

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340108

研究課題名(和文) 高灰分バイオマス固形燃料のクリンカー形成機構に関する研究

研究課題名(英文) Study on Clinker Formation Mechanism of High Ash Content Biomass Solid Fuel

研究代表者

川村 淳浩 (Kawamura, Atsuhiko)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：20596241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：灰分の少ない高品質のバイオマス原料確保が物理的にも経済的にも困難となっている。これが、バイオマスの普及を妨げる阻害要因のひとつとなっている。本研究では、木質ペレットと同サイズのバイオコークスを製造して家庭用木質ペレットストーブに適用して、燃焼状況によるクリンカー形成の違いを探り、以下の知見が得られた。

(1) 木質ペレットでは、安定した燃焼を妨げる恐れのあるクリンカーが比較的簡単に形成されることが確認された。(2) ペレット燃焼量がより少なく、空気比がより高いほど、クリンカー形成割合は減少することが確認された。(3) バイオコークスとの混焼により、クリンカーの生成が抑制される可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The quantity of high-quality biomass with low ash content is small. Securing high-quality biomass is physically and economically difficult. This factor is one of the disincentives that discourage the spread of biomass combustion apparatuses. This study evaluated clinker formation for different fuels and combustion states in a home-use woody pellet stove with a rated heating output of 8 kW. Woody pellets were pulverized, the moisture content was regulated, and Bio-coke was produced by loading them into the reaction container of 6. With a combustion rate of 1.65 kg/h, blend firing (one hour) of the woody pellet and the Bio-coke was performed.

(1) It was confirmed that clinker, which tends to disturb stable combustion, formed relatively easily. (2) It was confirmed that the clinker formation ratio decreased with lower pellet combustion rates and higher excess air ratios. (3) The possibility that the generation of the clinker was controlled by blend firing with the Bio-coke was shown.

研究分野：環境エネルギー工学

キーワード：木質バイオマス クリンカー 溶融灰 燃焼灰 燃焼 混焼 木質ペレット バイオコークス

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の構築に向けて、再生可能エネルギーであるバイオマス固形燃料が注目されている。木質ペレットは、バイオマス固形燃料を使用する家庭用ストーブなど小型燃焼機器の代表的な燃料である。この燃料は、原料を含めた品質規格が整備されている (EN-14961-2(2010)、日本木質ペレット協会「木質ペレット品質規格」(2011))。近年、上述の小型燃焼機器の急速な普及に伴って原料の需要が増加したことで、従来は小型燃焼機器に用いられることのなかった樹皮を始め、草根系や農作物残渣など灰分組成の多いバイオマスに注目が集まっている。しかし、灰分組成から生成される燃焼灰が熔融してクリンカーが形成されると、燃焼の立ち消えなど燃焼機器の連続運転の可否に大きな影響を与える^[1]ため、上述の品質規格では、灰分組成等の制限を含めた品質区分が設けられており、燃焼機器ユーザーの仕様に応じて選定できるように設定されている。

これまで、基礎燃焼研究分野においては、1 片のバイオマス固形燃料の電気炉内での燃焼特性を解明する基礎研究^[2,3]があるが、実機と異なってクリンカーが形成されなかったとのことから、実機での燃焼形態が再現できていないと思われる。また、吸湿性に起因する長期貯蔵劣性を克服するために半炭化ペレットを製造して市販燃焼器で燃焼させた研究^[4]では、燃焼温度と燃焼効率が上昇したとの報告のみで、クリンカー形成には言及されていない。

一方、業務用の実機で引き起こされているクリンカーに起因する障害を出発点とした取り組みが認められる。我が国では、燃料中の灰分元素とその割合を調整した試験燃料を用いた電気炉加熱試験によって、クリンカーの形成条件が調査され、カリウムやケイ素が融着作用をもたらし、鉄の強度に影響をもたらすことが見出された^[5]。また、木質ペレット焚き小型燃焼機器の生産規模と利用規模が世界で最も大きいオーストリアでは、欧州第 7 次研究枠組み計画 (FP7) の下で、灰分組成の異なる様々なバイオマス原料から製造されたペレットと燃焼方式の異なる 2 種類の代表的な業務用実機燃焼機器 (50kW 級) を用いて、形成されるクリンカーを分類するための試験方法を開発する 3 年間のプロジェクトが実施された^[6]。前者は研究室レベルでの取り組み、後者は実機であるが様々な制約が多い家庭用ではなくクリンカー対策にある程度のコストが許される業務用であるが、いずれも、具体的な解決方法の提示に至っていないのが現状である^[7]。

