高密度バイオマスブリケット燃焼挙動へのブリケットサイズの影響

Influence of Briquette Size on Combustion Behavior of Highly Densified Biomass Briquette

伊東 弘行*

Hiroyuki ITO

(Received January 12, 2016)

To investigate the influence of briquette size on both flaming combustion and char combustion of highly densified biomass briquette, combustion experiments were carried out with the briquette made of cypress sawdust. In this study, three sizes of cylindrical briquette of which the ratio of height to diameter is kept at 2 ((1) 30 mm in diameter and 60 mm in height, (2) 35 mm in diameter and 70 mm in height and (3) 40 mm in diameter and 80 mm in height) were used as fuel samples. The density of the briquette and the moisture content are kept constant at 1300 kg/m³ and 10 wt%, respectively. A single briquette is inserted into the furnace to which preheated air (673K, 1.42 m/s) is supplied and the mass loss rate and each combustion duration were measured. As a result, in the flaming combustion duration, it is observed that the average mass loss rate ((dM/dt)_{mean}) of briquette per specific surface area (S/V, V: volume) is proportional to the surface area (S) of the briquette. In the briquette size used in the study, it is demonstrated by introducing Fourier number that the flaming combustion duration (t_f) is proportional to the square of an inverse number of the specific surface area (t_f ∝ (V/S)²). The normalized mass loss rate ((dM/M₀)/(dt/t_f)) in the normalized flaming combustion duration for all three briquette size can be expressed in a single curve. It is shown that the char combustion duration (t_c) is also proportional to the square of an inverse number of the specific surface area (t_c ∝ (V/S)²). For char combustion, shrinking-core reaction model was applied to the cylindrical briquette used in the study and the oxygen diffusion coefficients through both the gas boundary layer (K_c) and the ash layer (D_c) were determined by the experimental results. The oxygen diffusion coefficient through the ash layer (D_c) is lower than that reported for lower density one and this may be attributed to the lower porosity of the highly densified briquette in this study. It is successfully demonstrated that the unburnt fraction in the normalized char combustion duration can be expressed by the model.

Key Words: Biomass Briquette, Combustion, High Density, Size

1. 緒言

近年、化石燃料の大量消費による資源の枯渇や地球温暖化が問題になっている。とくに地球温暖化は、2015年11月30日からフランス・パリで開催された第21回締約国会議(COP21)にて対策について協議される¹⁾など、地球規模で関心を集めている。現在の地球温暖化の主要因とされる温室効果ガスの中でも、二酸化炭素は主に化石燃料の燃焼由来であることから、二酸化炭素排出量を削減できる代替エネルギーが注目されている。エネルギー資源としてのバイオマスの利用はそれら代替エネルギー、いわゆる新エネルギーのひとつに位置づけられている²⁾。植物由来のバイオマスは、植物が大気中から吸収する二酸化炭素量と、その植物を燃焼した際に放出される二酸化炭素量を均衡させる、すなわち大気中の二酸化炭素量を人為的活動によって増大させないというカーボンニュートラルの概念から二酸化炭素排出削減が期待され、様々な形態での利用が検討さ

れている³⁻⁵⁾。バイオマスは固体で存在するものが多く、バイオマスを固体で利用することは、燃料の創出に大きな付加的能量を要しないという点で有利である。とくに固体バイオマスを粉砕の後にペレットやブリケットなどに圧密化することで、エネルギー密度を大きく出来るため貯蔵や輸送に有利、燃料の均質化を図れるため燃焼制御が容易になる、などのメリットがある。バイオマスブリケット製造時に圧縮しながら加熱することで、密度および機械的強度をさらに増大させた高密度バイオマスブリケット(バイオコックス:BIC)が開発されている⁶⁾。バイオコックスは鉄溶解炉の石炭コックス代替燃料として開発されたものであるが、高強度で崩れにくい、長期安定性がある⁷⁾、高エネルギー密度であるため貯蔵しやすく燃料投入頻度を少なく出来るなどの特長から、暖房用など他の燃焼機器への使用にもメリットがあると考えられる。バイオマスブリケットを燃焼利用する上で、その燃焼特性を理解することは効率の良い最適な燃焼機器の設計という観点から非常に

