Original Paper

Special articles : Biomass

特集：バイオマス

A Relationship between the Formation Rate of Solid Component and Volume Reduction of Packed Bed of Woody Biomass Particles during Pyrolysis

Ken-ichiro TANOUE^{*1}, Kei YAMASAKI^{*1},
Tatsuo NISHIMURA^{*1}, Miki TANIGUCHI^{*2}, and Ken-ichi SASAUCHI^{*2}

(Received February 28, 2011)

木質バイオマスの熱分解中に生じる減容過程と固形分生成速度との関係

田之上健一郎^{*1}, 山崎 慶^{*1}, 西村龍夫^{*1}, 谷口美希^{*2}, 笹内謙一^{*2}

In this report, the yield of solid component undergoing the fast and slow pyrolysis in the packed bed of biomass particles has been compared with the analyzed one by the different three kinetic models (model-1: Thurner et.al, model-2: Mohan et.al, model-3: Miller et.al). From the results, the yield of solid component could be reproduced by the analysis using the model-3 even if the heating rate and the lignin content changed. Furthermore, the relationship between the volume reduction process in the packed bed and the chemical reaction undergoing pyrolysis was elucidated by the formularization. From the result, the volume in the packed bed of the biomass undergoing the pyrolysis can be estimated by using the model-3 and the dependence of gas volume in the bed on the temperature.

Key Words

Pyrolysis, Volume reduction, Lignin content, Packed bed

1. 諸 言

日本は国土の67%が森林に囲まれており、重量換算で、人工林からの林地残材 400 万 t/year, 天然林 1000 万 t/year もの森林が未利用のままである。最近では、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おり、さまざまなガス化試験プラントが開発されている。今後、日本のように急峻な山に囲まれている場合、木材の運搬コストを低下させるために、立地条件に適した規模のガス化プラントを開発していくことが望まれる。特にプラントの中核である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は重要である。

バイオマスは、熱分解によって、チャー、C1-C2系炭化水素などのように中位発熱量をもつガス、凝縮性有機化合物(タール)が生成されることが知られており、これまでにバイオマス粒子内の素反応を含め、さまざまな化学反応モデルが提案されている¹⁾。

一方で、熱分解中の化学反応を考慮に入れた熱伝達特性については、Koufopoulos²⁾, Won³⁾ などさまざまな研究者が取り組んでおり、シミュレーションによって予測できつつある⁴⁾。しかし、これらのモデルのほとんどは、バイオマス層の体積は変化しないと仮定したものであり、バイオマス層とガス層との界面を推定するときに重要になる減容過程についての考慮がなされていない。

著者らは、前報⁵⁾で、バイオマスの熱分解中に生じる減容過程を可視化により明らかにし、減容を考慮した熱伝導計算によって、バイオマス充填層内の伝熱特性はおおむね再現できることを明らかにした。しかし、前報⁵⁾では、熱分解反応を考慮しておらず、また減容過程と熱分解反応との関係は明らかになっていない。

本研究では、これまでに我々が行ってきた低速熱分解実験データ⁵⁾ および急速熱分解実験データ⁶⁾ を用いて、既存の熱分解モデルと固形分収率について比較・検討を行った。さら

* 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

に、それらの熱分解モデルを用いて、木質バイオマスの減容過程がどのように再現できるかについて検討した。

2. 実験

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 $D_p = 1$ mm)またはバークのおがくず(平均径 $D_p = 0.5$ mm)を用いた。また、これらのバイオマス試料の組成は、Ayhanの論文⁷⁾から引用し、それをTable 1に示した。ガス化の前処理として、バイオマスは乾燥機によって383 Kで120 min乾燥させたものを使用した。

2.2 固形分の収率測定実験およびバイオマス層体積の可視化実験

2つの熱分解実験^{5) 6)}で得られた固形分収率を用いた。1つ目の急速熱分解実験⁶⁾は、予め所定の温度に設定した加熱炉に、 $W_{B0} = 0.6$ gのバイオマスを充填したステンレス製の籠を挿入し、 $t = 5$ min後に籠を引き上げた。実験終了後、チャーの質量を測定した。また、2つ目の低速熱分解実験⁵⁾は、可視化窓付きの加熱炉内に、 $[W_{B0}] = 9$ gのバイオマス試料を充填した石英ビーカーを設置し、400℃/hで設定温度まで $t = 180$ min加熱した。実験中は、ビデオでバイオマス層を撮影し、画像を2値化することによりバイオマス層の体積変化を調査した。実験条件をTable 2に示した。さらに、反応モデルから固形分収率を推定するためには、バイオマス充填層の温度が必要である。本研究では、Fig. 1に示したバイオマス充填層温度の経時変化の実測データを用いて解析を行った。なお、バイオマス充填層温度は、1 sおき(急速熱分解)または5 sおき(低速熱分解)に計測しているため、それ以下のタイムステップごとの温度は、spline補間して求めた。そのほか、詳細な実験装置および手法については、前報^{5) 6)}で示したとおりである。

