

バイオコークス燃料の燃焼特性

Combustion characteristics of biocoke

淵端 学*

1. はじめに

地球温暖化対策として化石燃料使用量を削減するための様々な方策が模索され始めてからすでにかなりの年月が経過した。その間に多くの新エネルギー技術が開発されたが、化石燃料の利便性は極めて高く、またその使用量も膨大であるため、いまだに決定的な代替エネルギー技術は見出されていないようである。おそらく一つや二つのエネルギー技術で化石燃料を代替することは現実には不可能であり、様々なエネルギー源を適材適所で使用することが必要になると考えられる。現状ではソーラーパネルや風車等により小規模分散的にエネルギーを供給し、蓄電技術と併用して使用することがもっとも技術的障害が少ないため、化石燃料により運用されている機器の電動化が各分野で進められている。大規模な使用には電力の貯蔵や輸送の技術がまだもう少し開発されなければならないが、プロセスに化石燃料を大量に使用している産業分野においても、電気機器化が相当には進むと考えられる。しかし製造業分野、特に素材産業においては、燃料は単なるエネルギー源ではなくプロセス機器の機能を担っている場合がある。溶解炉や高炉に代表されるシャフト炉の運転では、炉底に形成されるベッドコークスは燃料として以外にコークス間に適度な隙間を形成することで下部からの空気の流路と、溶解した金属が流下するための流路を確保する機能を担っている。また、これらの炉では固体燃料を熱再生の蓄熱体としても利用している。固体燃料は着火には難があるものの、一旦燃料自体が高温に加熱されれば特別な保炎機構が無くとも上部から燃料を補給するだけで燃焼を維持することができ、空気流の調整のみで比較的簡単・安定に燃焼を制御できる。これは溶解した金属の保温や暖房などのように弱い出力で長時間熱出力が欲

しい場面でも便利である。

さらに、膨大な現有機器の新規機器への置換はコスト的な問題の他に、現状のエネルギー構成でそれらを製造するときに排出されるCO₂の問題もある。長期的には産業機器の電動化は推進すべきとはいえ、その過程におけるCO₂排出量は最小限にとどめなければならない。そのためにも当面の課題は現状の産業機器で使用可能なカーボンニュートラルな代替燃料の実用化であると考えられる。これを早急に可能な限り実現し、現有機器のCO₂排出量を最小限に抑えたうえで電動化設備の生産・置換を行うことがカーボンニュートラル社会実現までの総CO₂排出量を最小に抑える方策であると考えられる。

天然ガスや石油系燃料の代替燃料としては、メタネーションやFT油の合成および量産技術の開発が盛んにおこなわれているが、産業用燃料として大量に使用されている石炭の代替燃料技術開発はあまり活発ではない。その一つに近畿大学で開発されたバイオコークス（以後、BICと記す）がある¹⁾。BICは植物系バイオマスを原料としたブリケット燃料である。423～473Kに加熱して圧密成形することで、単なる圧密では成形できない原料からも製造でき、さらに通常のバイオマスブリケットより高密度、高強度な固体燃料となる。この物理特性から、石炭コークスの代替燃料として研究・開発が進められており、鑄造用溶解炉で約20%、灰直接熔融式の焼却炉で約40%の石炭コークス代替が可能であることが実証試験により確認されている。BICは製造時に加熱はされているものの比較的低温であるため炭化はまったくしておらず、元素組成としては原料バイオマスから変化していない。そのため、各種試験にお

* 近畿大学 理工学部
(〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)
e-mail: fuchihata@emat.kindai.ac.jp

いては石炭コークスとは燃焼特性がかなり違っている。それでも石炭コークスをいくらか代替できていることから、その強度および燃焼特性が通常のバイオブリケットや石炭コークスとどのように違うのかが興味の対象となってきた。さらに近年においては一般燃料としてバイオブリケットを使用しようとする動きも活発になってきており、基本的な燃焼特性にも興味があつまっている。本稿ではBICの燃焼特性について、現在までに報告されている内容を概説する。