* 神奈川大学 工学部 機械工学科 (〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋3-27-1)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa University
(3-27-1 Rokkakubashi Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 221-8686 Japan)

重要であるが、燃料製造・燃料強度評価等の観点から多くの研究が行われている⁸⁻¹⁰⁾ 一方、ペレットやブリケットなどの燃焼研究は比較的少ないのが現状である。とくにブリケット製造時に、圧縮と同時に 423 K 程度に加熱する高密度ブリケットについては、燃焼挙動への空気流量の影響¹¹⁾、ブリケットの一端から 1 次元的に燃焼させる研究¹²⁾、蚊取り線香を原料として密度の影響を調べた研究⁷⁾ などが見られるが、暖房用などの燃焼機器での利用を想定した研究は数少ない。

本研究では、ヒノキおがくずを原材料とし、ブリケット製造時に圧縮とともに加熱を行った高密度バイオマスブリケットの有炎燃焼（気相燃焼）、チャー燃焼時それぞれの燃焼挙動（質量減少および燃焼継続時間）へのブリケットサイズの影響を調べることを目的とした。有炎燃焼では、従来の多くの研究¹³⁻¹⁴⁾ において有炎燃焼時の平均質量減少速度を調べているが、同燃焼区間の質量減少速度を注意深く観察すると、質量減少速度は一定ではなく時間変動していることがわかる。燃焼速度（質量減少速度）の時間的変動は、ブリケット燃焼時の発熱速度変動を意味し、ブリケットの燃焼挙動を詳細に捉えるためには、質量減少速度の時間変化を明らかにする必要がある。本研究では、とくに有炎燃焼区間、チャー燃焼区間それぞれにおける質量減少速度の時間変化を調べ、これらに対するブリケットサイズの影響を調べた。

2. 実験試料

バイオマス原料には、鳥根県産ヒノキのおがくずを使用した。おがくずを粉碎機（シニオン株式会社：HS-10）で 30 秒間粉碎し、バイオマスペレット水分計（佐藤商事：B1）を用いて初期水分を調整した後に円筒形状のブリケット製造モールドに充填する。油圧プレスにて所定の圧力まで圧縮し、圧力を一定に保持したまま管状電気炉でモールドを覆い、423 K で 15 分間加熱する。その後室温になるまで冷却した後にブリケットをモールドから取り出した。本研究では、密度 1300 kg/m³ 程度および水分率 10 % 程度に調整し、ブリケット寸法を、直径：長さ比を一定とし $\phi 30$ mm $\times$ 60 mm、 $\phi 35$ mm $\times$ 70 mm、 $\phi 40$ mm $\times$ 80 mm の 3 種類とした。各ブリケット寸法で 3 個ずつ試料を用意し、燃焼実験を行った。

ヒノキおがくずの元素分析および工業分析結果を Table 1 および Table 2 にそれぞれ示す。奥村らの結果（揮発分 78.7 %、固定炭素 13.2 %、灰分 0.2 %）¹⁵⁾ と比べると、固定炭素および灰分がわずかに少ないが、揮発分が 80 % 程度、固定炭素分が 10 % 程度でありほぼ同様であることがわかる。

3. 燃焼実験装置

本研究では、バイオマスブリケット単体を、昇温した空气中で着火・燃焼させることが出来る燃焼実験装置を用い

Table 1 Ultimate analysis of cypress sawdust.

C [wt%]	50.55
H [wt%]	6.32
N [wt%]	0.07
O [wt%]	33.62

Table 2 Proximate analysis of cypress sawdust.

Water content [wt%]	6.3
Volatile constituent [wt%]	80.5
Fixed carbon [wt%]	10.0
Ash content [wt%]	3.2

Fig.1 Experimental Setup.

