

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理による バイオマスの炭化速度に及ぼす試料サイズの影響

伊佐亜希子, 羽倉義雄, 鈴木寛一[†]

広島大学大学院生物圏科学研究科

Size Effect of Biomass on Carbonization Rate Treated in Superheated Steam Combined with Far Infrared Heating

Akiko ISA, Yoshio HAGURA and Kanichi SUZUKI[†]

Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, 1-4-4, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8528, Japan

Bamboo powder (particle size 0.2 mm) and three cube-shaped woods (1 mm, 2 mm and 3 mm) were carbonized in the superheated steam (SHS) combined with far infrared heating (FIH), and the effect of sample size on carbonization rate was investigated. Carbonization temperature was adjusted at 270, 280, 290, and 300°C by regulating the SHS temperature at 180°C with the FIH temperatures at 375, 400, 425, and 450°C. Carbonization energies for the combined treatment were also compared with those for the carbonization treatment in SHS alone at 255, 265, 275, and 285°C. The generation rate of the SHS was the same for both carbonization treatments. The carbonization rate of each sample obeyed a first order reaction rate equation. Average values of the activation energy for the combined treatment of SHS with FIH and for the treatment in SHS alone were 137 kJ/mol and 149 kJ/mol, respectively. These values were almost the same as the activation energies for thermal decomposition of starch and cellulose under nitrogen gas. The relationship between the logarithmic values of the sample sizes and those of the carbonization rate constants was expressed as a linear curve at each carbonization temperature. Compared with the carbonization in the SHS alone, the combine treatment of SHS and FIH was much easier to make the carbonization apparatus in high carbonization temperature conditions with small additional heat. The higher the FIH temperature, the smaller the carbonization energy was obtained, because of shortening the carbonization time significantly.

Keywords: superheated steam, far infrared heating, biomass, carbonization rate constant

1. 緒 言

近年, 地球環境問題への関心が高まり, 有機系廃棄物やバイオマス資源を有効利用するための高付加価値化やエネルギー化の技術開発が注目されている。バイオマスのエネルギー化は, 材料の安定供給や採算面などで検討すべき課題を残しているが, 循環型資源の活用として積極的に推進していく方向に社会情勢は変化している。バイオマス有効利用化技術の中でも, エネルギー化が不可能なバイオマスやバイオマスの最終残渣を処理する技術として炭化が注目されている。とくに, 腐

敗の速い食品廃棄物などのバイオマスは, バイオガスの生成や変質のない炭に固定化することで, エネルギー源などへの利用が可能となる。

古くから炭は, 生活の中で燃料としてだけでなくろ過材や吸着剤として広い用途で有効利用されてきた。炭は多孔質で吸光性, 電気特性, 研磨性などの特性を備えていることから, 現在では幅広い分野で利用が試みられている [1]。炭化は, 有機物を低酸素または無酸素下で熱分解させる操作である。従来, 炭は, 空気を遮断した炭焼き窯で約1週間から10日かけて製造され, 炭作りは熟練した職人の技が必要であった [2]。しかし, 近年では, 炭窯と呼ばれる小型回分式装置から, 加熱方式の改良を加えた工業用連続装置まで多種多様の炭化装置が開発されている [3]。最近注目されているバイオマスの炭化には, 一般的に過熱水蒸気を用いられて

(受付 2007 年 10 月 20 日, 受理 2008 年 3 月 5 日)

〒739-8528 広島県東広島市鏡山1丁目4番4号

Fax: 082-424-7937, E-mail: suzukan@hiroshima-u.ac.jp

いる。過熱水蒸気は、低酸素または無酸素下での加熱が可能で、伝熱速度が高く任意の温度での加熱が可能であるため、炭化に適した熱媒体であると考えられる。過熱水蒸気を利用したバイオマスの炭化に関して、吉田らは有機系廃棄物を過熱水蒸気で炭化処理し、得られた炭化物の吸着能を調べている [4]。また、バイオマスは、広範囲に低密度で分布することが多いため、バイオマスの炭化では集荷コストの削減を考慮することも重要であり、山林地などの現地で炭化処理する小型の移動式装置の開発も行われている [i]。過熱水蒸気を用いた炭化装置の開発では、装置の連続化や小型化が容易であるが、バイオマスの炭化効率を上げるためには、可能な限り低エネルギーで高速炭化処理が可能な装置の開発が必要である。また、過熱水蒸気は水から容易に生成可能であることに加え、炭化処理の過程で発生する悪臭などに伴う環境への影響を少なくすることが可能であると考えられる。しかし、過熱水蒸気を用いる炭化では、過熱水蒸気の生成および処理に多量の蒸気と熱量が必要なことから、過熱水蒸気処理の省エネルギー化に課題を残している。