先に述べたように、バイオマス固形燃料を用いる家庭用などの小型燃焼機器は、木質ペレットを燃料とするものがほぼ 100% であり、家庭用電気製品の品質に馴染んだ利用者の理解を得て普及を拡大するためには、欧州の木質ペレット品質規格のように木部だけで

生産する低灰分の組成とする方策が手堅い。しかし、資源量が限られているために、燃焼機器の急速な普及に応えられる原料確保が物理的にも経済的にも困難となっている。高灰分組成バイオマスを従来からの木質ペレット焚き小型燃焼機器で利用できるように考えることは、燃焼機器の開発コストを抑えるだけでなく、利用者の経済負担も最小限となり、燃料の流通部門にとっても大きな経済メリットとなる。

2. 研究の目的

本研究は、前述の課題の解決に向けて、高灰分組成の木質ペレット (比重 0.55) と同じ原料から同サイズ (8 程度) のバイオコークス (比重 1.4) を製造し、市販の燃焼機器を用いた燃焼比較実験を通して、燃焼形態の違いによるクリンカー形成機構の違いを探ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、定格暖房熱出力 8kW 級の S 社製家庭用ペレットストーブを改造し、新たな制御装置と各種の計測器を組み込んで実験装置を構成した (図 1)。ペレットストーブの主要な構成要素は、ペレット燃料供給部、燃焼部 (燃焼室、排気用誘引ファン、新気用押込ファン、燃焼制御装置)、熱交換部 (熱交換器、温風吹出ファン) である。燃焼室は矩形容器状の固定式燃焼ポットで、底面の火格子の下方から 1 次燃焼空気が供給され、4 壁面の孔から 2 次燃焼空気が供給される。両者の供給割合は燃焼ポットの構造上任意に変更することはできず、3:1 の断面積割合で固定されている。排気用誘引ファンと新気用押込ファンは、連動して運転することで、燃焼器内部が常時負圧を保つことが求められる。これは、燃料の燃焼量に関係なく一定の燃焼空気量が送られる制御仕様となっている。本研究で実施した改造では、燃焼制御装置を PLC と PC に置き換え、ペレットストーブの排気用誘引ファンと新気用押込ファンの連動運転に加えて、実験室の排気設備ファンを独立に制御することで、空気過剰率を任意に変えられるようにした。

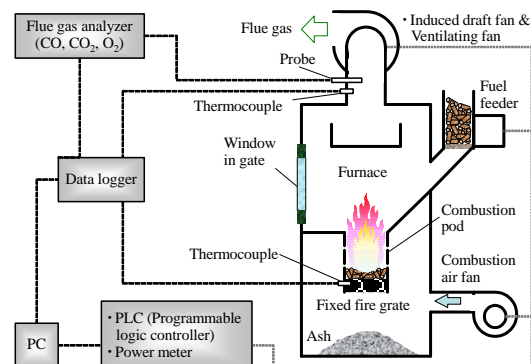


Fig. 1 Schematic diagram of biomass combustion examination equipment

燃料の木質ペレットは、釧路工業高等専門学校が立地する北海道東部地域の経済圏で産出されるカラマツを原料として生産されている2ブランドを用いた。Y協同組合製ペレットE(全木ペレット)とZ社製ペレットU(ホワイトペレット)である。表1に、これらの諸元を示した。

Table 1 Specification of pellet fuel

Brand	E	U
Material	Japanese larch	
Pellet type	Whole wood	White
Bulk density	0.70 g/cm ³	
Moisture content	8.3 %	
Ash content	0.3 %	0.2 %
Ignition loss of ash	UN	22.5 %
Low heating value	18.6 MJ/kg	

日本木質ペレット協会が制定した「木質ペレット品質規格」に基づき、同サイズのバイオコークスを製造できる小径バイオコークス製造装置を設計・製作した。木質ペレットを粉砕して、水分量の調節をおこない、8及び6の成型器に詰めてバイオコークスを製造した。定格燃焼量(1.65kg/h)において、木質ペレットとバイオコークスの混焼実験をおこなった。