2. BICの基本燃焼特性

初期にはBICの基本燃焼特性を調査するため、高温空気流中における燃焼挙動の観察が行われた¹⁻⁵⁾。図1に雰囲気空気流温度 $T_A = 973K$ の高温空気流中で燃焼させた緑茶BIC、ヒノキBIC（ともに成形温度 $T_M = 443K$ 、成形圧力 $P_M = 20MPa$ 、直径20mm、高さ20mm、円柱形状）、石炭コークス、備長炭（ともにBIC試料と同形状に整形したもの）、木質ペレット（市販の木質ペレットを粉碎し、他試料と同形状に常温、 $P_M = 20MPa$ で再圧密したもの）の燃焼時重量変化曲線を示す。グラフは、横軸が試料投入からの経過時間、縦軸がその時間における試料の重量収率となっている。

BICと木質ペレットにおいて初期に急激な重量減少が見られるのは揮発成分による有炎燃焼を起こすためである。その後、重量変化曲線の傾きが緩やかになる時点で炎は観察されなくなり、燃料の表面で燃焼が進行するチャー燃焼へと移行する。石炭コークスと備長炭では有炎燃焼は観察されず、燃焼全体がチャー燃焼で進行する。石炭コークスと備長炭はかなり似通った特性が確認できるが、BICの特性は

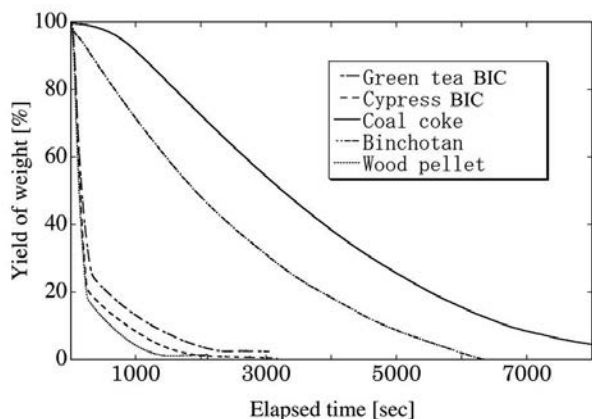


Fig. 1 Weight reduction curves for various solid fuels for $T_A=973K$

木質ペレットに近い。しかし木質ペレットとヒノキBICを比較すると、有炎燃焼期間の重量減少速度は同程度であるが、BICの方がチャー燃焼で燃焼する重量割合がやや高く、チャー燃焼期間の重量減少速度が遅いことが分かる。溶解炉や高炉では代替燃料に石炭コークスと同程度の燃焼速度と物理的強度が求められるので、これらの観察結果から少なくとも木質ペレットよりはBICが代替燃料として適していることがわかる。これらの特性はBICが成形時に加熱を行っていることに起因していることは明らかであることから、次に成形条件が燃焼特性に及ぼす影響が調査された。

図2に $T_M = 443K$ 、 $P_M = 10.9MPa \sim 43.7MPa$ で成形された緑茶BICの $T_A = 698K$ における燃焼時重量変化曲線を示す⁵⁾。この成形条件においてはBICの見かけ比重は1.35でほぼ一定であり、主に成形圧力の違いが燃焼挙動に及ぼす影響が観察できていると考えられる。曲線上の白丸は有炎燃焼開始時点、黒丸は有炎燃焼が終了し、チャー燃焼に移行した時点を示している。ここで、加熱開始（時刻0）から有炎燃焼開始までの期間を着火遅れと定義する。この結果より、成形圧力が高いほど着火遅れが長くなる傾向があることが分かる。これは、成形圧力が高くなるほど、より高粘度の成分まで流動し、内部空隙に充填される形でBICが成形されるため、着火遅れの間に発生する熱分解ガスが重質になり、着火遅れが延長したのではないかと考えられる。成形圧力 $P_M = 32.8MPa$ と $43.7MPa$ で重量変化曲線にほとんど差が見られないのは、成形圧力 $32.8MPa$ 以上では、 $443K$ で軟化するほぼすべての成分を流