一方、著者らは、過熱水蒸気処理の伝熱速度および熱効率の向上を目的として、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理を考案し、その伝熱特性を検討した [5]。過熱水蒸気処理に遠赤外線加熱を付加した場合、遠赤外線加熱装置に加える熱流は、過熱水蒸気を生成するために必要な理論的熱流の 1/5 程度で伝熱速度は過熱水蒸気単独処理の 2 倍以上となること、また過熱水蒸気と遠赤外線加熱温度との組み合わせによっては、熱効率が過熱水蒸気単独処理の 2~4 倍以上となることを明らかとした。さらに、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、装置の立ち上げ時間の大幅な短縮や低熱流での加熱庫内温度の維持が可能である。このことより、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理を炭化に用いると、従来の過熱水蒸気単独による処理と比較して、少ないエネルギーで高速の炭化が可能になると考えられる。

鈴木らは、基礎的なバイオマスの炭化機構を解明するため、粉末状の炭水化物試料（馬鈴薯澱粉、グルコース、セルロース）を用いて過熱水蒸気処理による炭化速度を測定し、炭化速度が一次反応速度式に従うこと、過熱水蒸気中での炭化は、窒素雰囲気中での熱分解と同様の機構で起こっていることなどを報告している [6]。また、炭化反応速度の頻度因子と活性化エネルギーから、実験範囲以外の温度での炭化時間の予測を行っている [6]。これらの粉体試料では、試料サイズの差はわずかであり、試料サイズの違いによる伝熱の差は小さいと考えられる。しかし、木材や食品廃棄物などのバイオマスを炭化する場合は、材料を裁断しても材料サイズは数ミリ程度またはそれ以上となることが考えられる。このような比較的サイズの大きい材料では、

加熱による材料内部への伝熱速度は粉体の場合より遅くなるため、粉体試料の炭化速度が適用できないことが考えられる。したがって、実際のバイオマスの炭化処理では、炭化速度に与える材料サイズの影響を検討する必要がある。

そこで、本研究では、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理装置を用いて、サイズを調整したバイオマス試料の炭化速度を測定し、炭化速度に与える材料サイズの影響を実験的に検討することを目的とした。併せて、従来の過熱水蒸気単独処理による炭化処理の場合と遠赤外線加熱を付加した場合の炭化速度の比較を行い、各炭化処理の所要熱量の比較も行った。

2. 実験方法

2.1 装置

実験装置は、前報 [5] で使用したものと同様の装置を用いた。

過熱水蒸気は、市販のボイラ（三浦工業社製、型式 RV-60XE、最高蒸発速度 60 kg/h）から発生させた水蒸気を IH（電磁誘導加熱）により 100℃ 以上に加熱し、加熱庫内部の上面および下面に設置したノズルから加熱庫内部に供給される仕組みになっている。遠赤外線ヒータ（日本ヒータ製、クリーンヒータ IPR-20.8-22、容量 1.2 kW、200 mm×200 mm）は、加熱庫内部の上面壁および下面壁に取り付けた。装置はバッチ式で、IH の温度（0~300℃）、蒸気量（7~60 kg/h）、遠赤外線ヒータに投入する電力量はコントロールボックスで設定、制御、操作が可能である。加熱庫のサイズは、縦 0.405 m×横 0.415 m、高さ 0.19 m で（但し、高さはメッシュベルトコンベアより上部の距離）、試料は、蓋の開閉によりメッシュベルトコンベアに乗せた処理物が自動的に供給、排出されるように構成されている。加熱庫内部に供給する蒸気量は、蒸気を流す管にアクチュエータ付のバルブを取り付け、コントロールボックスに設置した開口度つまみで制御した（開口度目盛：0~100）。加熱庫内部の温度は、コンベアをはさんだ上下のノズルの間の気体温度 3 箇所（コンベア上部 60 mm、コンベア下部 30 mm、コンベア下部 60 mm）を K 型熱電対（シーズ外形 1 mm）で測定し、その平均値とした。遠赤外線ヒータ温度は、ヒータ表面に K 型熱電対（シーズ外形 1 mm）を接触させて固定して測定した。

2.2 炭化処理

試料には、竹粉（70 メッシュ篩下産物、篩の目開き 0.212 mm）と 3 種類のダイス状ヒノキ木材（1 mm, 2 mm, 3 mm）を絶乾処理（105℃・24 h）して用いた。竹粉のサイズは、顕微鏡観察により平均粒径 0.2 mm と

