の技術研究助成(2012 年度)の助成を受けて実施されたものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省, バイオマス・ニッポン総合戦略, 2006.
- 2) G. Fick, O. Mirgaux, P. Neau, and F. Patisson: Waste and Biomass Valorization, 5 (2014), 43.
- 3) T. Kawaguchi, and M. Hara: ISIJ Int., 53 (2013), 1599.
- 4) T. Oguchi, A. Miyoshi, M. Koshi, and H. Matsui: Bulletin of the Chemical Society of Japan, 73 (2000), 53.
- 5) 高橋礼二郎: 鉄と鋼, 76 (1990), 128.
- 6) 秋山友宏: Journal of the Japan Institute of Energy, 86 (2007), 161. →要チェック
- 7) 西健治, 澤井徹, 大政光史, 廣川敬康, 渋江唯司, 梶本武志: 高温学会誌, 37 (2011), 63.
- 8) N. Hayashi, E. Kasai, T. Nakamura: ISIJ Int., 50 (2010), 1282.
- 9) D. Mohan et al., Energy & Fuels, Vol. 20, No. 3, pp. 848-889, 2006.
- 10) E. Biagini et al.: Seventh International Conference on Energy for Clean Environment, Portugal, 2003. → 実物要確認
- 11) E. Cetin, R. Gupta, and B. Moghtaderi: Fuel, 84 (2005), 1328.