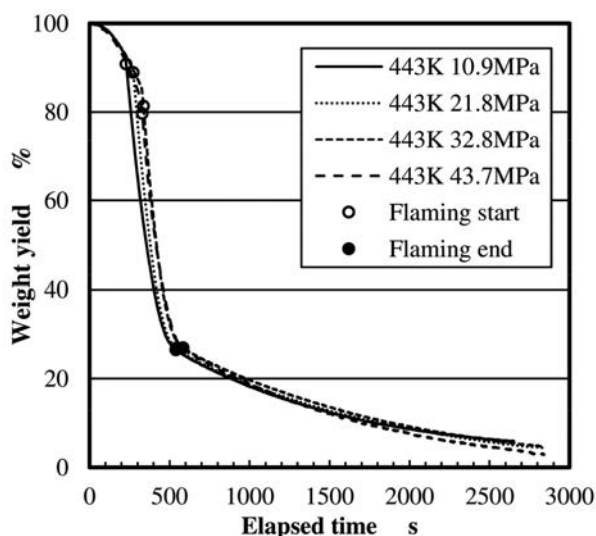


Fig. 2 Weight reduction curves for $T_M=443K$, specific gravity 1.35.⁵⁾

動かせることができているためと考えられる。

図3に成形圧力 43.7MPa, 成形温度 383K ~ 443K の BIC の燃焼時重量変化曲線を示す⁵⁾。この結果より、成形温度が高いほど着火遅れが長くなる傾向が見られる。成形圧力が高くなる時と同様の变化であるが、成形圧力を約 10MPa 変化させた場合に見られる着火遅れ時間の変化が、成形温度では、410 K 以上の場合、約 10 K の変化で起こっていることがわかる。よって着火遅れは成形圧力よりも成形温度に強く影響を受けていると言える。

図4に図3の時刻0から有炎燃焼終了付近までの部分の拡大図を示す⁵⁾。着火遅れ期間の重量減少曲線の形状にほとんど違いがないことから、時間当たりほぼ同じ質量の熱分解ガスが放出されていると考

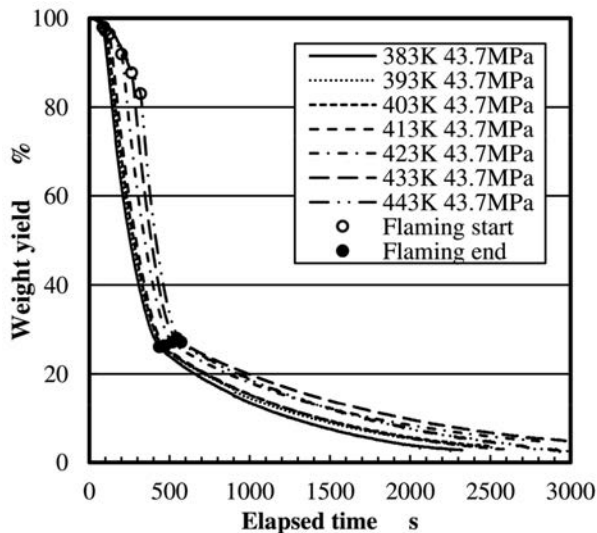


Fig. 3 Weight reduction curves for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

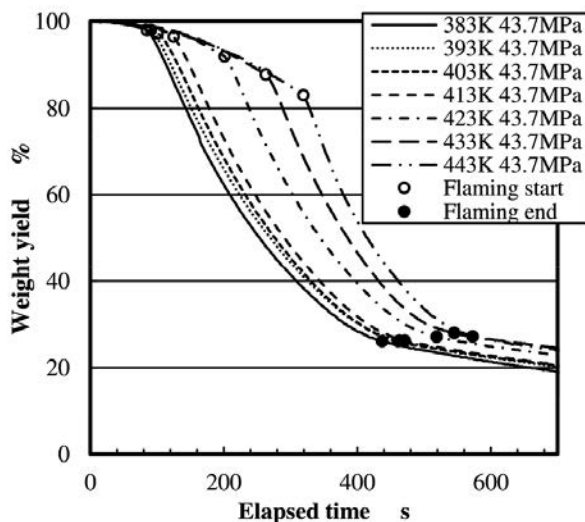


Fig. 4 Weight reduction curves for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35. (From heating start to flaming end)⁵⁾