した。ヒノキ木材は、それぞれ1 mm角, 2 mm角, 3 mm角の木材を各1 mm, 2 mm, 3 mmに手で切断して調製した。各試料をステンレス製の円柱状の容器(内径50 mm, 高さ15 mm)に試料が重ならないように並べ(竹粉の場合は厚さ1 mm程度), 炭化処理を行った。過熱水蒸気単独処理の場合の炭化条件は, 炭化温度 T_c [°C] を 255°C, 265°C, 275°C, 285°C とした。本実験では, 加熱庫内部の平均温度を炭化温度としたが, 過熱水蒸気単独処理の場合の加熱庫内部の平均温度は, 設定した過熱水蒸気温度とほぼ等しくなった。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合は, 過熱水蒸気温度を 180°C とし, 付加する遠赤外線ヒータ温度は, それぞれ 375°C, 400°C, 425°C, 450°C とした。このときの加熱庫内部の平均温度(炭化温度 T_c [°C]) は, それぞれ 270°C, 280°C, 290°C, 300°C であった。加熱庫が設定温度で一定になった後, 試料を投入し, 一定時間ごとに加熱庫から試料容器を取り出し, 直ちにステンレス製の蓋をしてデシケータ中で約 30 分間放冷後, 重量を測定した。過熱水蒸気量は, 過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理のいずれの場合も 7.7 kg/h 一定とした。

2.3 炭化率の測定

炭化率は, 試料の炭化処理前の重量と炭化処理後の重量から以下の式を用いて算出した。

$$N = (W_0 - W) / (W_0 - W_e) \quad (1)$$

ここで, N [-] は炭化率, W_0 [kg] は試料の炭化処理前重量, W [kg] は炭化処理後の重量, W_e [kg] は炭化が完全に終了したときの重量で, 予備実験より $W_e = 0.36 W_0$ とした。

2.4 過熱水蒸気生成熱流(投入エネルギー速度)と炭化熱量の算出

過熱水蒸気生成熱流(投入エネルギー速度) W [kW] は, 水温 T_0 [K] の水 M [kg] から T [K] の過熱水蒸気を生成するために必要な理論的熱流とした。ボイラ入口水温 T_0 [K] の水 M [kg] を時間 t_0 [s] で蒸発させたと仮定した場合, T [K] の過熱水蒸気を生成するために必要な理論的熱流 W は次式より求められる。

$$W = (M/t_0) \cdot \{C_{pm} \cdot (373 - T_0) + \lambda + C_{pv} \cdot (T - 373)\} \quad (2)$$

ここで, C_{pm} [kJ/(kg·K)] は水の比熱, λ [kJ/kg] は水の蒸発潜熱, C_{pv} [kJ/(kg·K)] は水蒸気の比熱である。炭化熱量 Q [kJ] は次式より求めた。

$$Q = W \cdot t \quad (3)$$

ここで, t [s] は炭化時間とした。

遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合, 遠

赤外線ヒータに投入した電力を W_{FIH} [kW] とすると, 炭化熱量は式(3)の W に $(W + W_{FIH})$ を代入して求められる。遠赤外線加熱ヒータに投入した電力 W_{FIH} は実測値とした。

3. 結果と考察

3.1 炭化速度定数のアレニウスプロット

180°Cの過熱水蒸気を単独で用いた場合には, 炭化温度に達しないため炭化は不可能であるが, 遠赤外線加熱を付加することで炭化が可能な温度に調整することが容易となった。竹粉およびダイス状ヒノキ試料は, 炭化の前後で試料サイズの変化はほとんどなく, 炭化前の試料の形状を残したまま炭化した。また, 顕微鏡観察より, 炭化が終了した試料は, 試料内部全体が均一に炭化されていることを確認した。

過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理のいずれの場合も, 各炭化温度で未炭化率 $(1-N)$ の対数値は炭化時間に対して直線性を示した。このことより, 炭化速度は一次反応速度式に従うことが明らかとなった。よって, 各炭化条件での炭化速度定数 k を次式から求めた。

$$1 - N = e^{-(k \cdot t)} \quad (4)$$

ここで, k [1/s] は炭化速度定数, t [s] は炭化時間である。式(4)より, 過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での各炭化条件における炭化速度定数 k を求め, アレニウスプロットした結果を Figs. 1(a), (b) に示す。Figs. 1(a), (b) より, 過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での各試料の炭化速度定数の対数値は, 炭化温度の逆数に対して直線で表され, 各試料における直線の傾きはほぼ平行に変化した。このことから, いずれの試料においても同様の機構で炭化が進行したことが推察された。

