Original Paper

Special articles: Biomass

特集：バイオマス

Numerical Simulation of the Thermal Conduction of Packed Bed of Woody Biomass Particles Accompanying Volume Reduction Induced by Pyrolysis

Ken-ichiro TANOUE^{*1}, Widya WIJAYANTI^{*1}, Kei YAMASAKI^{*1}, Takashi KAWANAKA^{*1},
Atsushi YOSHIDA^{*1}, Tatsuo NISHIMURA^{*1}, Miki TANIGUCHI^{*2}, and Ken-ichi SASAUCHI^{*2}

(Received February 25, 2010)

減容を伴う木質バイオマスの熱分解過程における熱伝導シミュレーション

田之上健一郎^{*1}, ウィディア ウィジャヤンティ^{*1}, 山崎 慶^{*1}, 川中隆司^{*1},
吉田篤史^{*1}, 西村龍夫^{*1}, 谷口美希^{*2}, 笹内謙一^{*2}

In this report, a packed bed of biomass particles undergoing pyrolysis has been two-dimensionally visualized. The apparent density of the biomass layer was also measured. The setting temperature of the furnace was changed from 523 K to 1073 K. The heating rate of the furnace was 400 K /hr. From the experimental results, it was found that the volume reduction process was closely connected with the pyrolysis and divided three regions; i) region of dehydration from biomass, ii) region of pyrolysis of cellulose and iii) region of pyrolysis of lignin. It was found that the reduction process of the biomass layer through the pyrolysis could be expressed by the reversible first-order chemical reaction model. The apparent density depended on the temperature. Especially, the density at $T > 623$ K became about 60% of that at room temperature. Furthermore, time course of average temperature in the biomass layer can be reproduced by the numerical simulation of the thermal conduction through the pyrolysis, which is included in the change of the apparent density and the change of the biomass surface by the volume reduction.

Key Words

Pyrolysis, Volume reduction process, Thermal conduction, Numerical simulation

1. 緒 言

近年、地球環境に優しいエネルギー資源の創出が急務となっており、未利用森林による木質バイオマスエネルギー生成に高い関心が寄せられている。これは、バイオマスが、再生可能であること、莫大な賦存量であること、貯蔵・代替性に優れていること、カーボンニュートラルであることなど多くの特徴を持つためである。我が国において、バイオマスエネルギーを導入する場合、バイオマスの集積量、エネルギー需要量に見合った小規模かつ高効率なガス化設備の普及が不可欠であると思われる。特に、ガス化装置を設計する上で、反応を含むバイオマスの物質伝達、バイオマスの熱伝達を知ることが重要である。

一般に、バイオマスの熱分解反応は、Fig. 1に示したように進行することが知られている¹⁾²⁾。第1段階では、バイオマス

が、ガス、タールとチャーに熱分解する。この反応は、ホロセルロースやリグニンの熱分解³⁾として研究されている。また、第2段階では、生成したタールが気体中で分解すること、また、第1段階とは別なチャーが生成されることを意味している。さらに、素反応を含めた詳細な研究が活発に行われている。

一方で、ガス化装置を設計する際には、バイオマス層の熱伝導機構を明らかにする必要がある。一般に、熱化学反応を熱伝導方程式中で取り扱う際、バイオマスの体積は変化しないものとして解析される⁴⁾。これに対し、筆者ら⁵⁾は、0.6gのバイオマスを用いて熱分解実験を行い、バイオマス層の実験終了後の体積は設定温度に依存するという事を明らかにしている。しかし、熱分解時に、どのように体積が変化し、ひいてはバイオマス層の見かけ密度がどのように変化していく

* 1 Yamaguchi University
2-16-1, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan

* 2 Chugai Ro Co. Ltd
2-4, Chikko-Shinmachi, Nishi-ku, Sakai-shi, Osaka
592-8331, Japan