た。Fig.1 に実験装置概略を示す。燃焼炉本体は、内径 105 mm $\times$ 外径 120 mm（長さ 420 mm）のムライト管を内筒とし、外径 216.3 mm（内径 208.3 mm）のステンレス管を外筒とする構造とし、内外筒の間に断熱材を充填した。ブロワから供給される燃焼用空気は流量を測定して電気ヒータにて加熱された後、燃焼炉下方から供給される。燃焼炉下方には直径 10 mm のセラミックボールを充填し、燃焼炉内への供給空気を整流した。本研究では、空気流量 0.3 m³/min、空気温度 673 K 一定とした（炉内平均空気流速 1.42 m/s）。高温空気供給後、整流用セラミックボール下流の空気温度が 673 K にて安定を確認後、上部が開放されたかご状の金網（ $\phi 35$ mm $\times$ 50 mm（ $\phi 30$ mm ブリケット）、 $\phi 40$ mm $\times$ 60 mm（ $\phi 35$ mm ブリケット）、 $\phi 45$ mm $\times$ 70 mm（ $\phi 40$ mm ブリケット）、5 メッシュ、線径 0.75 mm）に載せたブリケットを炉内に挿入した。ブリケットを載せた金網を天

秤の一方に吊るし、他方に錘を吊るして電子天秤（島津：UW4200H、最小表示 0.01 g、サンプリング間隔 1 sec）に載せることで、ブリケットの質量減少を測定した。ブリケットは炉内へ投入後、高温空気により加熱され表面着火および熱分解ガスの放出を開始するが、熱分解ガス放出後すぐに有炎燃焼させるため、ニクロム線を通電加熱した強制着火装置を用いた。着火装置は熱分解ガスに着火後、速やかにブリケット近傍から退避させた。燃焼挙動の直接映像をDVカメラで、ブリケットの表面温度をIRカメラで監視、撮影した。 $\phi 30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、 $\phi 40\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ の2種類のブリケットについて、有炎燃焼時の内部温度変化を調べるため、それぞれ3本のK型シース熱電対（外径 1 mm）にて各ブリケット軸方向中央位置の温度を計測した。熱電対はブリケット上部より挿入し、温度測定位置は、①ブリケット中心 ($r = 0\text{ mm}$)、② $r = 6\text{ mm}$ ($\phi 30\text{ mm}$)、 8.5 mm ($\phi 40\text{ mm}$)、③ $r = 12\text{ mm}$ ($\phi 30\text{ mm}$)、 17 mm ($\phi 40\text{ mm}$)の3点とした。

4. 全体燃焼挙動へのブリケットサイズの影響

$\phi 30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、 $\phi 35\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 、 $\phi 40\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ の3種類のブリケットをそれぞれ単体で燃焼炉に投入し、着火から燃え切りまでの燃焼挙動を観察した。全てのブリケットで、まず炎を伴わない表面着火が見られ、その後気相着火して有炎燃焼するのが観察された。有炎燃焼が終了後、チャー燃焼へ移行した。Fig.2に、各ブリケットサイズにおける炉内投入時からの経過時間とブリケット質量減少量の関係を示す。全てのブリケットにおいて最初に見られる傾きの大きな質量減少は気相燃焼区間（ $\phi 30\text{ mm}$ では45 g程度まで、 $\phi 35\text{ mm}$ では70 g程度まで、 $\phi 40$ では100 g程度まで）であり、その後の緩やかな傾きの質量減少はチャー

燃焼区間を表している。ブリケットサイズが大きいほど総質量が大きいので質量減少量が大きく、総燃焼時間も長いことがわかる。それぞれのブリケットサイズにおけるバラつきを比較すると、着火時間などに若干の個体差が見られるものの概ね同様の挙動を示していることがわかる。

ブリケット質量減少速度の時間変化を調べるため、Fig.2の質量減少の傾きから各時間における質量減少速度を算出した。各ブリケットサイズにおける炉内投入時からの経過時間に対する質量減少速度をFig.3に示す。計算には質量減少量の60点移動平均を用いた。図より、ブリケットサイズの大きい方が、質量減少速度が大きくなるのがわかる。とくに有炎燃焼時（ $\phi 30\text{ mm}$ では14 min程度まで、 $\phi 35\text{ mm}$ では18 min程度まで、 $\phi 40\text{ mm}$ では22 min程度まで）の質量減少速度に大きな違いが見られる。