3. 熱分解モデルおよび解析方法

Table 3に今回使用した反応モデルを示した。本研究では、Table 1でも示したように、リグニン含有量が大きく異なるバ

イオマス試料の固形分収率を測定した。このことを意識して、バイオマスの主要成分が考慮されたモデルと考慮されていないモデルを選択した。Model-1は、バイオマスの熱分解反応を示す一番典型的なモデル⁸⁾であり、木質バイオマスが、熱分解によってガス、タール、チャーがそれぞれ並列反応で生成されるとしたものである。反応速度定数もいくつか提案されているが、本研究では、Di Blasiらが提案した値⁹⁾を使用した。Model-2¹⁰⁾、Model-3¹¹⁾は、木質バイオマスの主要成分であるヘミセルロース、セルロース、リグニンがそれぞれ並列に熱分解するとしたものであり、固形分の最終収率を意識したモデルである。Model-2中のヘミセルロースの熱分解モデルおよ

a) Fast pyrolysis

b) Slow pyrolysis

Fig. 1 Time course of the temperature in the packed bed of biomass particles undergoing the pyrolysis

Table 1 Properties of biomass

True density of wood (g/cm ³)	ρ_T	1.5							
Kind of biomass	-	Sawdust of <i>Pseudotsuga menziesii</i>				Sawdust of Wood bark			
Size of biomass particles (mm)	D_p	1				0.5			
Component	-	Hemicellulose	Cellulose	Lignin	Ash	Hemicellulose	Cellulose	Lignin	Ash
Mass fraction (wt%)	w_i	24.4	45.8	28.0	1.7	29.8	24.8	43.8	1.6

Table 2 Experimental conditions

Initial weight of packed bed of biomass (g)	W_{B0}	0.6	9
Initial volume of packed bed of biomass (cm ³)	$V_{PB,0}$	2.6	58.9 (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) 36.1 (Wood bark)
Setting temperature (K)	T_s	523 - 1073	523 - 1073
Operation time (min)	t	5	180