次式より, 過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合の活性化エネルギー ΔE [kJ/mol] と頻度因子 A [1/s] を求め, Table 1 に併せて示した。

$$k = A \cdot e^{(-\Delta E / (R \cdot T_c))} \quad (5)$$

ここで, R [kJ/(mol·K)] は気体定数である。活性化エネルギーの値はそれぞればらつきはあるが, 試料サイズに係わらずほぼ一定の値で, それらの平均値は過熱水蒸気単独処理の場合で 149 kJ/mol, 遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合で 137 kJ/mol であり, この値は, 窒素ガス中でのセルロースの熱分解反応の活性化エネルギーの値 140~150 kJ/mol [7] とほぼ一致した。このことより, 過熱水蒸気処理および遠赤外線加熱を

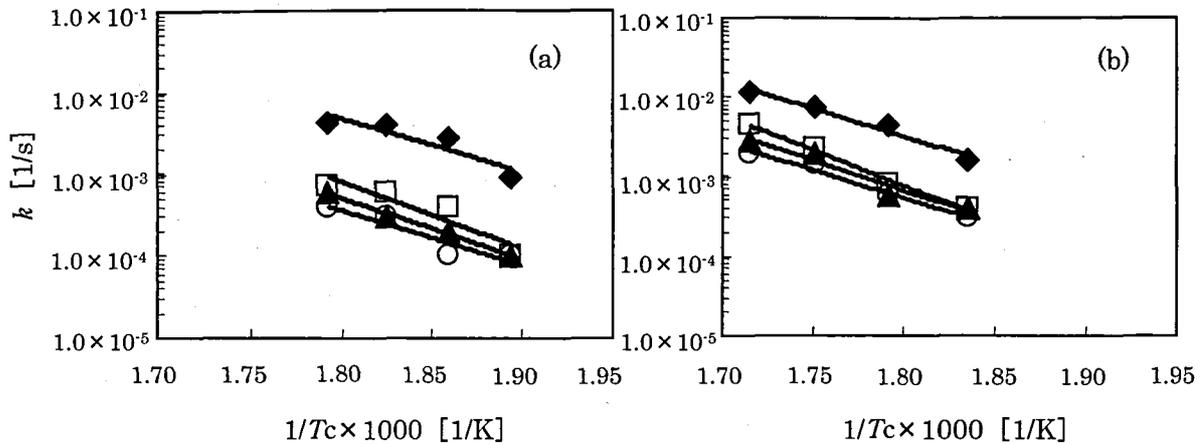


Fig. 1 Arrhenius plot of the carbonization rate constant k treated in superheated steam (SHS) alone (a) and in SHS combined with far infrared heating (FIH) (b). T_c : Carbonization temperature [K], ◆: Bamboo powder, □: Wood 1 mm-cube, ▲: Wood 2 mm-cube, ○: Wood 3 mm-cube.

Table 1 Activation energy and frequency factor of carbonization for a bamboo powder and three wood samples with different sizes treated in superheated steam (SHS) and in SHS combined with far infrared heating (FIH).

Samples	Activation energy [kJ/mol]		Frequency factor [1/s]	
	SHS	SHS+FIH	SHS	SHS+FIH
Bamboo powder	139	123	4.0×10^{10}	2.0×10^9
Wood (1 mm-cube)	171	154	8.0×10^{12}	2.0×10^{11}
Wood (2 mm-cube)	146	142	3.0×10^{10}	1.0×10^{10}
Wood (3 mm-cube)	140	129	8.0×10^9	4.0×10^8
Average	149	137		

付加した過熱水蒸気処理での木材の炭化反応は、不活性ガス中での熱分解反応と同様の反応機構であることが示唆された [6].

本実験では、1つの試料を加熱庫から数回取り出して重量測定を行ったため、炭化時間の長い低温帯では、高温帯での炭化処理と比較して試料の取り出し回数が多くなった。また、加熱庫から試料を取り出した後、直ちに容器に蓋をしてデシケータ中で放冷したが、容器中に存在する少量の空気により試料の一部が燃焼した可能性が考えられた。試料の単位重量当たりの表面積が大きい木材 1 mm の場合は、2 mm または 3 mm の場合と比較して、このことが炭化率の測定に影響したことが考えられた。竹粉の場合は、木材の場合と比較して短時間で炭化が終了するため試料の取り出し回数が少なかったことから、炭化速度定数への影響は小さかったと考えられた。この試料の取り出しに伴う測定値のばらつきにより、とくに、木材 1 mm の活性化エネルギーが大きな値となったと考えられるが、試料取り出しによる測定値への影響を考慮すると、竹粉と木材 1 mm, 2 mm, 3 mm で活性化エネルギーの値はほぼ等しく、