5. 有炎燃焼時の燃焼挙動

5.1 有炎燃焼時の質量減少速度

有炎燃焼時の平均質量減少速度を算出するため、O. C. Chin¹³⁾やJ. Chaney¹⁴⁾の研究と同様、Fig.2のグラフの傾きを調べた。有炎燃焼時の質量減少は、主にブリケットが加熱されることによる揮発分の放出であると考えられる。従って、ブリケットの加熱条件（火炎温度や火炎のブリケット表面からの距離、周囲ガス流速など）に大きな違いがなければ、ブリケットへの入熱、ひいてはブリケットの平均質量減少速度が加熱面であるブリケット表面積に比例すると予想される。本研究で使用したブリケットはそれぞれ比表面積が異なるため、それぞれの比表面積で除すことで単位比表面積あたりの平均質量減少速度を求め、表面積との関係をFig.4として示した。 $(dM/dt)_{\text{mean}}$ は有炎燃焼時の平均質量減少速度 [g/min]、 S はブリケット表面積 [m²]、 V はブリケット体積 [m³]を表す。Fig.4より、単位比表面積あ

Fig.2 Mass Loss Behavior of Each Briquette.

Fig.3 Mass Loss Rate.

Fig.4 Relationship between Mass Loss Rate for Specific Surface Area and Briquette Surface Area.

Fig.5 Flaming Combustion Duration.

たりの平均質量減少速度は、本研究の範囲では表面積に比例することがわかる。またこのことは、ブリケット周囲に形成される火炎の状態がブリケットサイズに大きく依存しないことを示唆している。

5.2 有炎燃焼継続時間

上述したように、有炎燃焼では質量減少がブリケットへの入熱により支配されると考えられる。本研究のようにブリケット外面から加熱され、かつ着火源がブリケット周囲に存在する場合、有炎燃焼の開始時期は、ブリケット表面側での熱分解により放出される揮発分が周囲空気と混合して可燃混合気を形成するまでの時間で決定される。一方、有炎燃焼の終了時期は、ブリケット中心部からの揮発分の放出が終了し可燃混合気を形成できなくなる時間で決定される。すなわち有炎燃焼の継続時間は、ブリケット表面が熱分解温度に加熱された後にブリケットの中心部が熱分解終了温度に達するまで加熱されるのに要す時間により決定される。本研究のように、同じ物質かつ密度がほぼ同様で大きさの異なるブリケットの中心部を同じ温度まで加熱するのに要する時間は、以下に示すフーリエ数： F_0 を同じとして考えることができる¹⁶⁾。

$$F_0 = \frac{\alpha_s t}{L^2} \quad \cdots (1)$$

ここで、 α_s ：温度伝導率 [m^2/s]、 t ：時間 [s]、 L ：代表寸法 [m]である。本研究で利用したブリケットにおいて、代表寸法： $L = V/S$ と考えると、また密度がほぼ同様であることから温度伝導率： α_s 一定の場合には、有炎燃焼継続時間： t_f は、

$$t_f \propto \left(\frac{V}{S}\right)^2 \quad \cdots (2)$$

と考えることができ、 $(V/S)^2$ に比例すると予想される。本

Fig.6 Normalized Temperature Distribution.

研究で得られたそれぞれのブリケットサイズにおける有炎燃焼時間を $(V/S)^2$ に対してプロットした結果を Fig.5 に示す。本研究の範囲では有炎燃焼時間は $(V/S)^2$ にほぼ比例しており、この結果からも有炎燃焼がブリケット内部の熱移動に支配されていることが窺える。

ブリケットサイズによらずフーリエ数が一定になることは、ブリケット内部の無次元温度分布が同様になることを示唆している。本研究では、ブリケット内部温度分布を確認するため、ブリケットに熱電対を挿入して内部温度を測定した。 $\phi 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ブリケットと $\phi 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ブリケットの各測定点における無次元時間（経過時間を有炎燃焼時間で除す）が 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 のときの無次元半径位置における温度を Fig.6 に示す。横軸の無次元半径の 0 がブリケット中心、1 がブリケット外周面を表す。Fig.6 よ

Fig.7 Normalized Mass Loss Rate of Briquette in Flaming Combustion.