* 1 山口大学大学院理工学研究科機械工学専攻
〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

* 2 中外炉工業(株) 堺事業所エンジニアリングセンター
〒592-8331 堺市西区築港新町 2 丁 4 番

Fig. 1 Macroscopic chemical reaction mechanism of pyrolysis of woods^{1) 2)}

かについては明らかに成っていない。また、バイオマス層が減容する際の熱伝導機構がどのように変化するかを調査した報告例はない。

また、筆者らは、ロータリーキルンでの伝熱長さを決定する指針を提案することを目指している。しかし、ロータリーキルンでは、解析対象が3次元になること、回転の効果を考慮しなければならないこと、解析モデルの妥当性を評価するためのバイオマス試料の温度計測が困難であること、など解決しなければならない事項が多数存在する。この場合、まず、バイオマスが運動しない場合、どのような熱伝導挙動となるかについてモデル化することが重要である。この熱伝導のモデル化が完成すれば、バイオマスの回転の効果をどのように考慮するかという問題だけに帰着する。

本研究では、固定床型熱分解炉を用いて、見かけ密度の設定温度依存性や輻射を受けるバイオマス層表面位置を推定するために、バイオマス層の減容過程の可視化を行った。さらに、見かけ密度の温度依存性、減容を考慮した数値シミュレーションを行い、バイオマス層内の温度測定結果と比較し、モデルの妥当性について検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験試料

バイオマス試料として米松のおがくず(平均径 $D_0 = 1$ mm)を用いた。ガス化の前処理として、バイオマスは乾燥機によ

て383Kで120分乾燥させたものを使用した。

2.2 バイオマス層の減容過程の可視化実験

Fig. 2に示すような可視化窓が付いた電熱式円筒横型試験炉(中外炉工業製、内径118mm、長さ230mm)を使用してバイオマス層の可視化実験を行った。まず、石英ビーカー(高さ63mm、内径50mm)に乾燥木質バイオマスを9 g入れ、バイオマス層の高さが約30mmになるように調節した。次に、温度分布測定用の熱電対をバイオマス層に挿入し、ビーカーを試験炉に固定した。加熱開始と同時に、バイオマス層のビデオカメラによる撮影、及び温度分布測定を開始した。この温度計測は、後述する減容速度を算出するために行った。なお、タールの発生によって可視化窓が曇ることを防ぐために、実験中は4 L/minの N_2 ガスを炉内に流入させ排気管を通して除去した。実験終了後、試験炉内に空気が入らないように試験炉を密閉し、炉内温度が室温になったことを確認した後、バイオマス試料を取り出し、電子天秤を用いて実験後の重量を測定した。また、バイオマス層の体積は、撮影した可視化像を2値化して求めた。実験後のバイオマス質量をバイオマス体積で割ることにより、各設定温度における見かけ密度を算出した。

2.3 バイオマス層の温度分布測定実験

Fig. 3に示すように円筒型試験炉(中外炉工業製、内径118mm、長さ230mm)を縦置きにし、熱分解時のバイオマス層の温度分布測定を行った。まず、試験炉内に約100gのバイオマス試料を充填し、バイオマス層の高さが約90mmになるように調節した。実験前に、試験炉内の空気を排出させるために出口の酸素濃度が1%以下になるまで一定流量の N_2 ガスで炉内を置換した。置換後、 N_2 ガスの供給を停止した。熱電対は、バイオマス層の半径方向28 mm, 38 mm, 48 mmおよび高さ位置、10 mm, 30 mm, 50 mmの位置に計9本の熱電対を挿入し、さらに3本の熱電対で試験炉の壁面温度を測定した。このとき、バイオマス層の平均温度は、次式で定義した。

$$T_{B,Exp} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 T_{b,Exp}(i) \quad (1)$$

実験条件をTable 1に示した。

Fig. 2 Experimental apparatus for the volume reduction of the packed bed of biomass particles undergoing pyrolysis

Fig. 3 Experimental apparatus for the temperature measurement in packed bed of woody biomass particles during the pyrolysis