4. 研究成果

図2に、ペレット燃焼量と排気設備ファン運転周波数の違いによる排ガス中の一酸化炭素濃度の関係を示した。炭化水素系燃料の燃焼では、各種の中間生成物を経て一酸化炭素が生成され、更に燃焼が進んで二酸化炭素と水が生成される。空気過剰率が小さい場合には、必要となる酸素が不足することで最終的な反応にまで至らず一酸化炭素が排出される。一方、空気過剰率が大きい場合には、燃焼温度の直接的な低下に加えて、排ガス損失の増大に伴う炉内(炉壁)温度の低下によって燃焼ガスの温度が低下するため、最終的な反応にまで至らず一酸化炭素が排出される。

図2より、ペレットストーブの排気用誘引ファンと新気用押込ファンの回転数は、ペレット燃焼量に関係なく一定であり、排気設備ファンを運転しない状態では、定格入力(1.65kg/h)付近で最も不完全燃焼が少ない燃焼状態が実現される設計仕様であることがわかった。また、排気設備ファンの運転により、この良好な燃焼の範囲が、高入力側にシフトすることもわかった。

図3に、ペレット燃焼量と排気設備ファン運転周波数の違いによるクリンカー形成割合の関係を示した。また、図4に空気過剰率と排気設備ファン運転周波数の違いによるクリンカー形成割合の関係を示した。これらより、ペレット燃焼量が少なく空気過剰率が大きいほど、クリンカーの形成割合が小さくなることがわかった。しかし、この条件では

図2より不完全燃焼の状態であったため、燃焼状態とクリンカー形成はトレードオフの関係にあることがわかった。

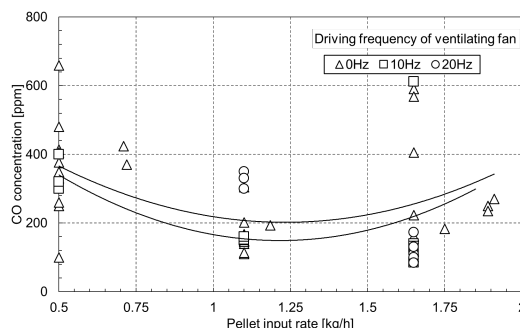


Fig. 2 Relationship between pellet input rate and CO concentration by the driving frequency of ventilating fan

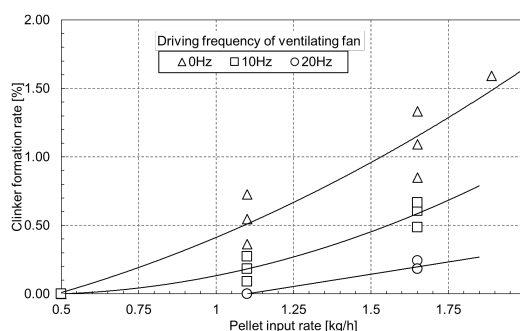


Fig. 3 Relationship between pellet input rate and clinker formation rate by the driving frequency of ventilating fan

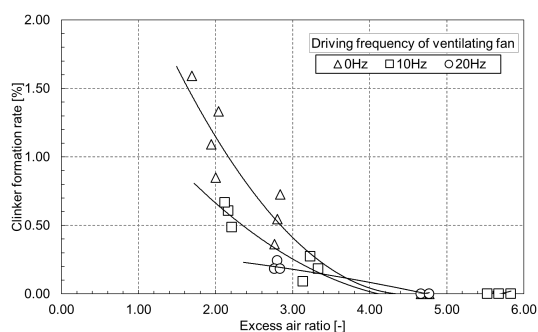


Fig. 4 Relationship between excess air ratio and clinker formation rate by the driving frequency of ventilating fan

図5に、製作した小径バイオコークスの比重と含水率を示した。目標値である比重1.40付近に多く集中させることができたが、製造装置の生産性の低さが課題となった。また、表2に、1~5%の混焼率で実施した燃焼比較実験結果の例を示した。すべての混焼条件で、クリンカーの形成は確認されなかった。混焼実験によって得られた燃焼灰は、量も同程度で、粒度が小さく、硬さも手で崩せるほど脆かった。これらは、バイオコークスの燃焼速度の遅さに起因するものと推察された。

バイオマス固形燃料の燃焼に伴うクリンカー形成は、灰分組成から生成される燃焼灰

を二酸化ケイ素 (SiO_2) と仮定すると、その融点 1,923K を超えることでおこなわれると思われる。ペレット燃焼量が少なく空気過剰率が大きいほど燃焼後の灰の温度が上昇しないため、群燃焼時でもその融点を超えずにクリンカーが形成しづらくなるとされる。以上より、混焼条件では燃焼温度が上がらずに、灰の熔融温度に到達しなかったと拝察された。

