

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 21日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656050

研究課題名（和文）バイオ原料由来高密度固体燃料の定常端面燃焼の研究

研究課題名（英文）Study on End Face Combustion of Highly Densified Solid Fuel Derived from Biomass Resources

研究代表者

藤田 修 (FUJITA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10183930

研究成果の概要（和文）：単一のバイオマス由来高密度固形燃料を、長時間定常的に燃焼させる手段について検討した。その結果、燃料側面の過熱を防ぎながら、対向空気を試料に供給しながら端面燃焼させることで定常的な連続燃焼が可能であることを示した。さらに、この現象を1次元のエネルギー式に基づいて解析し、この現象は層流予混合一次元火炎の消炎現象と類似の議論が可能であり、一定の条件を満たせば定常燃焼状態が存在しうることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：Feasibility of steady end face combustion of biomass derived highly densified solid fuel have been examined. The results showed that a promising method is surface combustion sustained by counter air flow with side wall cooling of fuel. Numerical analysis based on one dimensional energy equation suggested that this phenomenon is similar to the propagation and extinction of one dimensional premixed flame and steady solution can exist providing the necessary conditions are satisfied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,000,000	300,000	3,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード： 燃焼、固体燃料、カーボンニュートラル、バイオマス燃料、定常端面燃焼

1. 研究開始当初の背景

カーボンニュートラルの考え方に基づいて、木材や稲藁といった草本系バイオマスの燃料としての利用が注目されている。これらの原料を暖房装置あるいはボイラーへ適用しようとした場合、燃料に着火するとたちどころに炎が全体に広がり、短時間のうちに燃

え尽きてしまう。この結果、燃焼時に煤煙が発生することや、火持ちが悪く安定した熱源としての利用が難しくなる。これは、燃料が多孔質で熱容量が小さいことに起因している。近年これらの問題を克服する手段として、バイオマス原料を高密度化したうえで成形し利用する手法が開発されている。例えば、

稲藁などの植物由来原料を150気圧前後の圧力のもとで200℃程度の温度に保持すると、原料中のヘミセルロースが熱分解し内部のリグニンおよびセルロースを結合させることができ、図1のようなバイオコークス（以下 BIC と呼ぶ）と呼ばれる強度と密度（1.4kg/m³程度）持ち合わせた燃料が形成される[1]。この燃料は、元々溶解炉におけるコークス代替燃料として開発されたものであるが、本研究ではこれを暖房装置やボイラーへ適用を想定し、研究対象とする。



図1 バイオコークスの例（直径 48mm, 長さ 約 90mm、原料イタドリ）

この燃料を燃焼炉で使用する場合、燃料自体が高密度であっても通常の燃焼を行うと、図2(a)のように全周にわたって燃料が炎に包まれる形で燃焼してしまい、結局燃料全体の急速な加熱が生じ、熱発生率の制御や煤煙の抑制は難しい状況となる。ここでもしこの燃料を図2(b)のように端面のみで燃焼させ、定常的に燃焼面を後退させていくことができるのであれば、熱発生率を制御した状態で、

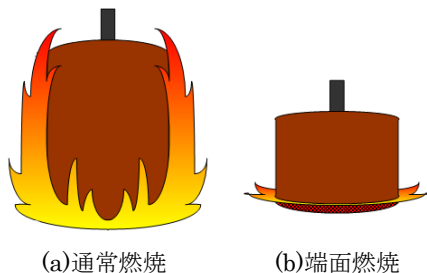


図2 高密度バイオマス固体燃焼の概念

長時間にわたって継続的な熱源として利用できることになる。本研究は、このような燃焼法の実現性について検討を行おうとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景のもとに、以下の項目を目的として研究を進めた。

まず第1に本研究で提案する端面燃焼自体が可能であるかどうかを検討する。特に、この端面燃焼が時間的に変化せず、定常的に燃焼を維持できるかどうか、という点が最も重要な検討項目である。

第2に、定常燃焼が可能である場合、その維持できる条件を明らかにする。これに関しては、実験的手法と数値計算による手法を導入する。

3. 研究の方法

本研究は、主に実験により研究を進めた。図3は、本研究で使用した実験装置の概略である。燃焼炉は二重管構造で、BICは直径1mmのステンレスワイヤーで内管の中に吊るされており、ステンレスワイヤーの他端はステージ上のカウンターウェイトに接続されている。炉内への一様空気流の供給にはブロワーを用い、空気予熱には電気ヒーターを用いた。着火