Table 1 Experimental conditions

Visualization		
Initial weight (g)	W_0	9
Initial volume (cm ³)	V_0	59
Setting temperature(K)	T_s	523 - 1073
Heating rate (K/hr)	T_s	400
Operation time (hr)	t	3
Temperature measurement		
Initial weight (g)	W_0	100
Initial volume (cm ³)	V_0	794
Setting temperature (K)	T_s	1073
Heating rate (K/h)	T_s	400
Operation time (hr)	t	3

3. 数値解析

バイオマス層内での熱伝導について、2次元円筒座標を用いて数値解析を行った。Fig. 4に、解析領域および解析に用いたメッシュを示す。解析領域は温度分布測定で行った実験条件と同様に、半径 $r = 53\text{mm}$ 、高さ $z = 90\text{mm}$ のバイオマスが充填されたものとした。解析は格子数 $N_r \times N_z = 140 \times 234 = 32,760$ 個の等間隔メッシュを用いて行った。化学反応熱を考慮した熱伝導方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\lambda r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial}{\partial z} \right) + (-\Delta H) \left(-\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (2)$$

なお、右辺第3項の熱分解速度については、一般に、次式のように取り扱われている。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{V_0} \frac{\partial W}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 V_0 : バイオマス層の初期体積、 W : バイオマス質量である。

本来は、バイオマスについての物質収支式をもとめ、(2)式と連立して解くべきである。本研究では、簡単化のため、各メッシュにおける密度を温度の関数で与えることにより、熱収支のみで解析を行った。本試験装置のように昇温速度が十分に小さく (400K/hr)、瞬間瞬間で擬定常状態と仮定でき

Fig. 4 Calculation domain and mesh

ば、熱分解速度は、実測で得られた見かけ密度を用いて、次式で算出できる。

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\rho(T) - \rho(T^0)}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 $\rho(T)$: 温度 T における見かけ密度、 $\rho(T^0)$: 温度 T^0 における見かけ密度、 Δt : 時間ステップである。なお、後述するように (Fig. 9 参照) $T > 623\text{K}$ では、見かけ密度はほとんど変化しない。従って、 $T > 623\text{K}$ では、 $-\partial \rho / \partial t \neq 0$ となる。また、見かけ密度は、次式で求めた。

$$\rho = \frac{W_\infty}{V_\infty} \quad (5)$$

ここで、 W_∞ : バイオマス層の減容後の平衡質量 (g)、 V_∞ : バイオマス層の減容後の平衡体積 (m³) である。

また、化学反応熱については、文献値 ($-\Delta H = -255 \text{ kJ/kg}^4$) を基準とし、0, -100, -400 kJ/kg として計算を行った。物性値の温度依存性を、Table 2に示す。バイオマス層の比熱は空隙率を用いて表現した。また、バイオマス層の有効熱伝導率については、Yagi らが提案した式⁶⁾を適用した。また、バイオマス層の密度については、i) 空隙率が一定の場合 ($\varepsilon = 0.899$) と、ii) 実験によって温度依存性を求めた場合の2種類について解析を行った。なお、ii) の場合は、見かけ密度から空隙率を算出し、比熱、熱伝導率を変化させた。

境界条件は以下のように設定した。

i) $z = 0$ (バイオマス層底面)

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

ii) $z = z_s$ (バイオマス層表面)

$$\lambda_{BL} \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_H(t) - T) + e\sigma(T_H(t)^4 - T^4) \quad (7)$$

ここで、 z_s : バイオマス層表面位置 (m)、 λ_{BL} : バイオマス層の熱伝導率 (W/(mK))、 h : 流れ無しの場合の伝熱係数 (W/(m²K))、 $T_H(t)$: 時刻 t における炉壁面の設定温度 (K)、 T : バイオマス層表面の温度 (K)、 e : バイオマスの放射率、 σ : ステファン・ボルツマン定数 (W/m²K⁴) である。

iii) $r = 0$ (中心軸)