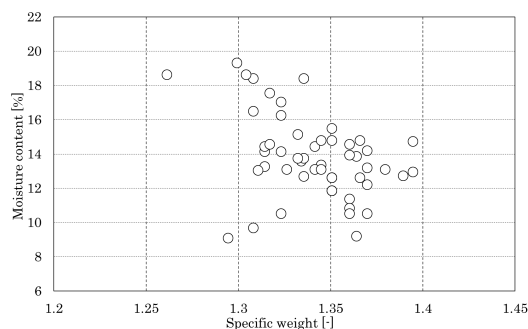


Fig. 5 Relationship between moisture content and specific weight of the small diameter Bio-coke

Table 2 Overview of the ash for the blend firing of the small diameter Bio-coke

Bio-coke blend rate (%)	1	2	3	5
Photo of ash				
Quantity of ash [kg]	0.00850	0.00895	0.00842	0.00875
Time fell to 100 from fuel stop [min]	9	9.5	10	11

< 引用文献 >

- [1] 川村淳浩ら：農作物生産用温室におけるバイオマス燃焼の適応課題，高温学会誌 33(1)，p14-20，2007
- [2] 難波邦彦ら：木質バイオペレットの熱分解・燃焼特性，日本エネルギー学会誌 83(10)，p788-793，2004
- [3] 伊東弘行ら：高圧縮固体バイオマス燃料の燃焼利用，日本燃焼学会誌 53(164)，p63-68，2011
- [4] 吉田貴紘：トレファクションによる高性能木質ペレット「ハイパー木質ペレット」の技術開発，生物資源 6(1)，p14-24，2012
- [5] 桑尾房子ら：木質ペレットボイラーにおける灰塊及びクリンカー生成の要因調査結果，高知県環境研究センター所報 27，p61-67，2010
- [6] Manuel Schwabl et al.: AshMelt Publishable Summary, 2013
- [7] Manuel Schwabl and Elisabeth Wopienka: Outlook for the Project - Future Application and Development of the AshMELT Methods -, 3rd international AshMELT workshop, Wels, 2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- (1) Toru Sawai, Ichiro Katayama, Tamio Ida, Hiroki Imamura and Takeshi Kajimoto: Estimation of Energy Properties of Torrefied Japanese Cedar with Colorimetric Values, Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.1 (2017), pp.1-14, DOI:10.1299/mej.16-00320、査読有
- (2) 田上奈実、ファイザ ビンティ モハマド ノール、中館朋江、難波邦彦、井田民男：粉体バイオコークスの燃焼特性に及ぼすトレファクション処理の影響、スマートプロセス学会誌，Vol.5, No.3 (2016)，pp.171-178、査読有
- (3) 石河統将、天野雅之、三浦広仁、井田民男：一般廃棄物（枝・葉・草等）を原料としたバイオコークスの基礎特性、スマートプロセス学会誌，Vol.5, No.3 (2016)，pp.179-184、査読有
- (4) 大橋憲、笹内謙一、水野諭、井田民男、山西弘城：バイオコークス技術を用いた震災除染物の減容化と復興への導入研究、スマートプロセス学会誌，Vol.5, No.3 (2016)，pp.185-190、査読有
- (5) 麓隆行、水野諭、井田民男：バイオコークスの品質検査としての超音波伝播速度の適用性に関する基礎研究、スマートプロセス学会誌，Vol.5, No.3 (2016)，pp.191-197、査読有
- (6) 川村淳浩、井田民男：バイオマス固形燃料のクリンカー形成機構に関する研究、スマートプロセス学会誌，Vol.5, No.2 (2016)，pp.140-144、査読有

〔学会発表〕(計25件)

- (1) 村田博敏、川村淳浩、井田民男：石炭コークス枯渇時代に向けた鉄鋼溶解の行方に関する考察、第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2017/2/2、都内
- (2) Atsuhiko Kawamura and Tamio Ida: Study on Clinker Formation Mechanism of High Ash Content Biomass Solid Fuel, 6th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, 2016/11/15, Venice, Italy
- (3) Omar bin Hamidun and Tamio Ida: Upgrading Biomass Solid Fuel by Combining Palm Fiber and Coffee Char as the Material for Densification, International Conference on Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate Change (9th ICIPEC), 2016/9/20-23, Kyoto, Japan
- (4) 水野諭、井田民男、澤井徹、淵端学：同一比重を有するバイオコークスの内部構造の差異が燃焼特性に及ぼす影響、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪

