

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 8 月 27 日現在

機関番号：57101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580352

研究課題名(和文) 農作物生産用温室における積層化した木質バイオマス燃焼炉の開発と燃焼性能

研究課題名(英文) Development and combustion performance of a laminated woody biomass combustion furnace in greenhouse agricultural products production

研究代表者

川原 秀夫 (KAWAHARA, HIDEO)

久留米工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：80300622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、薄板状木質バイオマス燃料の燃焼プロセスと高効率燃焼炉の開発に主眼を置く。本研究により、木質バイオマス燃焼界面は、燃料の不均一性が界面付近の熱輸送に大きな影響を与えており、さらに燃焼室内の浮力は酸素の進行方向に影響を与え、燃焼が促進または抑制されることがわかった。この結果は、園芸農業のバイオマス燃焼による省エネルギー化、発電設備を含めたコージェネレーションシステムの発展に大きく貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study has focused on the development of high-efficiency combustion furnace and combustion process of a thin plate-like woody biomass fuel. The results of this study, woody biomass combustion interface, has a great influence on heat transport near the interface is non-uniformity of the fuel. In addition, the buoyancy of the combustion chamber, was found to affect the direction of travel of the oxygen, it is suppressed combustion or promotion. These results, we think the ones that can contribute greatly to the development of co-generation systems, including power generation equipment and energy saving, due to biomass burning.

研究分野：農業

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：自然エネルギー利用 バイオマス 燃焼

1. 研究開始当初の背景

温室内の作物は、閉鎖空間で光合成が行われるために二酸化炭素の極端な不足状態に陥る場合がある。特に、大気の数倍程度の高二酸化炭素ガス濃度環境で栽培生産することにより収量が大きく増える作物がある。このため、作物の生育補償や生育促進のために二酸化炭素ガスを肥料として供給する栽培技術が存在し、近代的な園芸農業では欠くことができない。このような技術は、我が国のように限られた土地で良質の作物を効果的に生産するために不可欠なものになっている。二酸化炭素ガス源としては、石油系燃料を使用する加温用燃焼熱源や専用発生機からの燃焼排ガスを利用する方式が、液化二酸化炭素を充填容器から気化放出する方式よりも経済性に優れているために広く普及している。しかし、最近ではエネルギー・環境的側面を考慮することが強く求められている。

一般的に木質バイオマス燃料等を含む固体燃料の燃焼は、液体燃料の燃焼と共に不均一性が強く、さらに燃料と酸化剤とで初期の物理的状態が異なるため、固相と気相との界面で生ずる蒸発、熱分解、表面化学反応といった不均一過程が全燃焼過程のうちで重要な役割を果たしている。従来から、固体燃料の燃焼特性の評価には、固体燃料の熱分解プロセスを明らかにするため、昇温速度と重量を計測する熱重量分析や、燃焼現象をマクロで捉える充填層内における燃焼観察が行われている。しかし、これらの分析では、燃料の一部分しか捉えることができないため、特に燃料の不均一性が強い場合の燃焼では、燃焼効率の低下といった弊害が生じてくる。このような背景から、材料の不均一性が燃焼形態に与える影響を捉えるため、新たな実験装置の開発が必要である。申請者は、これまで固体燃料として、均一性である紙を用いて自然対流の影響を考慮に入れた環境下での薄板状木質バイオマス燃料の二次元的な燃焼形態について検討を行っており、酸素量および燃料である紙が燃焼する空間容積の変化によって、燃焼界面が様々なパターンを形成することを特定した。

2. 研究の目的

本研究は、薄板状木質バイオマス燃料の燃焼プロセスと高効率燃焼炉の開発に主眼を置く。木質バイオマス園芸農業への適用を選択する場合、燃焼利用（直接燃焼、混焼、固形燃料化等）が有望視されている。申請者はこれまで、薄板状木質バイオマス燃料を用いた燃焼実験から、燃焼界面が進行する方向と対抗する酸素ガス流量を変化させることにより、様々な燃焼界面が出現することを明