Table 3 Reaction models for wood pyrolysis

Model		Reaction rate (kg/s)	Ref.
-1		$R_1 = 3.27 \times 10^6 \exp(-111700/R_g/T) [W]_{m1}$ $R_2 = 1.08 \times 10^{10} \exp(-148000/R_g/T) [W]_{m1}$ $R_3 = 4.38 \times 10^9 \exp(-152700/R_g/T) [W]_{m1}$ $R_W = d[W]_{m1}/dt = -(R_1 + R_2 + R_3)$ $R_C = d[C]_{m1}/dt = R_3$	8) 9)
-2		$R_{H1} = 7.94 \times 10^{16} \exp(-195000/R_g/T) [H]_{m2}$ $R_{H2} = 1.26 \times 10^7 \exp(-96000/R_g/T) [IS]_{m2}$ $R_H = d[H]_{m2}/dt = -R_{H1}$ $R_{IS} = d[IS]_{m2}/dt = \alpha_{H1} R_{H1} - R_{H2}$ $R_{Char,H} = d[C_H]_{m2}/dt = \alpha_{H2} R_{IS}$ $R_{CA1} = 7.94 \times 10^{16} \exp(-202650/R_g/T) \times [Ce_{A,0}]_{m2} ([Ce_A]_{m2} / [Ce_{A,0}]_{m2}) \times (1 - [Ce_A]_{m2} / [Ce_{A,0}]_{m2})^{0.481}$ $R_{CA} = d[Ce_A]_{m2}/dt = -R_{CA1}$ $R_{Char,CA} = d[C_{CA}]_{m2}/dt = \alpha_{CA} R_{CA1}$ $R_{CB1} = 1.26 \times 10^7 \exp(-255000/R_g/T) \times [Ce_{B,0}]_{m2} ([Ce_B]_{m2} / [Ce_{B,0}]_{m2})^{22} \times (1 - [Ce_B]_{m2} / [Ce_{B,0}]_{m2})$ $R_{CB} = d[Ce_B]_{m2}/dt = -R_{CB1}$ $R_{Char,CB} = d[C_{CB}]_{m2}/dt = \alpha_{CB} R_{CB1}$ $R_{L1} = 5.09 \times 10^5 \exp(-95000/R_g/T) [L]_{m2}$ $R_L = d[L]_{m2}/dt = -R_{L1}$ $R_{Char,L} = d[C_L]_{m2}/dt = \alpha_L R_{L1}$	10) 12) 13) 14)
-3		$R_{H1} = 2.10 \times 10^{16} \exp(-186700/R_g/T) [H]_{m3}$ $R_{H2} = 8.75 \times 10^{15} \exp(-202400/R_g/T) [AH]_{m3}$ $R_{H3} = 2.60 \times 10^{11} \exp(-145700/R_g/T) [AH]_{m3}$ $R_H = d[H]_{m3}/dt = -R_{H1}$ $R_{AH} = d[AH]_{m3}/dt = R_{H1} - R_{H2} - R_{H3}$ $R_{Char,H} = d[C_H]_{m3}/dt = \beta_H R_{H2}$ $R_{C1} = 2.80 \times 10^{19} \exp(-242400/R_g/T) [Ce]_{m3}$ $R_{C2} = 3.28 \times 10^{14} \exp(-196500/R_g/T) [AC]_{m3}$ $R_{C3} = 1.30 \times 10^{10} \exp(-150500/R_g/T) [AC]_{m3}$ $R_C = d[Ce]_{m3}/dt = -R_{C1}$ $R_{AC} = d[AC]_{m3}/dt = R_{C1} - R_{C2} - R_{C3}$ $R_{Char,C} = d[C_C]_{m3}/dt = \beta_C R_{C2}$ $R_{L1} = 9.60 \times 10^8 \exp(-107600/R_g/T) [L]_{m3}$ $R_{L2} = 1.50 \times 10^9 \exp(-143800/R_g/T) [AL]_{m3}$ $R_{L3} = 7.70 \times 10^6 \exp(-111400/R_g/T) [AL]_{m3}$ $R_L = d[L]_{m3}/dt = -R_{L1}$ $R_{AL} = d[AL]_{m3}/dt = R_{L1} - R_{L2} - R_{L3}$ $R_{Char,L} = d[C_L]_{m3}/dt = \beta_L R_{L2}$	11)

び速度パラメータは Varhegyi らによって提案された値¹²⁾を、セルロースの熱分解モデルおよび速度パラメータは Capart らによって提案された値¹³⁾を、セルロースの熱分解モデルおよび速度パラメータは Chan らによって提案された値¹⁴⁾をそれぞれ用いた。また、Table 3 中の Model-2, Model-3 中に示されているパラメータを Table 4 に示した。Model-2 では、セルロースが速く熱分解するものと遅く熱分解するものとに分けられている¹⁴⁾。この構成比は、Table 4 中の $f_{CA,0}$ および $f_{CB,0}$ で示した。今回は、タールの気相 2 次分解によるチャー生成の影響は無視した。解析は、4 次のルンゲクッタ法を用いて時間積

Table 4 Parameters of the reaction models

Model	Parameters	Value	Reference
-2	α_{H1}	0.56	
	α_{H2}	0.45	
	α_{CA}	0.087	12)
	α_{CB}	0.087	13)
	$f_{CA,0}$	0.821	14)
	$f_{CB,0}$	0.179	
-3	α_L	0.335	
	β_H	0.60	
	β_C	0.35	11)
	β_L	0.75	

分を行い、それぞれのModel, それぞれの設定温度ごとに次式に基づいて固形分質量を算出した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{For model-1} \\ [S_B] = [W_B]_{m1} + [C]_{m1} \\ \text{For model-2} \\ [S_B] = [H]_{m2} + [IS]_{m2} + [CH]_{m2} \\ \quad + [CelA]_{m2} + [CcA]_{m2} \\ \quad + [CelB]_{m2} + [CcB]_{m2} \\ \quad + [L]_{m2} + [CL]_{m2} \\ \text{For model-3} \\ [S_B] = [H]_{m3} + [AH]_{m3} + [CH]_{m3} \\ \quad + [Cel]_{m3} + [AH]_{m3} + [Cc]_{m3} \\ \quad + [L]_{m3} + [AL]_{m3} + [CL]_{m3} \end{array} \right. \quad (1)$$