えられるにもかかわらず着火遅れが変化していることから、成形温度の違いによって放出されるガスの成分が変化していると考えられる。よって成形圧力を変化させた時と同様に、成形温度が高くなるほど、より高融点の成分が内部空隙に充填される形で BIC が形成されるため、着火遅れの間に発生する熱分解ガスが重質になることから着火遅れが長くなったと考えられる。図4より、着火遅れの延長は、成形温度 413 K 以上で顕著となっていることから、緑茶では 413 K 以上で軟化する成分が、着火しにくいガス成分の発生に関与していると推測される。

有炎燃焼期間およびチャー燃焼期間における平均重量減少速度の成形温度に対する変化を図5、6にそれぞれ示す⁵⁾。両燃焼期間における平均重量減少速度は成形温度によって大きくは変化しないが、成形温度が高いほど有炎燃焼期間の平均重量減少速度

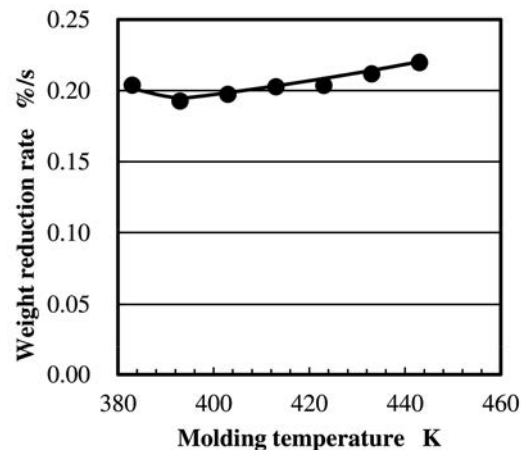


Fig. 5 Variation in weight reduction rate with molding temperature during flaming period for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

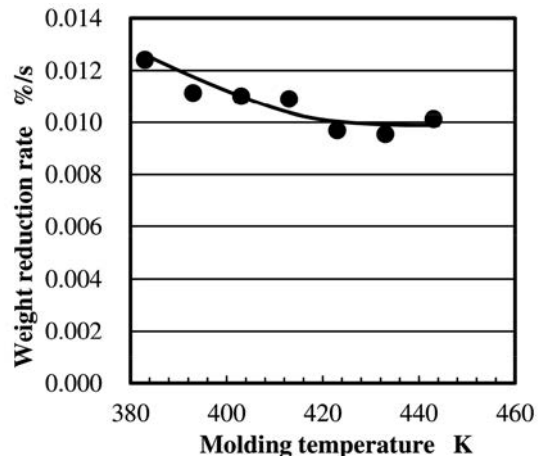


Fig. 6 Variation in weight reduction rate with molding temperature during char combustion period for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

はずか増加し、チャー燃焼期間の平均燃焼速度は減少する傾向が伺える。有炎燃焼期間の平均重量減少速度が成形温度の上昇によって増加するのは、着火遅れと逆の相関関係にあるといえる。着火遅れが長いほど、その間にBICの内部まで予熱が進むため、火炎が発生した後の熱分解ガス化の速度が速くなるためと考えられる。着火直後の燃焼挙動が、着火遅れ期間のBIC内部の予熱状態の違いによって影響を受けることは、伊東ら²⁾も指摘している。

3. BICの形状およびスケールが燃焼特性に及ぼす影響

固体燃料は一般に粒子サイズによって燃焼特性が影響を受ける。BICは石炭コークス代替を目標に開発されているため、実用的には100mm程度のスケールまで検討が必要である。前章で紹介した基礎的燃焼特性は20mmスケールの試料によるものであるため、スケールアップによって燃焼特性がどう変化するかを調査することが重要である。この点について伊東^{6,7)}はφ30mm×60mm, φ35mm×70mm, φ40mm×80mmの3種類のヒノキBIC(成形温度423K)により検討を行っている。その結果、有炎燃焼期間における単位比表面積当たりの平均質量減少速度はBICの表面積にはほぼ比例している。さらにこの関係から、有炎燃焼時間とV/S(体積と表面積の比)の間には次式の関係があると結論している。

$$t_f \propto \rho \left(\frac{V}{S}\right)^2 \tag{1}$$

ここで、 t_f は有炎燃焼時間、 ρ 、 V 、 S はそれぞれBICの密度、体積、表面積である。チャー燃焼時間 t_c についても同様に $(V/S)^2$ に比例するとしているが、実験結果のばらつきは有炎燃焼時間よりも大きくなっている。これは、チャー燃焼期間では表面の灰の状態が不安定であるためであると考察している。また、未反応率(質量残存割合)の時間変化は未反応核モデル⁸⁾によって整理できるとしている。