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

Table 2 Physical properties

				Reference
Specific heat (J/kg/K)	C_p	Gas (G)	$975 + 0.193 T$	7)
		Solid (S)	$110 + 3.47 T$	4)
		Packed bed of biomass particles (PB)	$(1 - \varepsilon) C_{pS} + \varepsilon C_{pG}$	Present work
Thermal conductivity (J/s/m/K)	λ	G	$0.000331 T^{0.763}$	8)
		S	$0.0777 + 10^{-4} T$	4)
		PB	$\frac{\lambda_{PB}}{\lambda_g} = \varepsilon \left(1 + \frac{\alpha_{rv} D_p}{\lambda_g} \right) + (1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{\frac{1}{\phi} + \frac{\lambda_g}{\alpha_{rs} D_p}} + \frac{2}{3} \frac{\lambda_g}{\lambda_s} \right)^{-1}$ $\alpha_{rs} = 0.915 \times 2 \frac{e}{1 - e} \left(\frac{T}{100} \right)^3$ $\alpha_{rv} = \frac{0.915 \times 2}{1 + \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{e}{1 - e}} \frac{e}{1 - e} \left(\frac{T}{100} \right)^3$	6)
Density (Kg/m ³)	ρ	G	$\frac{341}{T}$	Ideal gas law for nitrogen
		S	1500	10)
		PB	$(1 - \varepsilon) \rho_s$	9)
		PB	$\begin{cases} -0.0282T + 162 & (293K < T < 523K) \\ -0.004527T^2 + 23.21T - 383 & (523K < T < 623K) \\ 97.1 & (623K < T < 1073K) \end{cases}$	Present work
Emissivity of biomass (J/kg/K)	ε	-	0.95	4)
Heat transfer coefficient without flow (J/s/m ² /K)	h	-	$2 \frac{\lambda_G}{D_p}$	8)

iv) $r = R$ (壁面)

$$T = T_w(t, z) \quad (9)$$

ここで、 $T_w(t, z)$: 時刻 t , 位置 z における炉壁面の温度 (K, 測定値) である。

以上の基礎方程式および境界条件をコントロールボリューム法に基づいて離散化を行った。数値計算プログラムは fortran 言語で作成したものを使用した。数値計算のフローチャートを Fig. 5 に示した。本解析では、物性値の温度依存性のみならず、バイオマス層の表面位置の変化を、後述する減容を考慮した式 (Eq.13) に基づいて、再現した。温度分布はSOR法によって求め、また、バイオマス層表面での温度は、Newton-Raphson法によって求めた。このとき、バイオマス層の平均温度は、次式で定義した。

$$T_{B,cal} \equiv \frac{1}{NR_b \times NZ_b} \sum_{i=1}^{NR_b} \sum_{j=1}^{NZ_b} T_{b,cal}(i, j) \quad (10)$$

ここで、 NR_b : 熱電対の設定位置 ($28 \text{ mm} < r < 53 \text{ mm}$) 内の半径方向のメッシュ数, NZ_b : 熱電対の設定位置 ($10 \text{ mm} < z < Z_s$) 内の半径方向のメッシュ数である。ただし、 Z_s は、バイオマス層の表面位置である。

計算では、バイオマスの空間濃度の変化を次の3種類のモデルで検討した。まず、モデル①は、見かけ密度およびバイオマス層体積を一定としたものである。次に、モデル②は、見

Fig. 5 Flow chart of numerical simulation for the thermal conduction with the volume reduction of packed bed of biomass particles

かけ密度の温度依存性を考慮し、バイオマス層体積を一定としたものである。また、モデル③は、見かけ密度の温度依存性を考慮し、さらに、バイオマス層の表面位置の変化を考慮したモデルである。以上のモデルを用いて、解析を行い、実験結果との比較を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 バイオマス層の減容過程