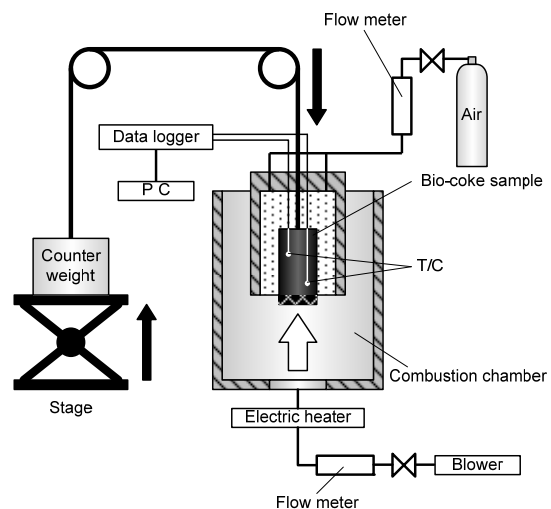
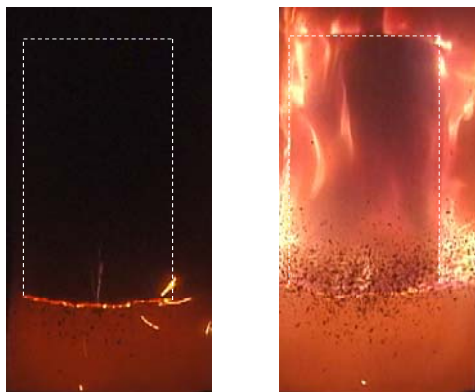


図3 実験装置概要

は 550NL/min (空気流速 4.67m/s 相当) で供給される燃焼用空気を、室温から 873K まで予熱しながら、BIC 下端面に吹き付けることを行う。BIC 下端面全体が着火したのを確認した後、ヒーターを切り燃焼用空気温度を室温に下げ、流量を調整した上で BIC を燃焼させた。内管の中に冷却用空気 (室温, 5L/min) を供給し、BIC 側面の加熱を防ぐことで、BIC 下端面およびその近傍側面のみが燃焼面となるようにした。燃焼面は灰やチャーが脱落しながら、次第に上方の未燃部へと後退するが、燃焼面のみが内管から出ている状態を継続するため、ステージによって燃焼面の高さを調節し、炉内における燃焼面の位置を一定に保持した。本研究では、イタドリを原料とする BIC (重量約 200g, 直径 48mm × 高さ 85mm 円柱形状) を用いた。

4. 研究成果

図 4 に周囲を冷却しない状態での典型的な BIC の燃焼形態を示す。燃料下方から高温の空気を吹き付けると、燃料下端面が着火 (図 4 (a)) し、少し時間が経過すると気相着火が生じ、火炎が燃料全体を取り囲むように燃



(a) 表面燃焼 (b) 有炎燃焼

図 4 BIC の燃焼形態

焼する。このときの、燃料の質量減少率および試料表面、試料周囲の気相温度を測定した結果が図 5 である。この場合、吹き付ける空気の温度は 598K としている。この図からわかるように、高温空気供給後約 10 分が経過した

ところで表面の急激な温度上昇が生じ、さらに 20 分経過時には気相の急激な温度上昇が見られる。これは、図 4 に見られるような表面燃焼から気相燃焼への移行が生じた結果である。このときの質量減少率をみると、最初の 10 分までは水分放出に伴うゆっくりとした質量減少が生じ、その後表面燃焼時にはより大きな勾配で質量減少が生じる。その後、有炎燃焼に移行すると、激しい質量減少が生