Kanadaら^{9,10)}はこの伊東の検討を拡張し、φ12mm~100mm, アスペクト比(BICの長さと同径の比)0.5~2の範囲における燃焼特性の変化を実験により観察している。伊東はスケール効果の検討においてBICのアスペクト比を2で一定としているが、Kanadaらの検討ではアスペクト比も燃焼速度および燃焼時間に影響を及ぼすことが示されている。試料(φ12mm~48mm)のアスペクト比の違いが有炎燃焼時間およびチャー燃焼時間に及ぼす影響をそれぞれ図7, 8¹⁰⁾に示す。この結果から、原料が同じであればアスペクト比が大きいほど $(V/S)^2$ に対して有炎燃焼時間、チャー燃焼時間ともに短くなっていることが分かる。Kanadaらはアスペクト比の違う試料についても燃焼時間を表現できる関係式として次式を提案している。

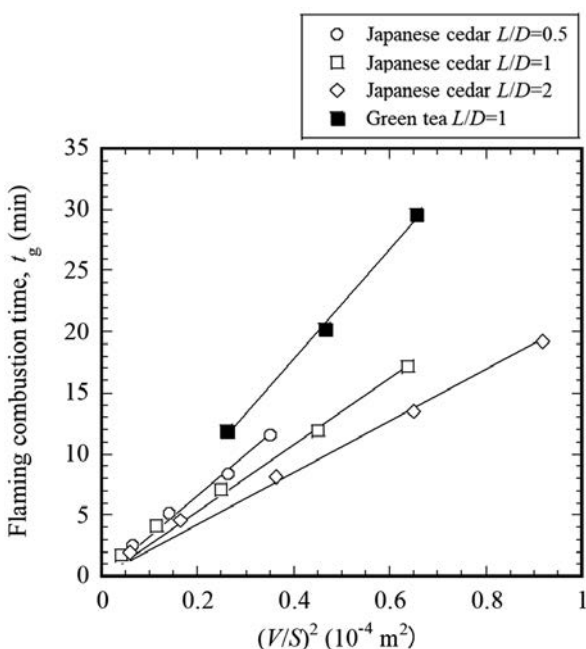


Fig. 7 Flaming combustion time versus $(V/S)^2$ for various size of BICs¹⁰⁾

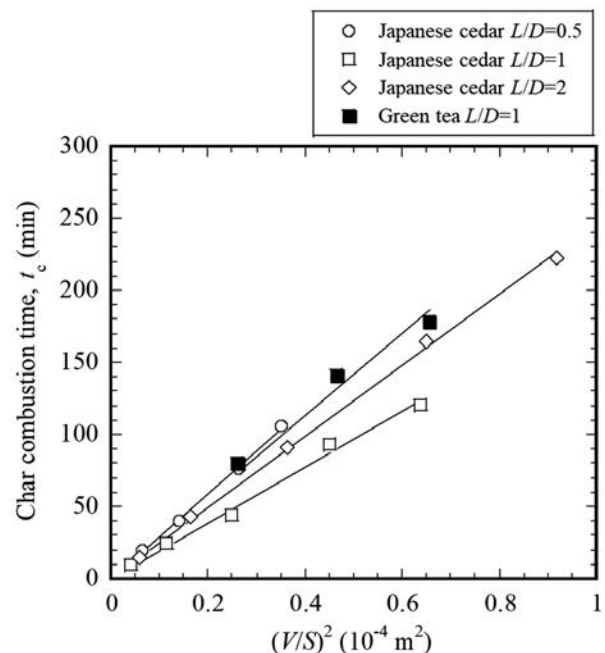


Fig. 8 Char combustion time versus $(V/S)^2$ for various size of BICs¹⁰⁾

$$t = \beta \left(\frac{V}{S}\right)^n \quad (2)$$

ここで、 β 、 n は実験定数である。

有炎燃焼時間およびチャー燃焼時間についてそれぞれ実験データから得られた定数を用いて V/S との関係を示した結果 (ϕ 12mm ~ 100mm) を図 9, 10 に示す¹⁰⁾。図 9, 10 中には杉と緑茶の 2 種類の原料の結果をプロットしてある。有炎燃焼時間については原料により違った定数の設定が必要であるが、アスペクト比の違う試料を一つの直線により近似できることが示されている。また、チャー燃焼時間については、原料の違いによらず、一つの直線によって近似が可能であるとしている。さらに、この関係式からの演繹により燃焼速度の予測式として次式を与えている。

$$v_g = \zeta_g \left(\frac{S^n}{V^{n-1}}\right) \quad \left(\zeta_g = \frac{\rho m_g / m_0}{\beta_g}\right) \quad (3)$$

$$v_c = \zeta_c \left(\frac{S^n}{V^{n-1}}\right) \quad \left(\zeta_c = \frac{\rho m_c / m_0}{\beta_c}\right) \quad (4)$$

ここで、 ρ は初期試料密度、 m_0 は初期試料質量、 m_g は有炎燃焼期間の質量減少量、 m_c はチャー燃焼期間の質量減少量、 n 、 β_g 、 β_c は実験定数である。図 11, 12 に有炎燃焼速度およびチャー燃焼速度と