Fig. 6 に設定温度 $T_s = 1073\text{K}$ のときのバイオマス層の可視化結果を示す。これより、 $t < 50\text{min}$ (バイオマス層平均温度 $= 573\text{K}$) では、ほとんど減容しないことがわかる。 $t > 55\text{min}$ では炭化が始まり、 $65\text{min} < t < 80\text{min}$ で、急激に減容が始まる。 $t > 80\text{min}$ では、緩やかに減容していくことがわかる。この可視化結果から求めたバイオマス層体積の経時変化の設定温度依存性を Fig. 7 に示す。プロットは実験結果を、実線は後述する解析線を示す。これより、 $T_s < 623\text{K}$ までは、バイオマス層体積は緩やかに減少することがわかる。一方、 $673\text{K} > T_s$ において、バイオマス層は急速に減容していることがわかる。この温度域では、バイオマスからタールが生成される温度に対応しており、Fig. 1 に示した熱分解反応①が活発化するかどうかで減容過程が大きく変化することがわかった。また、いずれの設定温度においてもバイオマス層の体積は、ある一定の値に漸近することがわかった。

次に、減容過程が熱分解過程と密接な関係があると考え、1次反応モデルを用いて解析を行った。

$$\frac{dV}{dt} = -k \frac{(V - V_\infty)}{(V_0 - V_\infty)} \quad (11)$$

Fig. 6 Snapshots of packed bed of woody biomass particles through the pyrolysis

Fig. 7 Time course of the volume reduction process undergoing the pyrolysis

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{a}{T_{B,Exp}}\right) \quad (12)$$

ここで、 k : 減容速度定数 (m^3/min)、 V : バイオマス層の体積 (m^3)、 V_0 : バイオマス層の初期体積 (m^3)、 V_∞ : バイオマス層の減容後の平衡体積 (m^3)、 $T_{B,Exp}$: バイオマス層平均温度 (K)、 k_0 , a : 定数である。

Eq. 8 を用いて、各設定温度における減容速度定数 k を算出した。バイオマス層温度の逆数 ($1/T_{B,Exp}$) に対する減容速度定数 k のアレニウスプロットを Fig. 8 に示す。これより、減容速度定数の値は、大きく 3 つの領域に分割できることがわかる。まず、 $300\text{K} < T_{B,Exp} < 580\text{K}$ では、セルロースの脱水反応支配域であり、この領域では減容しにくい。次に、 $580\text{K} < T_{B,Exp} < 630\text{K}$ では、急激に減容が進行する。この温度域は、セルロースおよびヘミセルロースの熱分解が支配的な領域に該当する。さらに、 $T_{B,Exp} > 630\text{K}$ では、再び減容速度が小さくなる。この領域は、主にリグニンの熱分解反応が支配的な領域である。Table 3 に k_0 , a の値を示した。以上の方法によって求めた減容速度定数 k を、Eq. 8 に代入して積分すると以下の式を得る。

$$V = V_\infty + (V_0 - V_\infty) \exp\left(-\int_0^t \frac{k_0 \exp\left(-\frac{a}{T_{B,Exp}}\right)}{V_0 - V_\infty} dt\right) \quad (13)$$

Eq. 10 を用いて算出した体積の経時変化 Fig. 7 中に示す。これらの結果から、バイオマス層体積の経時変化は本解析モデルによって概ね再現できることが分かった。また、各設定温度におけるバイオマス層体積の平衡値およびバイオマス層質量の平衡値を用いて、見かけ密度を求めた。Fig. 9 に見かけ密

Fig. 8 Arrhenius plots for the rate constant of the volume reduction of packed bed of woody biomass particles

Table 3 Parameters for the rate constant of volume reduction in Eq.(7)

Temperature (K)	k_0 (cm^3/min)	a ($1/\text{K}$)
$300 < T_{B,Exp} < 580$	483000	7600
$580 < T_{B,Exp} < 630$	8000000	8800
$630 < T_{B,Exp} < 1073$	6.86	410

Fig. 9 Relationship between the apparent density of the biomass layer and the setting temperature