り、無次元温度分布は小さいブリケット ($\phi 30 \text{ mm}$) の方がブリケット外周側で大きくなる傾向が見られるが、ブリケット中心側の無次元内部温度分布はほぼ同様であることがわかる。実際のブリケット内部の温度分布は完全に相似ではないが、この中心側の無次元温度分布がブリケットサイズによらずほぼ同様であることが、フーリエ数を同じとして有炎燃焼継続時間を扱える効果をもたらししていると考えられる。

5.3 有炎燃焼時の無次元質量減少速度

Fig.3 に示したように、有炎燃焼時の質量減少速度は一定ではなく、時間とともに大きく変化する。従って、従来の研究¹³⁻¹⁴⁾のように、有炎燃焼時の平均質量減少速度の情報のみでは不十分である。ブリケットの燃焼速度、ひいては発熱速度を予測するためには、燃焼経過時間に対するブリケット質量減少速度を詳細に把握する必要がある。サイズの異なるブリケットについて、初期ブリケット質量で質量減少速度を無次元化した無次元質量減少速度を縦軸に、有炎燃焼時間で経過時間を無次元化した無次元時間を横軸にとりプロットしたものを Fig.7 に示す。図より、無次元質量減少速度は、ブリケットサイズによらずほぼ同様であり、1つの曲線で表せることがわかる。従って、本研究で用いたような直径対長さ比の高密度ブリケット ($\phi 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \sim \phi 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) を同様の条件で燃焼する際には、Fig.5 の関係から有炎燃焼継続時間を、Fig.7 の関係から有炎燃焼時の質量減少速度を予測することが出来る。

6. チャー燃焼時の燃焼挙動

6.1 チャー燃焼継続時間

有炎燃焼終了後のチャー燃焼では、有炎燃焼とは異なり、周囲空気からブリケット内部への酸素の拡散が燃焼速度に対し支配的となる¹⁷⁾。密度: $\rho [\text{kg/m}^3]$ 、体積: $V [\text{m}^3]$ のブリケットを時間: $t_c [\text{s}]$ で燃焼する速度はブリケット内部への供給

Fig.8 Char Combustion Duration.

酸素流束: $\dot{m} [\text{kg/s}]$ に比例する。物質移動における質量流束は熱移動における熱流束と同様の式¹⁶⁾で表され、

$$\dot{m} = D \frac{\partial \rho}{\partial x} S \quad \cdots (3)$$

となるが、ブリケット密度が一定 (1300 kg/m^3) であることから拡散係数: $D [\text{m}^2/\text{s}]$ を一定と仮定すると、ブリケット内燃焼部へ供給される酸素の質量流束はブリケット表面から燃焼部までの距離: $x [\text{m}]$ に反比例するので、

$$\dot{m} \propto \frac{S}{x} \quad \cdots (4)$$

と表すことが出来、さらに $x \equiv \frac{V}{S}$ とすれば、チャー燃焼継続時間: $t_c [\text{s}]$ は、

$$t_c \propto \frac{V}{\dot{m}} \propto \left(\frac{V}{S}\right)^2 \quad \cdots (5)$$

と表すことができ、有炎燃焼継続時間と同様、 $(V/S)^2$ に比例すると予想される。本研究で得られたそれぞれのブリケットサイズにおけるチャー燃焼時間を $(V/S)^2$ に対してプロットした結果を Fig.8 に示す。Fig.8 より、データのバラつきが若干大きいですが、本研究の範囲内では概ねチャー燃焼継続時間は $(V/S)^2$ に比例することがわかる。チャー燃焼では、燃焼が進行する過程で時折燃焼終了後の灰が剥がれ落ちる、また部分的に亀裂が入る、などの挙動が見られた。これらのことがブリケット未燃部への酸素供給状態を変え、チャー燃焼時のそれぞれのブリケットの個体差となりデータにバラつきを生じる要因になっていると考えられる。

6.2 未反応核モデルを用いた検討

チャー燃焼における質量減少について未反応核モデル¹⁷⁾

Fig.9 Shrinking Core Model.