らかにした。本研究内容は、燃焼効率の高い燃焼炉設計において重要な指針を与えるものであり、園芸農業へのバイオマス燃焼による省エネルギー化、エネルギー変換である発電設備を含めたコージェネレーションシステムの発展に大きく貢献できるものと考えらる。

3. 研究の方法

図1は、本研究で使用した燃焼装置を示す。本実験装置は、上下方向の幅が狭い矩形断面容器を利用しており、燃焼現象は上方の耐熱ガラス(1)を通して直接観察することが可能である。燃料の着火には、可燃物を塗布した直径 $\phi 0.5\text{mm}$ のタングステン線(5)を通電加熱して行う。主要な実験変数は、酸素ガス流速 V_{O_2} と上下2枚の板の間隔 h (2)、さらに燃焼装置本体の傾斜角度 θ である。酸素ガスはポンプより流量計を介して、ディフューザ(11)から噴出し、火炎が伝播する方向に対抗して水平一様流として送り込まれる。燃焼現象の観察には、デジタルビデオカメラを用い、燃焼界面の挙動を詳細に記録し、パソコンで画像解析を行った。また熱輸送については、局所的な温度変化を捉えるために細線熱電対（白金-ロジウム白金、直径 $\phi 50\mu\text{m}$ ）を用いて

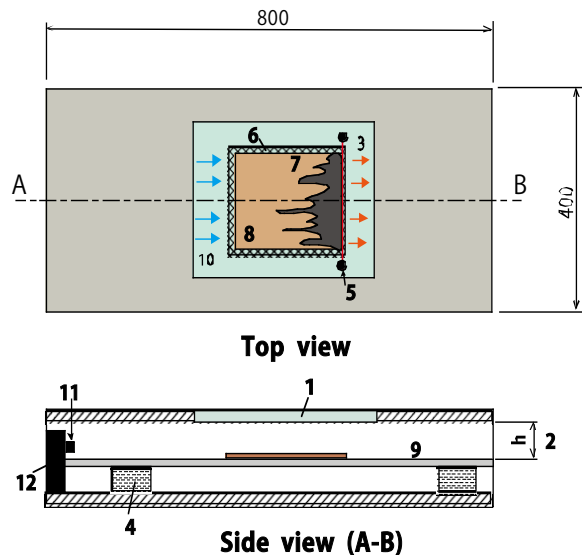


Fig.1 Experimental apparatus

詳細な温度分布の計測を行った。また燃焼中におけるガス濃度の変化は、ガスクロマトグラフィを用いて計測した。今回実験で使用した燃料は、アカマツの薄板

($t=0.1\text{mm}$, $12\times 12\text{cm}^2$)である。なお、表1は薄板の成分分析を示す。

Table.1 Analysis of component of biomaterial sheet

	成分	比率 (%)
工業分析	水分	3.4
	灰分	0.3
	揮発分	84.8
	固定炭素	11.4
元素分析	灰分	0.3
	炭素分	50.2
	水素分	6.1
	酸素分	43.4
	窒素分	0.05

4. 研究成果

まず、薄板状木質バイオマス燃料の不均一性（木目の存在）が燃焼形態にどのような影響を与えるかについて検討した。薄板表面に見られる木目の方向を考慮し、酸素ガスの流れに対して木目が平行になる場合と木目が垂直になる場合における燃焼パターンを比較した。図2は酸素ガス流速 $V_{O_2}=8.6\text{mm/s}$ における燃焼界面の時間変化を示す。図2 (a)の平行の場合は加熱源に触れた部分から燃焼界面が不安定になり、燃焼界面付近からフィンガリング状態になり、その凸状の部分からの枝分かれの数は少なく、かつ枝の幅は細くなり枝の凸部先端に多くの輝炎が確認できる。一方、図2 (b)の垂直の場合は平行の場合に比べ、加熱源に触れた部分から派生する枝の数は少ないが枝は太く、その枝からの枝分かれの数は多いことが確認できる。また、燃料着火後から燃焼界面が燃料終端部までに到達する時間を比較すると、木目が垂直な場合は平行な場合に比べて約3倍程度遅くなっている。