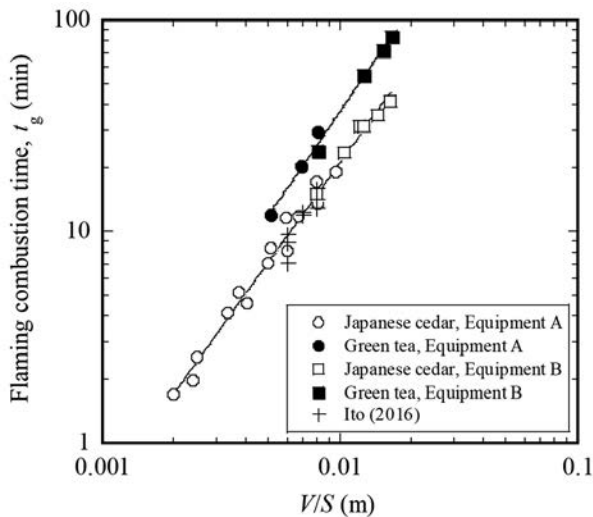


Fig. 9 Flaming combustion time versus V/S for various size of BICs¹⁰⁾

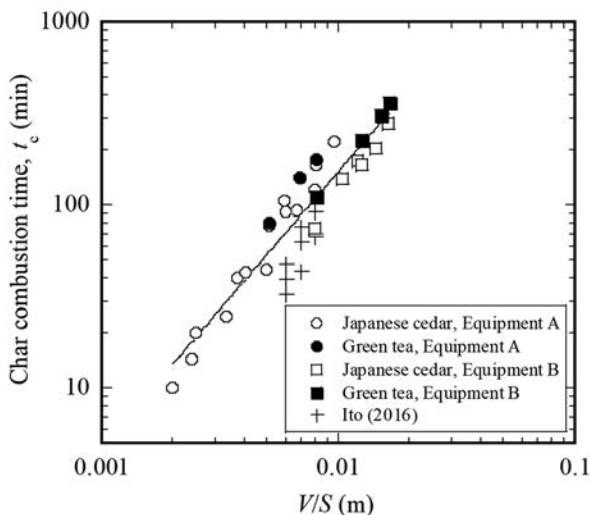


Fig. 10 Char combustion time versus V/S for various size of BICs¹⁰⁾

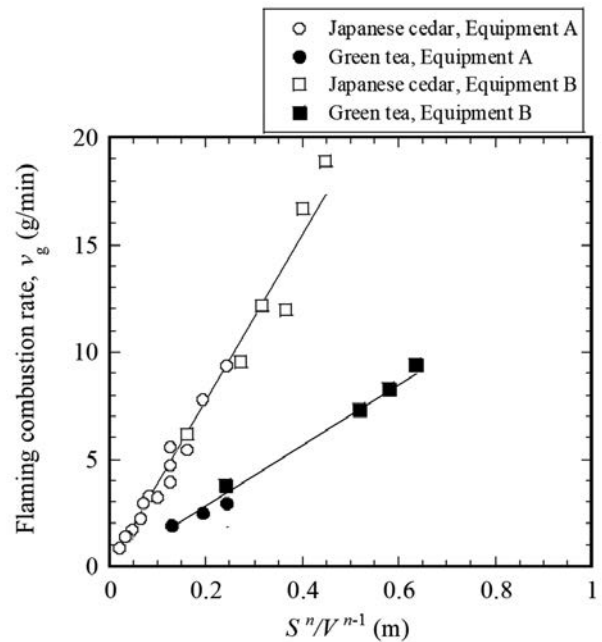


Fig.11 Flaming combustion rate versus S^n/V^{n-1} for various size of BICs¹⁰⁾

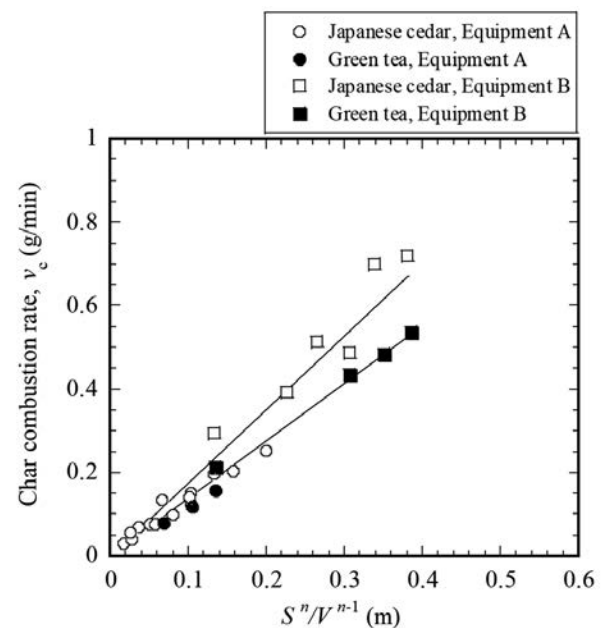


Fig.12 Char combustion rate versus S^n/V^{n-1} for various size of BICs¹⁰⁾

(S^a/V^{a-1}) の関係を示す¹⁰⁾。実験結果は式 (3), (4) で表される直線でよく近似されており、燃焼速度が (S^a/V^{a-1}) に比例していることが見て取れる。有炎燃焼速度は原料の違いにより大きく影響を受けている。