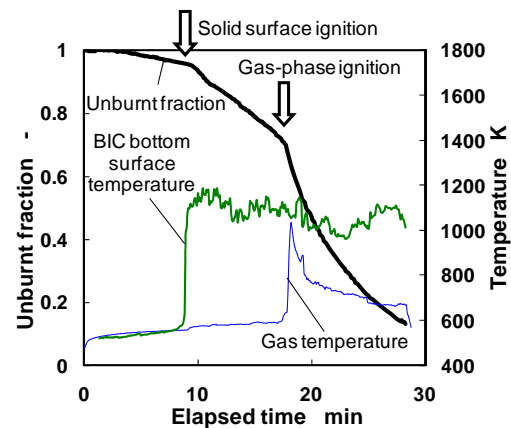


図 5 598K の空気による着火挙動

じ、しかもその減少率そのものも、残留質量が減少すると徐々に勾配が緩やかとなり、燃焼現象は定常状態とはほど遠い状況である。

このような非定常性が現れる最大の要因は、試料端面だけでなく側面も加熱されることによって、試料全体から熱分解ガスが放出され、これに着火することが挙げられる。そこで、この現象を避けるため実験装置 (図 3) に示したように、燃料周囲に冷却空気を流す工夫を行った。これにより、図 6 のように端面が赤熱した状態で継続的に燃焼を維持できることが確認された。

このときの、端面位置の時間変化を図 7 に示す。この図からわかるように BIC に対向させる形で供給する空気の流速条件により、端面の後退速度が大きく変化する。後退速度は、この図の直線の勾配で示されるが、空気流速が大きくなるほどその値が大きくなること



図6 端面燃焼の例

がわかる。また、もう1点注目されるのは、流速が小さい場合(3.82m/s, 2.97m/s)の場合は勾配が時間と共に小さくなり、火炎面の後退は定常状態とはなっていないことがわかる。一方で、流速条件が大きい場合は、ほぼ一定の傾きとなっており、定常的な火炎面の後退が実現できていることが理解できる。

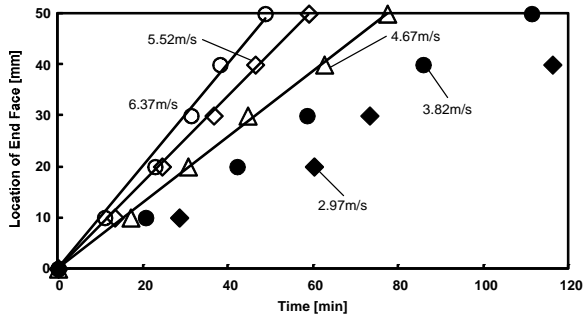


図7 端面燃焼における火炎位置の時間変化

ここで、燃焼現象の定常性を確認するために、試料内部に2箇所(初期の試料表面から20mm, 40mm)の熱電対を設置し、その温度履歴を比較した。測定位置によらず火炎通過時の温度履歴が同じであれば、現象はほぼ定常とみて差し支えない。

図8は、図7において火炎面の後退速度がほぼ一定と見なされる3つの流速条件に対して、温度履歴を比較したものである。この結果から、内部の温度は、流速条件が5.52m/s, 6.37m/sの2つの条件においてはほぼ同一の温度履歴となっており、伝播現象は定常状態を達成している。一方、流速が

