

バイオマス炭化物による石炭火力混焼と炭素固定

Co-firing in coal-fired power plants and carbon sequestration using biochar

大高 円*

1. はじめに

我が国のエネルギー基本計画に示された2050年カーボンニュートラルの実現に向け、各部門ではより一層のCO₂排出量削減への取り組みが進められている。近年、日本のCO₂排出量は、減少の傾向にあるものの、2020年度において約10.4億tであり、その約40%が発電所などのエネルギー転換部門から排出されている。

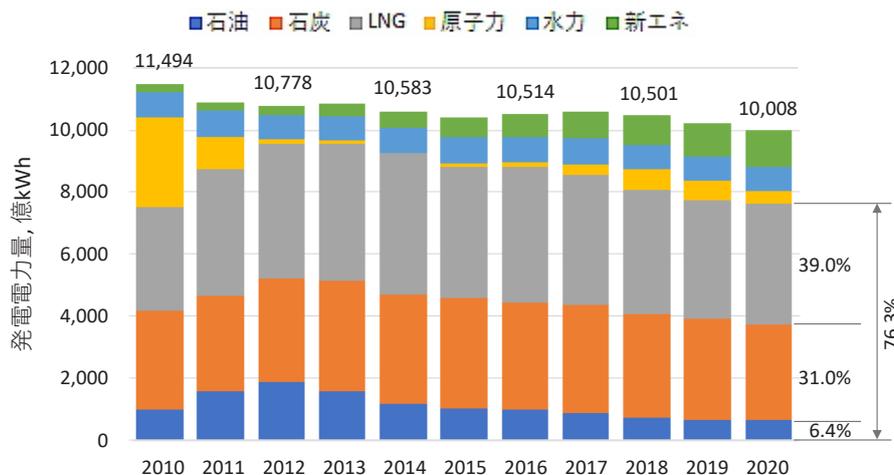
1.1 石炭火力のCO₂排出量削減

図1は、日本の発電電力量の推移を示したものであり、2020年度の総発電電力量10,008億kWhの内、76.3%が化石燃料を使用する火力発電による¹⁾。図2は、電源別のLC-CO₂排出原単位²⁾を示したものであるが、石炭、石油、LNGを燃料とする火力発電、中でも石炭火力の排出原単位が非常に高いことが分

かる。以上のことから、エネルギー転換部門のCO₂排出量を削減するには、火力発電の低炭素化、特に石炭火力のCO₂排出量削減が重要となることが分かる。

石炭火力のCO₂排出量削減方策としては、①発電効率の向上により、同量の石炭からより多くの電気を発生させる、②燃料の一部（あるいは全て）を石炭以外の低炭素な燃料に置き換える、③石炭火力自体を廃止する、などが挙げられる。

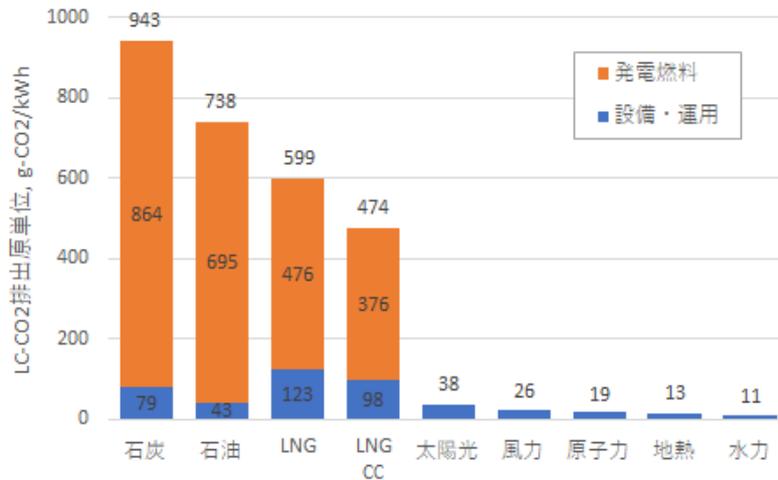
①発電効率向上の例として、石炭ガス化複合発電（IGCC）が挙げられる。従来型の石炭火力（USC）の発電効率が40%程度であるのに対し、1700℃級GTを採用したIGCCの発電効率は46%程度まで向上する³⁾。国内では、勿来IGCC発電所（福島県いわき市、出力52.5万kW）、広野IGCC発電所（福島県広野町、出力54.3万kW）が稼働中である。