- (5) 田上奈実、ファイザ ビンティ モハマド ノール、中館朋江、井田民男、水野諭：半炭化度を指標とした半炭化バイオマスの化学的・物理的特性および熱特性に関する研究、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (6) 麓隆行、水野諭、井田民男：大型バイオコークスの内部品質分布への熱伝導と圧力の影響、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (7) 上林正典、井田民男、水野諭、田上奈実：農業残渣バイオコークスの断面性状が機械的特性に及ぼす影響、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (8) 吉國幸治、井田民男、澤井徹：有機添加物による機能性バイオコークスの試作とその特性、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (9) 大橋憲、笹内謙一、井田民男、水野諭、山西弘城：バイオコークス技術を用いた震災除染物の減容化、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (10) 辻星耶、田上奈実、水野諭、井田民男：そば殻バイオコークスの成型条件が物理的特性とその燃焼特性に及ぼす影響、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (11) Omar bin Hamidun、井田民男：ヤシヒゲバイオコークスの物理的および機械的特性に対する粒径の効果、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (12) Muhammad Syaifulislam bin Ramli、井田民男、水野諭：パーム葉とココナッツ殻を原料とする混合バイオコークスの圧縮強度特性、日本実験力学会 2016 年度年次講演会、2016/9/1、東大阪
- (13) 川村淳浩：木質バイオマス固形燃料の製造と燃焼、スマートプロセス学会環境・エネルギープロセス部会平成 28 年度第 6 回環境とエネルギープロセスのワークショップ、2016/8/20、豊橋
- (14) 田上奈実、中館朋江、水野諭、井田民男、難波邦彦：成型温度の異なるバイオコークスのトレファクション経過観察と物理的特性、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (15) 水野諭、井田民男、澤井徹：バイオコークス内部構造に関する比表面積の成型条件による影響、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (16) Muhammad Syaifulislam bin Ramli、井田民男：パーム葉とココナッツ殻を原料とする混合バイオコークスの圧縮強度特性、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (17) Omar bin Hamidun、井田民男：バイオコークスとバイオチャコークスの初期物理的特性に基づく密度化機構の実験的研究、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (18) 吉國幸治、井田民男、栢原義孝、村田博敏：ペクチンを混在したバイオコークスの機能性向上に関する一考察、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (19) 辻星耶、井田民男、水野諭：そば殻バイオコークスの機械的特性とその燃焼特性に関する基礎研究、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (20) 上林正典、井田民男：農業残渣を原料とするバイオコークスの物理・機械強度特性、第 26 回環境工学総合シンポジウム 2016、2016/6/30、金沢
- (21) 石井鴻紀、川村淳浩：バイオマス固形燃料の燃焼灰生成に関する研究、第 45 回日本機械学会学生員卒業研究発表講演会、2016/3/7、函館
- (22) Koji Yoshikuni, Tamio Ida, Y. Kikui, Satoru Mizuno, Omar bin Hamidun and Yoshitaka Kayahara: Development of Biocoke as a Coal Coke Alternative for Low Carbon Society in Asia, International Conference of Low Carbon Asia (ICLCA 2015), 2015/9/19-22, Singapore
- (23) 川村淳浩、石井鴻紀、中館朋江、井田民男：小型燃焼器を用いた木質バイオマス固形燃料の燃焼特性、スマートプロセス学会環境・エネルギープロセス部会平成 27 年度第 5 回環境とエネルギープロセスのワークショップ、2015/8/22、豊橋
- (24) 川村淳浩、石井鴻紀、中館朋江、井田民男：木質バイオマス固形燃料の溶融灰形成機構に関する研究、第 13 回木質炭化学学会大会、2015/6/4-5、旭川
- (25) 川村淳浩、高橋厚貴、中館朋江、井田民男：高灰分バイオマス固形燃料のクリンカー形成機構に関する研究、日本エネルギー学会第 10 回バイオマス科学会議、2015/1/14-15、都内

〔その他〕

ホームページ等

(1) 釧路高専研究シーズ集

https://www.kushi-ro-ct.ac.jp/office/hp/seeds/m_kawamura.pdf

(2) 近畿大学バイオコークスプロジェクト

<http://www.kindai.ac.jp/bio-coke/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 淳浩 (KAWAMURA, Atsuhiro)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：20596241

(2) 研究分担者

井田 民男 (IDA, Tamio)

近畿大学・バイオコークス研究所・教授

研究者番号：70193422