4.67m/sの場合は定常とはなっておらず、長時間端面燃焼を継続した場合消炎するなどの可能性がある。

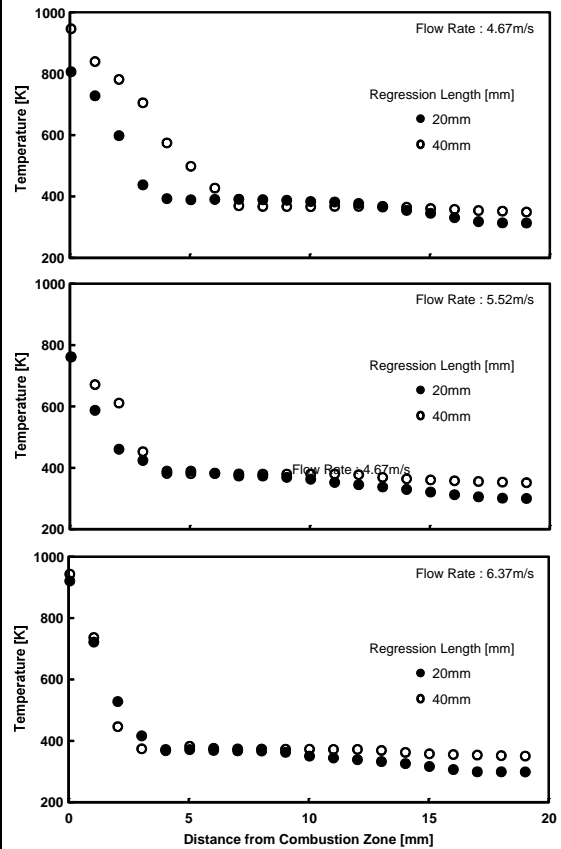


図8 異なる試料深さでの温度履歴の比較

このような非定常性が生じる要因について検討を行うため数値解析を行った。ここでは、端面燃焼を1次元の熱輸送現象とみなし解析を行った。端面は、供給される空気により固定炭素が表面燃焼を行うものとし、試料の内部では、水分の相変化、熱分解反応が生じるものとした。また、端面で発生した熱は試料内部へ伝導するほか、気相側への対流により熱を奪われるものとした。このようなモデルにより計算を行った結果が図9である。この図には、対向流空気流速と端面温度の関係を示している。図には、計算結果と実験結果(赤外カメラによる表面温度の測定結果)の両者が示されている。空気流速が小さくなると、端面温度も徐々に低下し、流速が3m/s

の条件では実験、計算のいずれにおいても表面温度の急激な低下が生じ、消炎に至る。

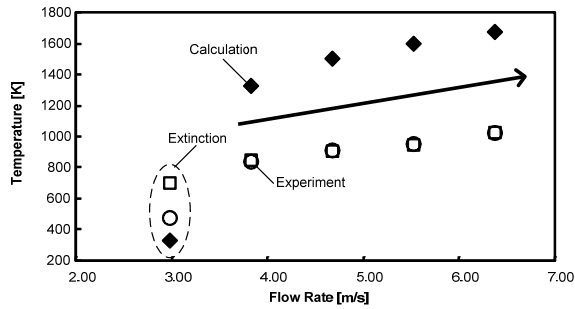


図9 空気流速と燃焼面温度の関係

また、図10は、表面温度と後退速度の関係を示したものであるが、その依存性は実験と極めて類似の傾向となっている。すなわち、ここで取り扱う端面燃焼は、一次元層流予混合火炎と同様な挙動を示し、層流予混合火炎の消炎に関する Homogeneous 熱損失モデル [2]と同様な理解が可能と考えられる。言い換えると、端面の表面燃焼による発熱と輻射および試料深さ方法への熱伝導による熱損失のバランスがある一定の条件を満たせば、理論的にも定常燃焼条件が存在することを示していると言える。

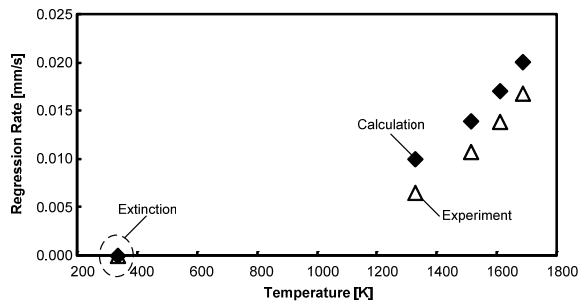


図10 端面燃焼温度と後退速度の関係

これらの考察から、本燃焼法は、側面の過熱を防いだ上で、適当な空気流速（本研究では 5m/s 以上）を表面から与えることで、定常的な端面燃焼が実現可能と考えられる。この結果を踏まえ、本研究を通して考案した定常端面燃焼バーナ構造（図11）を新たに提案

し、現在特許を申請中である。

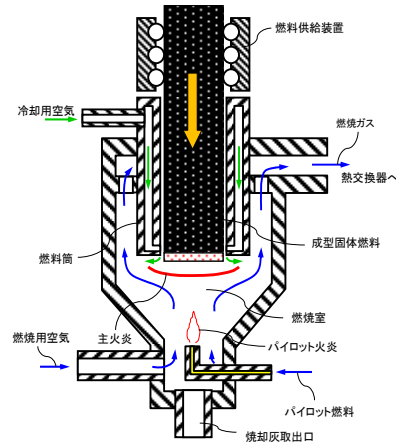


図11 BIC 端面燃焼方式概念

参考文献：

- [1]井田、バイオマス固形物及びその製造方法、日本国特許第 4088933 号,(2005).
- [2]新岡、燃焼現象の解析、東北大学出版会、2004, p.20.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 伊東弘行, 酒井雄人, 井田民男, 藤田 修, 井田, 藤田, 高圧縮固体バイオマス燃料の燃焼利用, 日本燃焼学会誌, 第53巻164号,(2011), pp.63-68, 2011, 査読無(解説論文) .
- ② Hiroyuki Ito, Yuto Sakai, Tamio Ida, Yuji Nakamura, Osamu Fujita, Ignition Behavior of Bio-coke (Highly Densified Biomass Fuel) in High-Temperature Air Flows, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.6, No.1 (2011) pp.111-122, 査読有.