図2の結果より、燃焼界面の状態は燃料の不均一性に強く影響することが確認できた。一方で薄板状木質バイオマスの場合、燃焼界面が下流部に進行するにつれて、未燃焼部分が引っ張られてしわ状になり、その部分を通過する酸素ガスの流れに乱れが発生し、その影響が燃焼界面にも影響を与えている可能性が考えられる。そこで我々は、酸素ガスの流れに対流効果を付加した影響について検討するため、実験装置を傾斜させた場合（燃焼界面が進行する方向に対して傾斜させた状態）の燃焼界面パターンについて検討を行った。なお、この実験では燃料の不均一性の影響を取り除くため均一であるコピー用紙を用いて実験を行った。

図3(a)の $\theta=0^\circ$ では、着火開始直後から燃焼

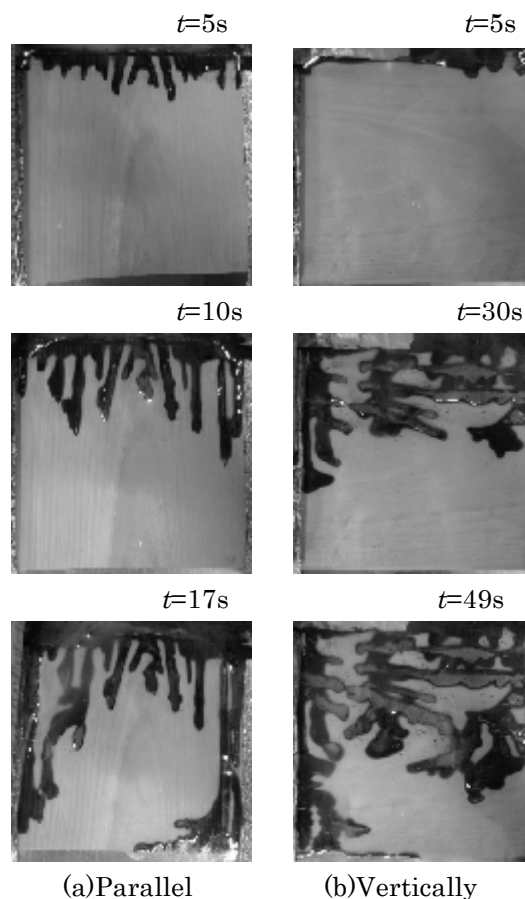


Fig.2 Combustion interface of a thin sheet woody biomass

界面が不安定になり、界面の複数の凸状の部分から界面が上流部に進行し、進行の途中で枝分かれをするフィンガリング状態になっている。一方図4(b)の $\theta=15^\circ$ では、水平状態より酸素流速が大きいのが着火後に燃焼海面の後燃焼海面は進行せず、燃料端部から20mm付近で燃焼が停止している。逆に図4(c) $\theta=-15^\circ$ では水平状態より酸素流速が小さいがわずかにフィンガリング状態が確認され、燃焼範囲が広く燃焼速度が速くなった。図4(d)の $\theta=30^\circ$ は図4(b)よりさらに傾斜をつけ、酸素流速を2倍にしているが図4(b)と同様の現象が起きている。図4(e)の $\theta=-30^\circ$ では図4(c)よりさらに傾斜をつけた状態で、図4(c)より燃焼範囲が広く燃焼速度が速くなった。

我々は当初、燃焼界面が進行する方向に上向きに傾斜させると、燃焼が進行する方向に浮力が発生するため、燃焼が促進する効果を期待したが、逆に燃焼海面が進行する方向に下向きに傾斜させると燃焼が促進した。これは $\theta=15,30^\circ$ の場合は上流から流れてくる酸素ガスの流れてくる方向と逆行する方向に浮力が働くため、 $\theta=-15,-30^\circ$ の場合は下流から流れてくる酸素ガスの流れてくる方向と順行する方向に浮力が働くためであると