の適用を検討した。本研究で使したブリケットは円柱形状であるため、J. Porteiro ら¹⁸⁾が円柱木材の燃焼モデルに用いたモデルと同様に Fig.9 に示すように燃焼面が進行すると仮定した。すなわち燃焼面の進行は円柱側面への速度で進行し、両端部（円形端面）でも円柱側面と同じ速度で進行するものとした。

半径：R [m]、長さ：L [m] の円柱試料について、ガス境界膜における酸素の移動係数：Kc および灰層中における酸素の有効拡散係数：Dc を考慮すると、チャー燃焼の反応時間：t は以下の式で表すことが出来る。

$$t = \frac{C_B}{LC_0} \left[\left(1 - \frac{r_c^2}{R^2} \right) \left[\frac{(L-2R)R}{2K_c} + \frac{R^2}{2D_c} \left\{ \frac{L-2R}{2} + (L-2R) \ln R \right\} \right] + \left(1 - \frac{r_c^3}{R^3} \right) \left\{ \frac{R^2}{K_c} + \frac{R^3}{D_c} \left(\ln R + \frac{1}{3} \right) \right\} - \frac{R^2}{2D_c} \left\{ (L-2R) \frac{r_c^2}{R^2} + 2R \frac{r_c^3}{R^3} \right\} \ln r_c \right] \quad \cdots(6)$$

ここで、 C_B はブリケットのモル濃度、 C_0 は雰囲気中の酸素モル濃度、 r_c は未反応核の半径である。ブリケットからチャー燃焼へ移行するときの粒子半径は変化しないと仮定し、 C_B [mol/m³] は工業分析結果から 10 % の固定炭素分が全て炭素で構成されるとした。また、 C_0 [mol/m³] は、雰囲気中の酸素分圧 p [Pa]、周囲空気温度 T [K] を用いて、以下の値を用いた。

$$C_0 = \frac{p}{TR_0} = \frac{0.21 \times 1.01325 \times 10^5}{673 \times 0.082 \times 1.01325 \times 10^2} = 3.81 \text{ [mol/m}^3\text{]}$$

$$[R_0 = 0.082 \times 1.01325 \times 10^2 \text{ [} \frac{J}{\text{mol} \cdot K} \text{]}] \quad \cdots(7)$$

実験で得られたブリケット直径 $\phi 30$ mm、 $\phi 35$ mm、 $\phi 40$ mm におけるチャー燃焼継続時間をそれぞれで (6) 式に代入

Fig.10 Unburnt Fraction of Briquette in Char Combustion.

して得られる 3 つの式の未知数 Kc および Dc を、実験結果との差異が最小になるよう決定した。また、(6) 式の r_c をブリケット未反応率 M_{UF} から (8) 式の関係より与え、チャー燃焼時の無次元質量減少を算出して Fig.10 に実験結果とあわせて示す。

$$M_{UF} = \frac{\pi r_c^2 \{L - 2(R - r_c)\}}{\pi R^2 L} \quad \cdots (8)$$

本研究（密度 1300 kg/m³、製造時 423 K 加熱）では、

$$Dc = 7.5 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \cdots (9)$$

$$Kc = 2.6 \times 10^{-2} \text{ [m/s]} \quad \cdots (10)$$

と見積られた。この結果は、呂ら¹⁷⁾の 1000 [kg/m³] のバイオマスブリケット（製造時非加熱）の結果 ($Dc = 1.48 \times 10^{-4}$ [m²/s]、 $Kc = 3.0 \times 10^{-2}$ [m/s]) と比較すると、灰層内の酸素の有効拡散係数 Dc が小さいことがわかる。製造時加熱の影響は明らかではないが、本研究で使したブリケットの方が密度が大きいためチャー燃焼時のブリケット内空隙も小さく、結果として拡散係数が小さくなったものと考えられる。Fig.10 において実験結果と計算結果の一致は良く、本研究で用いたモデルで比較的良くチャー燃焼の挙動を表すことが可能であることを示している。