これは杉と緑茶の熱分解ガス化の温度域の違いによるものとしている。チャー燃焼速度も原料の違いによりやや影響を受けているように見えるが、これは (S^a/V^{a-1}) の大きな試料 (サイズの大きな試料) では燃焼実験中に大きなクラックが発生したことにより燃焼速度が増加したためであるとしている。

4. BIC 原料の違いによる特性の変化

BIC は製造時に元素組成が変化していないことから、原料の特性を強く引き継いでいる。さらに BIC は様々な原料から製造できることが特徴の一つでもあることから、原料のどういった特性が BIC の物性および燃焼特性に影響するのかを明らかにすることが重要である。しかし、成形特性や強度特性についてはいくらかの研究が行われているが^{11, 12)}、燃焼特性についてはまだ報告は少ない。そのなかで伊東ら¹³⁾ は各種バイオマスの TGA 分析結果から得られた活性化エネルギーと元素組成、構成成分組成との関係を検討し、揮発分放出時の活性化エネルギーとバイオマス中のリグニンおよびホロセルロース含有率との関係を調査し、活性化エネルギーに対しセルロースが支配的であるとしている。この結果と BIC 燃焼モデル⁶⁾ から、燃焼時間についてはホロセルロース含有量が多いほど有炎燃焼時間が長くなると予測している。この種の検討はまだ初期段階であり、さらに多様なバイオマスについてのデータの蓄積が期待されている。