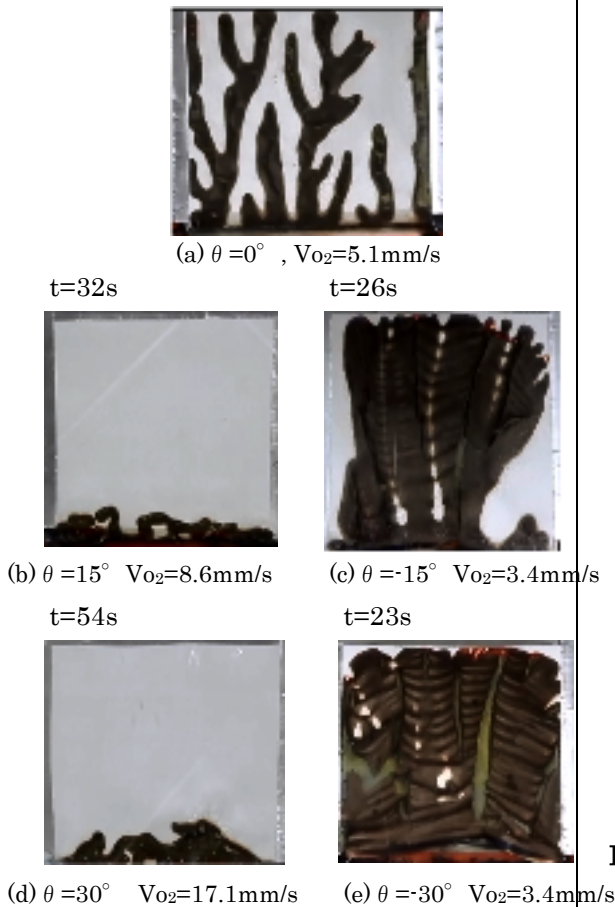
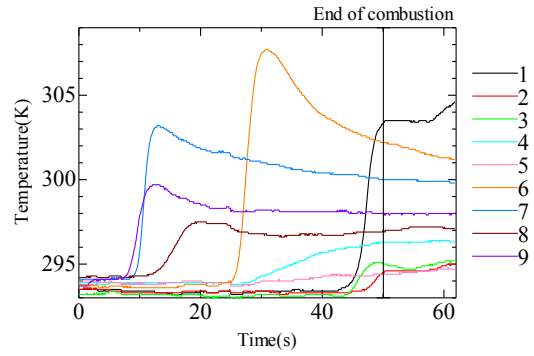


Fig.3 Combustion interface pattern of paper by inclination of experimental apparatus

考えられる。

次に燃焼界面近傍の熱輸送について検討した。図4は $\theta = 0^\circ$ 、 $V_{O_2} = 6.8 \text{ mm/s}$ 時の燃焼界面の温度変化を示す。なお、温度計測を行う熱電対の位置は燃料試料下部の底板に等間隔に9点接地し、熱電対先端部は底板表面から1mmの位置で固定した。燃焼界面の温度は燃料に着火後、燃焼界面が熱電対がある位置に近づくと急激に温度上昇し、燃焼界面が通過すると緩やかに温度が低下している。また、燃焼界面が到達していない下流側の温度は、上流側の燃焼界面の存在により雰囲気温度が僅かながら上昇していることが確認された。

一方図5は、 $\theta = -30^\circ$ 、 $V_{O_2} = 6.8 \text{ mm/s}$ 時の燃焼界面の温度変化を示す。なお、温度計測位置は図4と同様である。燃焼界面の進行方向が下向き(θ がマイナス)の場合、燃焼室内の雰囲気温度が図4に比べて約 30° 高くなり、燃焼界面が通過した時の温度ピーク値も大きいことが確認された。