頻度因子は試料サイズが小さいほど大きくなると考えられた。

3.2 炭化速度への試料サイズの影響

過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合での試料サイズと炭化速度定数 k の関係をそれぞれ Figs. 2(a) および (b) に示した。なお、Figs. 2(a) および (b) の横軸の試料サイズの単位は mm で示した。炭化速度定数と試料サイズは、両対数紙上で直線となったことから、炭化速度定数と試料サイズ X [m] との関係を以下の式で表した。

$$k = b \cdot X^{-n} \quad (6)$$

ここで、 b [m^n/s] と n [-] は定数である。各炭化条件での炭化温度 T_c [°C] および求めた b 値と n 値を Table 2 にまとめた。過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での n 値は、それぞれほぼ同様の値となり、過熱水蒸気単独処理の場合の平均値は 0.99 で、炭化速度は試料サイズのほぼ逆数に比例し、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では平均値が

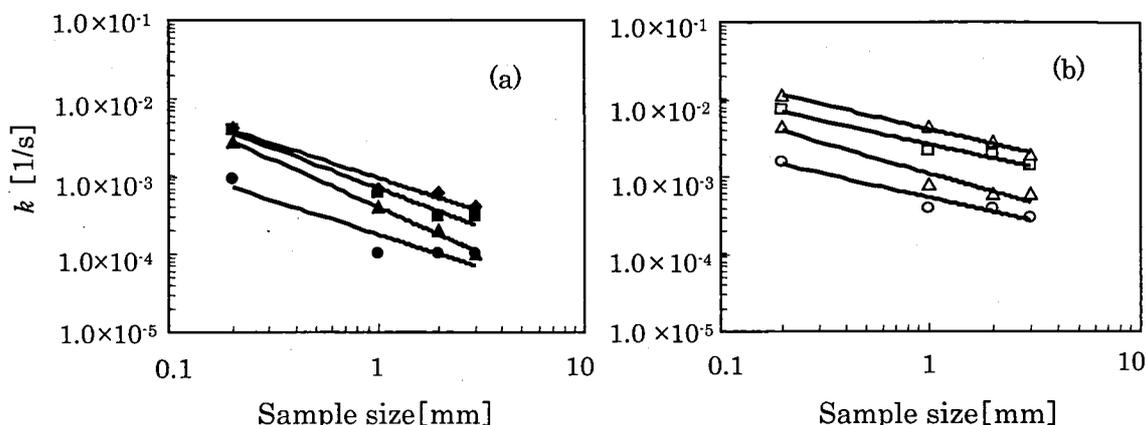


Fig. 2 Relationship between the carbonization rate constant k and the sample size X in case of the superheated steam treatment(SHS) (a) and the combined treatment of SHS with far infrared heating (FIH) (b).

●: SHS 255°C, ▲: SHS 265°C, ■: SHS 275°C, ◆: SHS 285°C, ○: SHS180°C + FIH375°C, △: SHS180°C + FIH 400°C, □: SHS180°C + FIH 425°C, ◇: SHS180°C + FIH450°C.

Table 2 The values of b and n at different carbonization temperatures treated in superheated steam(SHS) and in SHS combined with far infrared heating (FIH).

Treating condition	Carbonization temperature[°C]	b [m ⁿ /s]	n [-]
SHS255°C	255	1.8×10^{-4}	0.86
SHS265°C	265	4.0×10^{-4}	1.19
SHS275°C	275	7.1×10^{-4}	1.00
SHS285°C	285	9.5×10^{-4}	0.88
SHS180°C + FIH375°C	270	5.4×10^{-4}	0.61
SHS180°C + FIH400°C	280	1.1×10^{-3}	0.78
SHS180°C + FIH425°C	290	2.6×10^{-3}	0.60
SHS180°C + FIH450°C	300	4.1×10^{-3}	0.64

0.66 となり、炭化速度は試料サイズのほぼ $2/3$ 乗分の 1 に比例する結果となった。本実験で測定した試料サイズの範囲では、過熱水蒸気単独処理の場合と比較して、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合では試料サイズの差による炭化速度の差が小さかったが、このことは、遠赤外線加熱を付加した場合は、放射伝熱の付加で伝熱速度が高くなり、炭化速度に与える試料サイズの影響が相対的に少なくなったためと考えられた。