5. 今後の展望

BIC は開発当初において、まずは石炭コークスの代替燃料になり得るかの実証検討が先行し、様々な特性について系統的な研究が行われたのは比較的最近である。当初はキュポラでの石炭コークス代替が想定されていたため、空気中での燃焼特性は基礎燃焼特性としての意味合いが強く、あまり重点的には検討されていなかった。しかし最近になって、カーボンニュートラル社会実現への要求が強まり、通常の燃料としてバイオマスブリケットを使用する要求も高まった。その中で様々な原料をブリケット化できるという BIC の特徴が再認識され、バイオマス系廃棄物を扱ってきた業界から、それらの一般

燃料化の方法として期待されつつある。今後は 4 章で紹介したような、バイオマス原料の分析結果と燃焼特性との関係を明らかにしていくことが、BIC の利用拡大のために強く求められると考えられる。

参考文献

- 1) 井田民男, 中西亜貴夫, バイオマス固形物及びその製造方法, 特許第 4088933 号, 大阪産業振興機構, (2006).
- 2) H. Ito, Y. Sakai, T. Ida, Y. Nakamura, O. Fujita, Ignition Behavior of Bio-Coke (Highly Densified Biomass Fuel) in High-Temperature Air Flows, *Journal of Thermal Science and Technology*, **6** (1), 111-122 (2011).
- 3) 後藤亮介, 難波邦彦, 井田民男, 水野 諭, バイオコークスの燃焼性促進に関する基礎研究, *スマートプロセス学会誌*, **1** (2), 71-78 (2012).
- 4) 測端 学, 赤藤雄也, 水野 諭, 井田民男, 足立佑平, コーヒー滓を原料とした高硬度固形燃料の成型条件が燃焼特性に及ぼす影響, *スマートプロセス学会誌*, **2** (2), 88-93 (2013).
- 5) 測端 学, 高密度バイオマス固体燃料の基礎的燃焼挙動, *スマートプロセス学会誌*, **7** (2), 39-45 (2018).
- 6) 伊東弘行, 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, *スマートプロセス学会誌*, **5** (2), 129-135 (2016).
- 7) 伊東弘行, 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および密度の影響, *日本機械学会論文集*, **83** (852), No.17-00080 (2017).
- 8) 呂 国慶, 外山哲也, 金 熙濬, 成瀬一郎, 大竹一友, 上出光志, バイオブリケットの基礎燃焼特性, *化学工学論文集*, **23** (3), 404-412 (1997).
- 9) N. Tagami-Kanada, K. Yoshikuni, S. Mizuno, T. Sawai, M. Fuchihata, T. Ida, Combustion characteristics of densified solid biofuel with different aspect ratios, *Renewable Energy*, **197**, 1174-1182 (2022).
- 10) 金田奈美, 高強度固体バイオ燃料の固形化および燃焼特性に関する実験的解明, 近畿大学博士学位論文, (2023).
- 11) N. Tagami-Kanada, S. Mizuno, S. Cherdkeattikul, T. IDA, Estimation of maximum Bio-coke compressive strength based on chemical composition, *Mechanical Engineering Journal*, **8**

- (1), 20-00391 (2021).
- 12) S. Cherdkeattikul, Y. Morisawa, N. Tagami-Kanada, T. IDA, FTIR and chemometric study of densified solid biofuel produced under subcritical water conditions and its compressive strength affected by lignocellulose substances, *Fuel*, 342, 127835 (2023).
- 13) 伊東弘行, 徳長 稜, 野上駿平, 三浦正義, 高密度バイオマスブリケット有炎燃焼挙動に及ぼすバイオマス原材料の影響, *日本機械学会論文集*, **85** (879), No.19-00208 (2019).

著者略歴



淵端 学 (ふちはた まなぶ)

2014年4月 - 現在 近畿大学 理工学部 教授

2007年4月 - 2014年3月 近畿大学 理工学部 准教授

2002年4月 - 2007年3月 近畿大学 理工学部 講師

1999年4月 - 2002年3月 近畿大学 理工学部 助手

1994年4月 - 1999年3月 大阪大学大学院 工学研究科 機械物理工学専攻 博士後期課程 博士 (工学)

1990年4月 - 1994年3月 マツダ株式会社

1988年4月 - 1990年3月 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士前期課程

1984年4月 - 1988年3月 大阪大学 工学部 機械工学科