Temperature measurement points

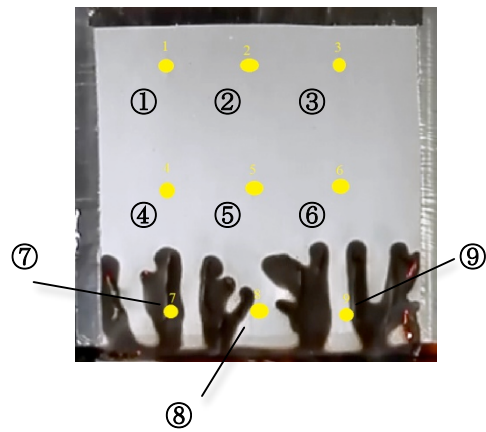


Fig.4 Temperature variation on the combustion interface ($\theta = 0^\circ$)

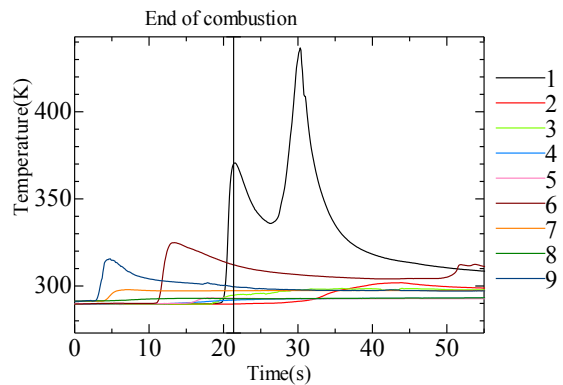


Fig.5 Temperature variation on the combustion interface ($\theta = -30^\circ$)

傾斜角度 θ の正と負の違いによって、熱輸送に大きな変化が現れる原因について考察を行った。図6は燃焼室内の流れの様子を模式化したものである。燃料が着火した後、燃焼界面は上流側(下向き)に向かって進行し、同時に界面付近で発生した煙は、酸素ガスに比べて密度が大きいため燃焼界面付近に停滞して、燃焼室内の雰囲気温度を上昇させている。これは結果的に燃焼促進する効果になり燃焼界面が大きく発達することになる。

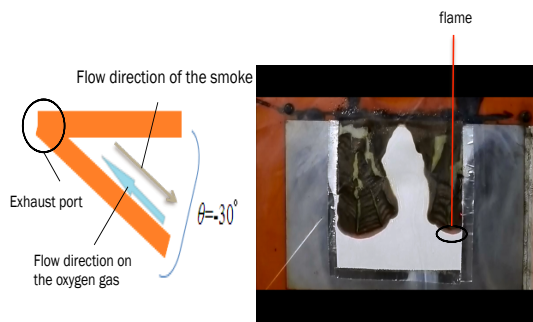


Fig.6 Schematic view of the flow of the combustion chamber

以上の結果から、以下の知見が得られた。

- (1) 薄板状木質バイオマスでは、不均一性が燃焼界面に発生する不安定現象（フィンガリング）の大きく影響を及ぼしている。
- (2) 燃焼室の傾斜によって発生する浮力は燃焼界面の進行方向ではなく、酸素ガスの進行方向に影響を与える。
- (3) 燃焼界面近傍の温度変化は、界面で発生した煙の存在に大きな影響を受ける。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0件)

[学会発表] (計 3件)

- ① 川原 秀夫, 薄板状木質バイオマスの緩慢燃焼プロセスにおける熱物質輸送, スマートプロセス学会 環境・エネルギープロセス部会ワークショップ講演論文集
- ② 川原 秀夫, 角 亮太, 積層化した木質バイオマス燃料の燃焼界面における熱物質輸送, 日本機械学会九州支部講演論文集 No. 138-1 (第 66 期総会講演会) pp. 257 ~258
- ③ 徳久 真司, 川原 秀夫, 狭小流路内における薄板状木質バイオマスの燃焼界面パターン, 日本機械学会九州学生会第 45 回卒業研究発表講演会

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 秀夫 (KAWAHARA HIDEO)

久留米工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：80300622