7. 結 言

ブリケット製造時に圧縮とともに加熱を行った、密度および水分率一定かつ直径：長さ比一定の高密度ブリケット ($\phi 30$ mm $\times$ 60 mm $\sim$ $\phi 40$ mm $\times$ 80 mm) の有炎燃焼およびチャー燃焼挙動へのブリケットサイズの影響を調べ、以下のことがわかった。

(1) 有炎燃焼継続時間は、比表面積の二乗に反比例する。

- (2) 有炎燃焼継続時間で時間を無次元化した有炎燃焼期間の無次元質量減少速度はブリケットサイズによらずほぼ同様の履歴を示す。
- (3) チャー燃焼継続時間も、概ね比表面積の二乗に反比例する。
- (4) チャー燃焼時の質量減少は、円柱を考慮した未反応核モデルで比較的良く表現できる。本研究では、灰層内の酸素の有効拡散係数 $D_c = 7.5 \times 10^{-5} \text{ [m}^2/\text{s]}$ 、ガス境膜における酸素の有効拡散係数 $K_c = 2.6 \times 10^{-2} \text{ [m/s]}$ と見積もられた。

謝 辞

本研究は、平成 26 年度文部科学省科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)(基盤研究(C))、#26420160)の支援で行われた、ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 環境省 HP <http://www.env.go.jp/press/101818.html>
- 2) 日本エネルギー学会編、バイオマスハンドブック (第2版)、オーム社、2.
- 3) I.Adánez-Rubio, A.Abad, P.Gayán, L.F.de Diego, F.García-Labiano and J.Adánez: Fuel Processing Technology **124** (2014) 104-114.
- 4) S. Czernik and A.V.Bridgwater: Energy&Fuels **18** (2004) 590-598.
- 5) 奥村幸彦、岡崎健：日本機械学会論文集 (B 編) **73**-731 (2007) 1434-1441.
- 6) 川見佳正、桑名一徳、井田民男、水野諭、森田明宏：高温学会誌、**35**-2 (2009) 97-101.
- 7) 井田民男：日本燃焼学会誌、57-181 (2015) 214-221.
- 8) S.H.Sengar, A.G.Mohod, Y.P.Khandetod, S.S.Patil and A.D.Chendake: International Journal of Energy Engineering **2**(1) (2012) 28-34.
- 9) K.B.Deepak and N.A.Jnanesh: International Journal of Science and Research (Online) 2319-7064.
- 10) S.J.Mitchual, K.Frimpong-Mensah and N.A.Darkwa: Journal of Sustainable Bioenergy Systems **4** (2014)50-60.
- 11) H.Ito, Y.Sakai, T.Ida, Y.Nakamura and O.Fujita: Journal of Thermal Science and Technology **6**-1 (2011) 111-122.
- 12) T.Nakahara, H. Yan, H. Ito and O. Fujita: Proceedings of the Combustion Institute, **35**-2 (2015) 2415-2422.
- 13) O.C.Chin and K.M.Siddiqui: Biomass and Bioenergy **18** (2000) 223-228.
- 14) J.Chaney: Thesis for degree of doctor of Philosophy, The University of Nottingham, French (2010) 1-225.
- 15) 奥村幸彦、渡部弘達、岡崎健：日本機械学会論文集 (B 編) **79**-799 (2013-3) 465-476.
- 16) 小川邦康：見える伝熱工学 (初版第2刷)、コロナ社 (2013) 31-33, 175-184.
- 17) 呂国慶、外山哲也、金熙濬、成瀬一郎、大竹一友：化学工学論文集、**23**-3 (1997) 404-412.
- 18) J.Porteiro, J.L.Míguez, E.Granada and J.C.Moran: Fuel Processing Technology **87** (2006) 169-175.