さらに次式によって固形分収率を算出し、実験値との比較を行った。

$$y_s = \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} \quad (2)$$

なお、model-2, model-3におけるヘミセルロース、セルロースおよびリグニンの質量の初期値は、Table 1に示した質量分率に初期質量 $[W_{B,0}]$ をかけた値を用いた。タイムステップは、急激な熱分解を考慮して 10^{-3} s(急速熱分解)または 10^{-2} s(低速熱分解)とした。

4. 結果および考察

4.1 固形分収率の実験結果と各反応モデルによる解析結果との比較

Fig. 2に設定温度に対する固形分収率の変化を示した。Fig.

2aは、米松のおがくずを用いて急速熱分解を行ったものであり、いずれの反応モデルでも設定温度に対する固形分収率の分布形状を概ね再現できていることがわかる。Fig. 2bに示すように、米松のおがくずの低速熱分解による固形分収率は、Model-1でもModel-3でも実験値を概ね再現可能であった。したがって、米松のおがくずの熱分解は、Model-1またはModel-3の反応モデルに近いことが示唆される。一方、Figs. 2c, 2dに示すように、パークの固形分収率は、昇温速度の違いによらず、バイオマス中のリグニン量を考慮できるModel-3の反応モデルによって再現できることがわかった。

以上より、本研究範囲における熱分解による固形分収率は、昇温速度やバイオマス中のリグニン量によらず、Model-3を用いた解析によって再現可能であることが示された。

4.2 減容過程と反応モデルとの関係

Table 5に、熱分解前後におけるバイオマス充填層の質量、体積、見かけ密度および空隙率の実験結果を示した。空隙率は、見かけ密度および真密度を用いて次式で算出した。

$$\varepsilon_{PB} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_t} \quad (3)$$

Table 5より、いずれの条件においても、充填層の空隙率は熱分解後に増加していることがわかる。これは、熱分解進行中に、バイオマス粒子中の細孔数が増大したものと考えられる。バイオマス粒子の真密度を一定と仮定すれば、増加した細孔数の体積は、バイオマス充填層内のガス体積に含まれることになる。本研究では、バイオマス細孔についての詳細には触れずに、バイオマス層充填層のガス体積、 V_G (cm³) とバイオ

a) $W_0 = 0.6$ g, Fast Pyrolysis, *Pseudotsuga menziesii*

c) $W_0 = 0.6$ g, Fast Pyrolysis, Bark

b) $W_0 = 9$ g, Slow Pyrolysis, *Pseudotsuga menziesii*

d) $W_0 = 9$ g, Slow Pyrolysis, Bark

Fig. 2 Comparison of the experimental solid yield with the predicted one by three different kinetic models

Table 5 Properties of packed bed of biomass before and after pyrolysis

Kind of biomass	T_s (K)	Before pyrolysis				After pyrolysis			
		W_B (g)	V_{PB} (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	ε_{PB} (-)	W_B (g)	V_{PB} (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	ε_{PB} (-)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	523	9	58.9	0.153	0.899	8.62	58.9	0.146	0.903
	573	9	58.9	0.153	0.899	7.31	55.0	0.133	0.912
	623	9	58.9	0.153	0.899	3.63	39.2	0.093	0.939
	673	9	58.9	0.153	0.899	3.63	36.8	0.098	0.935
	773	9	58.9	0.153	0.899	2.86	30.5	0.094	0.938
	873	9	58.9	0.153	0.899	2.52	25.7	0.098	0.935
	973	9	58.9	0.153	0.899	2.41	24.4	0.099	0.935
	1073	9	58.9	0.153	0.899	2.35	23.7	0.099	0.935
Wood bark	673	9	36.1	0.249	0.834	5.85	33.3	0.176	0.883
	723	9	36.1	0.249	0.834	5.39	31.8	0.170	0.887
	773	9	36.1	0.249	0.834	4.86	28.7	0.170	0.887
	873	9	36.1	0.249	0.834	4.59	28.4	0.162	0.892
	973	9	36.1	0.249	0.834	4.18	27.6	0.152	0.899
	1073	9	36.1	0.249	0.834	4.16	27.0	0.154	0.897