一方、 b 値の対数値は、Fig. 3 に示したように炭化温度に対してほぼ直線となり、炭化温度が高くなるにつれて b 値は急速に大きくなった。Fig. 3 より、過熱水蒸気単独処理の場合の b 値を b_{SHS} 、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合は $b_{\text{SHS+FIH}}$ として、 b 値と炭化温度との関係を以下の式で示した。

$$b_{\text{SHS}} = 2.0 \times 10^{-10} e^{0.054 \cdot T_c} \quad (7)$$

$$b_{\text{SHS+FIH}} = 9.0 \times 10^{-12} e^{0.067 \cdot T_c} \quad (8)$$

式(4)、(6)および式(7)、(8)より、任意の試料サイズと温度での炭化時間の予測が可能となる。ちなみに、試料サイズ 4 mm と 6 mm の試料を遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理で炭化した場合、一例として炭化温度 400°C では、 3.3 秒と 4.3 秒（ただし、炭化率 $N=0.99$ ）で炭化されると推算された。一方で、 4 mm と 6 mm の試料を 400°C の過熱水蒸気単独処理で炭化した場合には、炭化に約 40 秒と 60 秒を要すると推算され、試料サイズが大きくなると遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、過熱水蒸気単独処理に比べて炭化時間の短縮が顕著になるものと推察された。

本実験では、過熱水蒸気単独処理と遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理のいずれも炭化に必要な熱量は十分にあり、本実験の炭化温度の範囲では、遠赤外線加熱付加の有無に関わらず b 値は炭化温度で決定す

ると考えた。しかし、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、とくに高温帯で過熱水蒸気単独処理と比較して b 値が若干高くなる結果を得た。前報より、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、遠赤外線ヒータ温度を高くするほど伝熱速度が高くなり熱効率が向上するという結果を得ている [5]。本実験でも、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、高温になるほど遠赤外線ヒータ温度を高くしたことで過熱水蒸気単独処理より伝熱速度が増し、炭化速度定数と試料サイズとの関係に影響したことが考えられる。この点の検証については、今後の課題である。

3.3 炭化に要する熱流と熱量の比較

木材 2 mm の場合を例として、各加熱条件での炭化温度 T_c [°C]、式 (2)、式 (3) より算出した過熱水蒸気生成のための理論的熱流、遠赤外線ヒータに投入した電力の測定値、炭化のための総合熱流、式 (4) を用いて求めた炭化率 $N=0.99$ での炭化時間および炭化熱量を Table 3 に示す。Table 3 より、過熱水蒸気単独処理と遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理のいずれの場合も、炭化温度が高くなるほど炭化時間が短縮し、炭化熱量は減少することが示された。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での炭化温度 270, 280, 290, 300°C を過熱水蒸気単独で生成するために必要な理論的熱流は、式 (2) よりそれぞれ 6.14, 6.18, 6.23, 6.27 kW と推算されるが、これらの値は Table 3 に示した遠赤外線加熱付加処理の炭化に要した熱流と比較して約 0.5~0.6 kW 少ない値である。もし、これらの理論的熱流で炭化が可能であれば、過熱水蒸気単独での炭化処理の方がエネルギー的に有利となる。しかし、Table 4 に示した過熱水蒸気生成に要する熱流は、装置からの熱損失を考慮していない定常状態での理論値であり、炭化のための総合熱量は、装置を所定の炭化温度に立ち上げるまでに要する熱量は含んでいない。

これまでの研究で、遠赤外線加熱を付加した過熱水

蒸気処理では、過熱水蒸気単独処理と比較して装置を所定の温度に立ち上げる時間が大幅に短縮されることを明らかとした [5]。本研究でも、過熱水蒸気単独で装置の加熱庫温度を 270°C 以上に上昇させるには 3~4 時間を要したが、遠赤外線加熱を付加した場合は、加熱庫温度を 270~300°C 以上に上昇させるために要した時間は 1 時間半~2 時間程度であった。したがって、装置の立ち上げ時間の短縮に伴う所要熱量の低減効果は、過熱水蒸気生成の理論的熱量と比較しても、本装置の遠赤外線ヒータを約 9~12 時間稼働させることができる値に匹敵するものと推算される。さらに、過熱水蒸気単独で加熱庫の温度を 300°C まで上昇させるには、装置からの熱損失を補うために 300°C 以上の過熱水蒸気を用いる必要があるが、本研究で用いた装置では、飽和水蒸気を加熱するスーパーヒータの能力の制限により加熱庫の温度を 300°C まで上昇させることは、立ち上げに長時間を要しても不可能であった。一方、遠赤外線加熱を付加した場合には、過熱水蒸気温度を 180°C としても、遠赤外線ヒータに 0.88~1.12 kW (実測値) 投入するこ