度の温度依存性を示す。実線はTable 2中に示したバイオマス層の見かけ密度の温度依存性に関する近似曲線である。これより、 $T_s < 523\text{K}$ までは、見かけ密度はほとんど変化せず、 $523\text{K} < T_s < 623\text{K}$ で急激に変化した。また、 $T_s > 623\text{K}$ 以上では、見かけ密度の値はほぼ一定となることがわかった。言い換えると、 $T_s > 623\text{K}$ 以上ではバイオマスからの固気変換は完了していることを意味していると思われる。数値計算には、実線で示した近似曲線を用いて、見かけ密度の温度依存性を表現した。また、バイオマス充填層の減容を考慮するモデル③の熱伝導計算においては、次のようにバイオマス充填層の表面位置 z_s を決定した。ある時刻 t における充填層の温度 $T_{B,t}$ が決まると、そのときの減容速度定数 k_t が求まる。同様に時刻 $t+\Delta t$ では、充填層の温度は、 $T_{B,t+\Delta t}$ となる。このとき、(13)式は、次のように表せる。

$$V \cong V_{\infty} + (V_0 - V_{\infty}) \exp \left(-\frac{k_0 \Delta t}{V_0 - V_{\infty}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\exp \left(-\frac{a}{T_{B,0}} \right) + \exp \left(-\frac{a}{T_{B,0+\Delta t}} \right) \right) + \frac{1}{2} \left(\exp \left(-\frac{a}{T_{B,\Delta t}} \right) + \exp \left(-\frac{a}{T_{B,2\Delta t}} \right) \right) + \dots + \frac{1}{2} \left(\exp \left(-\frac{a}{T_{B,t-\Delta t}} \right) + \exp \left(-\frac{a}{T_{B,t}} \right) \right) \right) \quad (14)$$

また、バイオマス充填層の半径位置 R が変化しないと仮定すれば、その表面位置 z_s は、

$$z_s = \frac{V}{\pi R^2} \quad (15)$$

となる。

4.2 バイオマス層内で生じる熱伝導

Fig. 10 に壁面温度およびバイオマス層内の平均温度 (T_B) の経時変化を示す。プロット点は Fig. 3 に示した実験装置で行った測定結果であり、線は数値計算結果である。Fig. 10a より、実験結果をみると、おおそ3つの温度変化領域が存在することが分かる。壁面温度 (T_W) が 623K になるまでは $T_{B,\text{exp}}$ は上昇しにくく、壁面との温度差は最大で約 150K になる。さらに $623\text{K} < T_W < 723\text{K}$ では急激に $T_{B,\text{exp}}$ が上昇する。 $723\text{K} < T_W < 1073\text{K}$ では緩やかに $T_{B,\text{exp}}$ が上昇しやがて壁面温度に漸近する。また、図中の数値解析結果は、 $-\Delta H = 0\text{ kJ/kg}$ の結果である。これより、 $T_{B,\text{Cal.}} < 573\text{K}$ では、見かけ密度の変化や減容によるバイオマス表面位置の変化を考慮していない

a) $-\Delta H = 0\text{ kJ/kg}$

b) Model ③

Fig. 10 Comparison of the measured average temperature in the packed bed of biomass particles with the calculated one

モデル①でも実験結果を再現できていることがわかる。しかし、モデル①では、単調に温度変化し、熱分解反応が生じる温度域で、実験結果を再現できていないことがわかる。一方、見かけ密度の温度依存性を考慮したモデル②では、大幅に改善されるものの、 $573\text{K} < T_{B,\text{Cal.}} < 673\text{K}$ の熱分解反応域と $T_{B,\text{Cal.}} > 673\text{K}$ の輻射伝熱が支配的になる温度域とで実験結果を再現できていないことがわかる。さらに、減容によるバイオマス表面位置の変化を考慮したモデル③では、 $573\text{K} < T_{B,\text{Cal.}} < 673\text{K}$ の熱分解域で実験結果を再現できていない。これは、化学反応熱を 0 kJ/kg としたためである。Koufopoulos ら⁴⁾ によれば、バイオマスの熱分解反応は、吸熱反応であり、化学反応熱を -255kJ/kg と提案している。Fig. 10b にモデル③を用いて、化学反応熱をパラメータとした数値解析結果と実験結果を比較したものを示す。図より、本数値解析結果は、 -400kJ/kg の反応熱を用いることで、実験結果をおおむね再現することがわかった。しかし、化学反応が急速に進む温度域 ($573\text{K} < T_{B,\text{Cal.}} < 773\text{K}$) で最大 60K の誤差が生じた。