マスの固形分の体積, V_B (cm³) とを別々に算出し, バイオマス充填層体積, V_{PB} (cm³) を見積もることとした。バイオマス充填層体積は,

$$V_{PB} = V_G + V_B \quad (4)$$

で表せる。両辺を $V_{PB,0}$ で割ると,

$$\frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} = \frac{V_G}{V_{PB,0}} + \frac{V_B}{V_{PB,0}} \quad (5)$$

まず, ガス体積 V_G は, Table 5 中の ε_{PB} および V_{PB} (cm³) を用いて算出し, それを $V_{PB,0}$ で規格化した結果を Fig. 3 に示した。これより, ガス体積の温度依存性は,

For *Pseudotsuga menziesii*

$$\frac{V_G}{V_{PB,0}} = \begin{cases} 0.899 & (T_s \leq 532 \text{ K}) \\ 0.344 + 12.6 * \exp\left(-\frac{T_s}{171}\right) & (T_s \geq 532 \text{ K}) \end{cases}$$

For bark

$$\frac{V_G}{V_{PB,0}} = \begin{cases} 0.833 & (T_s \leq 665 \text{ K}) \\ 0.672 + 108 * \exp\left(-\frac{T_s}{102}\right) & (T_s \geq 665 \text{ K}) \end{cases} \quad (6)$$

のように近似できる。

一方, バイオマスの固形分質量, $[S_B]$ (g) は, バイオマスの固形分の体積, V_B (cm³) と真密度, ρ_t ($= 1.5 \text{ g/cm}^3$) を用いて次式で表される。

$$[S_B] = \rho_t V_B \quad (7)$$

熱分解中にバイオマス粒子の真密度が変化しなければ, バイオマスの固形分の体積と質量との関係は

$$\frac{V_B}{V_{B,0}} = \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} \quad (8)$$

となり, 熱分解反応による質量変化を用いてバイオマスの総体積を算出できる。ここで, $V_{B,0}$: 熱分解前のバイオマス総体積 (cm³), $[W_{B,0}]$: 熱分解前のバイオマス総質量 (g) である。(6), (8) 式を (5) 式に代入すると, バイオマス充填層体積は

For *Pseudotsuga menziesii*

$$\frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} = \begin{cases} \frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} + 0.899 & (T_s \leq 532 \text{ K}) \\ \frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} + 0.344 + 12.6 * \exp\left(-\frac{T_s}{171}\right) & (T_s \geq 532 \text{ K}) \end{cases}$$

For bark

$$\frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} = \begin{cases} \frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} + 0.833 & (T_s \leq 665 \text{ K}) \\ \frac{V_{PB}}{V_{PB,0}} \frac{[S_B]}{[W_{B,0}]} + 0.672 + 108 * \exp\left(-\frac{T_s}{102}\right) & (T_s \geq 665 \text{ K}) \end{cases} \quad (9)$$

で表される。解析は 4 次のルンゲクッタ法を用いて熱分解速度の時間積分を行い, バイオマス質量 $[S_B]$ をもとめた。さらに, この時刻におけるバイオマス充填層温度を T_s に代入することにより, (9) 式からバイオマス充填層体積を求めた。

Fig. 4 に低速熱分解の場合のバイオマス充填層体積の経時変化を示した。プロット点は実験結果であり, ラインは解析結果を示す。Fig. 4a は, 米松の場合であり, Model-1, Model-3 のいずれの場合でも, 実験結果を再現できることがわかった。また, Fig. 4b は, バークの場合であり, Model-3 を用いた解析によって実験結果を再現できることがわかった。従って, 本研究範囲における熱分解による減容過程は, 昇温速度やバイオマス中のリグニン量によらず, Model-3 と充填層内のガス体積の温度依存性を考慮することで再現可能であることが示された。

本研究で提案した減容モデルは, 同程度の粒子径の米松やバーク粒子を用いたとき, 粒子相体積とガス相体積は相対的に変化すると考えられるため, 充填層の大きさを変更した場

a) *Pseudotsuga menziesii*

b) Bark

Fig. 3 Dependence of estimated gas volume in the packed bed of the biomass particles on the setting temperature

a) *Pseudotsuga menziesii*

b) Bark

Fig. 4 Time course of the volume reduction process undergoing the pyrolysis

合にも応用可能である。

5. 結 論

木質バイオマスの熱分解における固形分収率について、3つの熱分解モデル(model-1:Thurnerらによるモデル、model-

2:Mohanらによるモデル、model-3:Millerらによるモデル)を用いて実験との比較を行った。その結果、バイオマス中のリグニン量や昇温速度によらず、model-3を用いた解析によって、実験結果を再現できることがわかった。さらに、減容過程と熱分解反応との関係を定式化することによって明らかにした。その結果、バイオマス充填層の体積は、model-3の反応モデルとバイオマス層充填層内のガス体積の温度依存性を考慮することで再現できることがわかった。