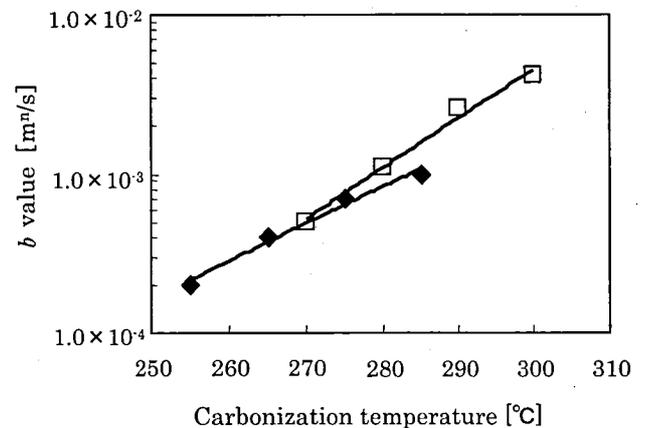


Fig. 3 Relationship between the b value and the carbonization temperature. ◆: Treated in superheated steam (SHS) alone, □: Treated in SHS combined with far infrared heating (FIH).

Table 3 Heat flow, time and energy for carbonization by the superheated steam treatment (SHS) and the combined treatment of SHS with far infrared heating (FIH) (carbonization ratio=0.99).

	Carbonization temperature [°C]	Heat flow to generate SHS [kW]	Heat flow in FIH [kW]	Heat flow for carbonization [kW]	Carbonization time [s]	Carbonization energy [MJ]
SHS255°C	255	6.08		6.08	51,200	311
SHS265°C	265	6.12		6.12	23,000	141
SHS275°C	275	6.17		6.17	11,500	71.0
SHS285°C	285	6.21		6.21	7,680	47.7
SHS180°C + FIH375°C	270	5.77	0.88	6.65	11,500	76.5
SHS180°C + FIH400°C	280	5.77	0.96	6.73	7,680	51.7
SHS180°C + FIH425°C	290	5.77	1.04	6.81	2,420	16.5
SHS180°C + FIH450°C	300	5.77	1.12	6.89	1,650	11.4

とで、容易に炭化温度を 270~300℃ に調整することができた。過熱水蒸気単独の加熱でも、装置を炭化に必要な高温にすることは可能であるが、その場合に必要となる伝熱量を補うためには、過熱水蒸気の生成量とスーパーヒータの能力の大幅な増加が必要になるものと推察される。これらの諸点を総合すると、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理は、過熱水蒸気単独処理より低エネルギーでの炭化が可能であると考えられた。

Fig. 4 に遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での炭化処理で、遠赤外線ヒータ温度と炭化熱量との関係を示した。遠赤外線ヒータ温度を 375℃ から 450℃ に上昇させるための熱流の差は Table 3 より 0.24 kW であったが、どの木質試料でも遠赤外線ヒータ温度の上昇に伴い炭化に要する熱量は 1/6~1/7 以下となった。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理であっても、炭化温度が高温になるほど装置の立ち上げ時間が長くなるため、その分実際の炭化熱量は増加すると考えられるが、高温の遠赤外線加熱を付加するほど、高速な炭化処理が可能となり、炭化に要する熱量を大幅に低減させることが可能であると考えられた。

4. 結 論

過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理による竹粉および試料サイズを 1 mm, 2 mm, 3 mm に揃えた木材の炭化速度は、それぞれ一次反応速度式に従い、一次反応速度式より求めた炭化速度定数は炭化温度に対してアレニウスの式に従った。炭化反応の活性化エネルギーの値は、窒素ガス中でのセルロースの熱分解反応の活性化エネルギーの値 [7] とほぼ一致し、過熱水蒸気処理および遠赤外線加熱を付加し

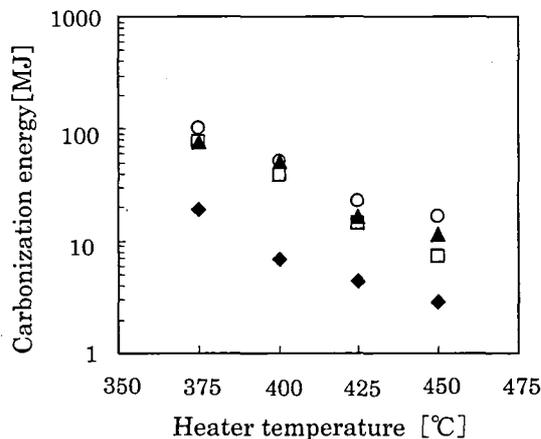


Fig. 4 Relationship between the carbonization energy and far infrared heater's temperature treated in superheated steam combined with far infrared heating. ◆: Bamboo powder, □: Wood 1 mm-cube, ▲: Wood 2 mm-cube, ○: Wood 3 mm-cube.