Fig. 11 にバイオマス層の温度分布の経時変化を示す。Fig. 11 a) は実験結果を、Fig. 11 b), c) は計算結果を示す。これより、 $t=50\text{min}$ までは、いずれの計算モデルでも実験結果を再現できていることがわかる。しかし、減容が支配的となる $t > 70\text{min}$ 以降では、Fig. 11 b) に示した model ①では、実験結果を再現できていないことがわかる。一方、Fig. 11 c) に示した model ③では、バイオマス層での熱移動が輻射熱によって支配される様子が良く再現できている。ただし、バイオマス層表面で急激な温度上昇がみられ、これについては、バイオマス

Fig. 11 Comparison of measured temperature distribution in the packed bed of biomass particles with the calculated ones

からのガスの対流によって運ばれる伝熱量を考慮していないためであると考えられる。

今後は、化学反応熱の温度依存性を実験的に求め、反応熱の温度依存性やバイオマスからの発生ガスによる対流伝熱を考慮した数値解析が望まれる。

5. 結 論

木質バイオマスの熱分解中における減容過程について、設定温度 523K から 1073K の範囲において、昇温速度 400 K/hr の条件下で可視化実験を行い、また、実験後における見かけ密度を算出した。その結果、減容過程は、i) セルロースからの脱水反応域、ii) セルロースの熱分解域、iii) リグニンの熱分解域の 3 つに分類され、1 次反応を仮定したモデルで概ね再現できることがわかった。また、バイオマス層の見かけ密度は温度依存性を有し、 $T > 623\text{K}$ で室温の見かけ密度の約 60% まで減少することがわかった。

さらに、見かけ密度の温度依存性や減容によるバイオマス表面位置の変化を考慮した熱伝導解析によって、実験結果を概ね再現することがわかった。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省「科学研究費 基盤 (C) No.1956174」ならびに JSPS Core-To-Core program (No. 18004) の支援を受けた。また、本研究を遂行するにあたり、宇部興産 宇部研究所 横田守久氏の助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献 : References

- 1) Babu, B. V., Chaurasia, A. S., *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 1999(2004)
- 2) Shafizadeh, F., Sarkanen, K. V., Tillman, D. A., Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins, (New York, Academic Press), p. 19-35(1976)
- 3) 長谷川功, 藤沢秀忠, 砂川賢司, 前一廣, 日エネ誌, **84** (1), 46(2005) : Hasegawa, I., Fujisawa, H., Sunagawa, K., Mae, K., *J. Jpn. Inst. Energy*, **84**(1), 46(2005)
- 4) Koufopoulos, C. Papayannakos, A., N., Maschio, G., Lucchesi, A., *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 907(1991)
- 5) 田之上健一郎, 西村龍夫, 日名内竜也, 内田一也, 谷口美希, 笹内謙一, エネルギー・資源, **28-3**, 186(2007) : Tanoue, K., Nishimura, T., Hinauchi, T., Uchida, K., Taniguchi, M., Sasauchi, K., *Energy and Resources*, **28-3**, 186(2007)
- 6) Yagi, S., Kunii, D., International Development in Heat Transfer, Part IV, 742&750(1961)
- 7) 橋本健治, 反応工学, (培風館), p. 278(1989) : Hashimoto, K., Chemical reaction engineering, (Baifukan), p. 278(1989)
- 8) Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., Transport phenomena, (John Wiley & sons, Inc.), (1984)
- 9) 粉体工学会, 粉体工学便覧, 日刊工業新聞社, p. 147(1998) : Funtai kogaku binran, Nikkan kogyo shinbunsha, p. 147(1998)
- 10) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, (朝倉書店), p. 117(2006) : Okano, K., Sofue, N., Mokuzai kagaku handbook, (Asakura shoten), p. 117(2006)