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。実験は、ウィディア ウィジャヤンティ氏、川中隆司氏、末富喬大氏、日名内竜也氏によって行われた。また、本研究を遂行するに当たり、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。

Nomenclature

$[AC]_{m3}$	Weight of activated cellulose in model-3	[g]
$[AH]_{m3}$	Weight of activated hemicellulose in model-3	[g]
$[AL]_{m3}$	Weight of activated lignin in model-3	[g]
$[C]_{m1}$	Weight of char in model-1	[g]
$[Cel]_{m3}$	Weight of cellulose in model-3	[g]
$[CelA]_{m2}$	Weight of cellulose A in model-2	[g]
$[Ceb]_{m2}$	Weight of cellulose B in model-2	[g]
$[Cc]_{m3}$	Weight of char formed by the decomposition of cellulose in model-3	[g]
$[CcA]_{m2}$	Weight of char formed by the decomposition of celluloseA in model-2	[g]
$[CcB]_{m2}$	Weight of char formed by the decomposition of celluloseB in model-2	[g]
$[Ch]_i$	Weight of char formed by the decomposition of hemicellulose in model-i	[g]
$[Cl]_i$	Weight of char formed by the decomposition of hemicellulose in model-i	[g]
$[H]_i$	Weight of hemicellulose in model-i	[g]
$[IS]_{m1}$	Weight of intermediate solid in model-1	[g]
$[L]_i$	Weight of lignin in model-i	[g]
$[S_b]$	Weight of solid component of biomass	[g]
V_G	Volume of gas in packed bed	[cm ³]
V_{PB}	Volume of packed bed	[cm ³]
$[W_B]_{m1}$	Weight of biomass in model-1	[g]
$[W_{B,0}]$	Initial weight of biomass	[g]

Greek symbol

ρ_{app}	Apparent density of packed bed of biomass	[g/cm ³]
ρ_t	True density of wood (= 1.5)	[g/cm ³]
ε_{PB}	Volume fraction of air in packed bed	[-]

文 献：References

- 1) 奥村幸彦, 日エネ誌, **90**(2), 122(2011) : Okumura, Y., *J. Jpn. Inst. Energy*, **90**(2), 122(2011)
 - 2) Koufopoulos, C. A., Papayannakos, N., Maschio, G., Lucchesi, A., *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 907(1991)
 - 3) Won, C. P., Arvind, A., Howard, R. B., *Combust. Flame*, **157**, 481(2010)
 - 4) Di Blasi, C., *Prog. Energy Comb. Sci.*, **34**, 47(2008)
 - 5) 田之上健一郎, ウィディア ウィジャヤンティ, 山崎慶, 川中隆司, 吉田篤史, 西村龍夫, 谷口美希, 笹内謙一, 日エネ誌, **89**(10), 948(2010) : Tanoue, K., Widya, W., Yamasaki, K., Kawanaka, T., Yoshida, A., Nishimura, T., Taniguchi, M., Sasauchi, K., *J. Jpn. Inst. Energy*, **89**(10), 948(2010)
 - 6) 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. and Sasauchi, K., *Energy and Resources*, **28-3**, 186(2007)
 - 7) Ayhan, D., *Fuel*, **76-5**, 431(1997)
 - 8) Thurner, F., Mann U., *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **20**, 482(1981)
 - 9) Di Blasi, C. and Branka, C., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40-23**, 5547(2001)
 - 10) Mohan, D., Pittman Jr., C. U., Steele, P. H., *Energy Fuels*, **20-3**, 848(2006)
 - 11) Miller, R. S., Bellan, J., *Combust. Sci. Technol.*, **126**, 97(1997)
 - 12) Varhegyi, G., Antal Jr., M.J., Szekely, T., Szabo, P., *Energy Fuels*, **3-3**, 329(1989)
 - 13) Capart, R., Khezami, L., Burnham, A. K., *Thermo. ACTA*, **417-1**, 79(2004)
 - 14) Chan, R. W. C., Krieger, B. B., *J. Appl. Poly. Sci.*, **26-5**, 1533(1981)
-