た過熱水蒸気処理でのバイオマスの炭化反応は熱分解反応であることが示唆された。

過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理での試料サイズ X の対数と炭化速度定数 k の対数の関係は、各炭化条件において直線となり、 $k=b \cdot X^{-n}$ で表された。 n の平均値は、過熱水蒸気単独処理の場合が約 1、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合で約 2/3 であった。一方、 b 値は、過熱水蒸気単独処理および遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合で、それぞれ炭化温度に対して直線で表された。これらの結果、 n 値、 b 値の予測が可能となったことから、任意の試料サイズと炭化条件での炭化速度定数 k を求めることが可能となり、本実験で行っていない試料サイズでも炭化速度の予測が可能となった。

本実験で設定した炭化条件では、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理で過熱水蒸気生成熱流の 1/5 程度の熱流を遠赤外線ヒータに付加することで、過熱水蒸気単独では炭化が不可能な過熱水蒸気温度 (180℃) でも炭化が可能となった。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、装置の立ち上げに要する時間や装置による熱損失などを考慮すると、過熱水蒸気単独処理と比較して低エネルギーでの炭化が可能であると考えられた。遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理では、遠赤外線ヒータの温度を高くするほど高温で高速な炭化処理が可能となり、炭化エネルギーを低減できることが示された。

引 用 文 献

- [1] 炭素材料学会, “活性炭—基礎と応用”, 講談社, 1975, pp.79-96.
- [2] 樋口清之, “木炭”, 財団法人法政大学出版局, 1993, pp.22-23.
- [3] 社団法人日本エネルギー学会, “バイオマスハンドブック”, 株式会社オーム社, 2002, pp.116-124.
- [4] 吉田弘之, “過熱水蒸気の利用技術 (過熱水蒸気による廃木材の炭化・資源化)”, 過熱水蒸気技術集成, NTS, 2005, pp.85-93.
- [5] 伊佐亜希子, 羽倉義雄, 鈴木寛一; 遠赤外線加熱の付加による過熱水蒸気処理の伝熱速度および熱効率の改善, 日本食品工学会誌, 7, 225-232 (2006).
- [6] 鈴木寛一, 伊藤剛, 羽倉義雄; 過熱水蒸気を用いる炭水化物の炭化特性; 日本食品工学会誌, 8, 39-43 (2007).
- [7] P. Aggarwal, D. Dollimore, K. Heon; Thermal Analysis Study of Two Biopolymers Starch and Cellulose, Journal of Thermal Analysis, 50, 7-17 (1997).

引用 URL

[i] <http://www.biomass-hq.jp/tech/4/99.pdf>

要 旨

竹粉（粒径 0.2 mm）および試料サイズを 1 mm, 2 mm, 3 mm 角に揃えた木片を遠赤外線加熱（FIH）を付加した過熱水蒸気（SHS）処理で炭化処理し、試料サイズの違いが炭化速度に及ぼす影響について調べた。SHS 温度 180℃に FIH 温度 375, 400, 425, 450℃を付加して、炭化温度を 270, 280, 290, 300℃に調整した。また、SHS 温度 255, 265, 275, 285℃の SHS 単独処理の場合と FIH 付加に要する炭化エネルギーを比較した。

2つの炭化処理で過熱水蒸気生成速度は同じとした。

炭化速度は、どの試料においても一次反応速度式に従った。活性化エネルギーの平均値は、遠赤外線加熱を付加した過熱水蒸気処理の場合は 137 kJ/mol, 過熱水蒸気単独処理の場合は 149 kJ/molであった。これらの値は、窒素ガス中での澱粉やセルロースの熱分解反応の活性化エネルギーの文献値とほぼ一致した。試料サイズと炭化速度定数の関係は、いずれの炭化温度でも両対数紙上で直線で表された。SHS 処理に FIH を付加した場合には、SHS 単独処理の場合と比較してわずかな熱量の付加で炭化装置を高温条件にすることが容易であり、遠赤外線ヒータの温度を高温にするほど炭化時間の短縮効果によって炭化に要する熱量は減少した。