〔学会発表〕(計10件)

- ① Hiroyuki Ito, Yuto Sakai, Osamu Fujita, Yuji Nakamura, Tamio Ida, Combustion of Bio-coke (Highly Densified Biomass Fuel) Block in High Temperature Air Flow, ASME-JSME Heat Transfer Joint Conference, 2011.3.14, Honolulu, USA.
- ② Takero Nakahara, Hiroyuki Ito, Osamu Fujita, Effect of Air Flow Rate on End Face Combustion of Bio-coke, 7th SNU-HU Joint Symposium on Mechanical and Aerospace Engineering,

2011.11.18, Seoul National University, Korea.

③ Osamu Fujita, Introduction of some Combustion Researches on Renewable Energies in Hokkaido University -Methanol, Ethanol, DME and Bio-Coke- (Invited seminar), AUN/SEED-Net Seminar at Bandung Institute of Technology

2010.10.11, Bandung, Indonesia

④ Hiroyuki Ito, Yuto Sakai, Osamu Fujita, Yuji Nakamura, Tamio Ida, Ignition and Combustion Behavior of BIC (Bio-coke; Highly Densified Biomass Briquette) in High-Temperature Air Flow, 33rd International Symposium on Combustion (Work-In Progress Poster Colloquium) 2010.8.4 Beijing, China.

⑤ 中原毅朗, 伊東弘行, 井田民男, 藤田修, 一様空気流中に置かれたバイオコークス端面燃焼の観察, 第 49 回燃焼シンポジウム 2011.12.6, 慶應大学 (横浜市) .

⑥ 伊東 弘行, 酒井 雄人, 井田民男, 若月薫, 藤田 修, バイオコークス燃料の熱分解ガス放出特性に関する検討, 2011 年度日本機械学会年次大会, 2011.9.11-14, 東京工業大学 (東京).

⑦ 伊東弘行, 酒井雄人, 井田民男, 若月 薫, 藤田 修, バイオコークス燃料の加熱にともなうガス放出挙動に関する検討日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011.10.29-30 静岡大学 (浜松市) .

⑧ 酒井雄人, 藤田 修, 伊東弘行, 中村祐二, 井田民男, 若月薫, 加熱条件がバイオコークスの熱分解ガス特性に及ぼす影響第 48 回燃焼シンポジウム 2010.12.2 福岡ガーデンパレスホテル (福岡) .

⑨ 伊東弘行, 酒井雄人, 藤田 修, 中村祐二, 井田民男, 高温空気流中に置かれたバイオコークス燃料の着火および燃焼挙動, 熱工学カンファレンス, 2010.10.30, 長岡科学技術大学 (長岡).

⑩ 伊東弘行, 酒井雄人, 藤田 修, 中村祐二, 井田民男, 高温空気流中におけるバイオコークス燃料の着火挙動, 平成 22 年度高温学会春季総合学術講演会, (2010.5.31) pp.25-26.大阪大学荒田記念館 (大阪) .

[図書] (計 0 件)
該当なし。

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 成型固体バイオマス燃料の燃焼装置

発明者: 伊東弘行, 藤田修, 酒井雄人

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2011-027133

出願年月日: 平成 23 年 2 月 9 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://york-me.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 修 (FUJITA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 10183930

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

中村 祐二 (NAKAMURA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 50303657

伊東 弘行 (ITO HIROYUKI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 30372270

井田 民男 (IDA TAMIO)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70193422

(4) 研究協力者

酒井 雄人 (SAKAI YUTO)

北海道大学・大学院工学院・大学院生

中原 毅朗 (NAKAHARA TAKERO)

北海道大学・大学院工学院・大学院生