出典：参考文献1)

図1 日本の発電電力量の推移

*一般財団法人電力中央研究所 エネルギー転換フォーメーション研究本部



出典：参考文献 2)

図2 電源別 LC-CO₂ 排出原単位

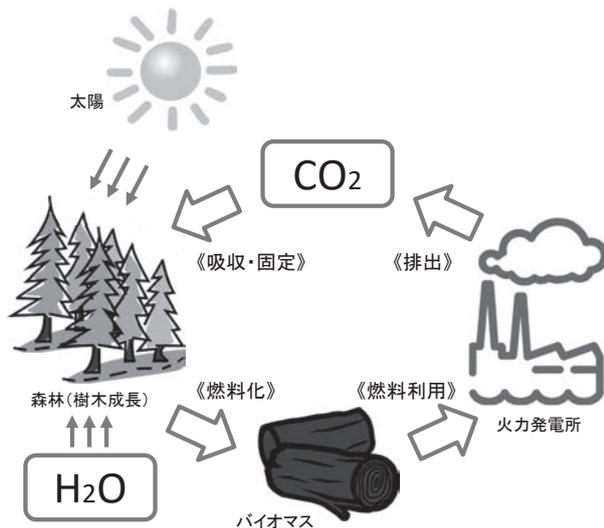


図3 木質バイオマスの燃料利用に伴う CN

たバイオマス混焼率向上に資するバイオマス炭化燃料およびバイオマス炭化物による炭素固定技術について紹介する。

2. バイオマスについて

バイオマスが再生可能エネルギーとして扱われるのは、バイオマスが有するカーボンニュートラル (CN) という特徴によるものである。図3は、木質バイオマスの燃料利用に伴う CN を示している。木質バイオマスは、燃料利用される代表的なバイオマスのひとつであるが、その成長過程で大気中の CO₂ を取り込み自身に炭素を固定化する。CO₂ の取込量 (固定量) は、樹種や樹齢によって異なるがスギやヒノキの場合、樹齢 11 ~ 20 年頃をピークに CO₂ 固定量は減少する。固定量が低下した木質バイオマスを燃料として利用した場合、これに含まれる炭素は、CO₂ として燃焼ガス中に排出され、大気中に戻ることとなるが、バイオマスに含まれる炭素は、元々大気中の CO₂ に由来することから、大気中の CO₂ は増加しない。ここで重要なのは、図3左側に示す森林を再生し、炭素を循環させる点である。もし、森林を再生せず木質バイオマスを燃料利用するだけであれば、化石燃料を利用するのと同じであり、再生可能エネルギーとはならない。

2.1 本当に CN なのか？

表1は、国内で燃料利用されている代表的なバイオマスである木質チップと、化石燃料の内、木質チップと同じ固体燃料である石炭の燃料性状を示したものである。石炭は、バイオマスが地中の圧力や熱の影響を受けながら、長い年月を経て炭化された化石燃料であり、ある意味バイオマス由来の燃料とも言

②の低炭素燃料への置換えの例としては、カーボンニュートラルなバイオマスやグリーン/ブルーアンモニアの石炭火力混焼が挙げられる。バイオマス混焼利用は、国内大手電力の石炭火力の約半数で既に実施されているが、大部分が1%未満の混焼率(燃料中に占めるバイオマスの割合)となっている。石炭火力でのアンモニア混焼利用は、実証段階にあり、国プロ等での技術開発が進められている。

日本の総発電電力量の30%強を担う石炭火力は、エネルギーセキュリティの観点から非常に重要な電源であり、電力系統においては調整力や慣性力としてその安定性に大きく寄与している。これを代替できる電源を短期間に導入することは極めて難しく、③の石炭火力廃止は、時間をかけて慎重に検討すべき CO₂ 排出量削減方策である。

本記事では、石炭火力の CO₂ 排出量削減に向け

表1 木質チップと石炭の燃料性状

分析項目		単位	木質チップ	石炭
工業分析	水分	%ar	40.0	5.3
	灰分	%db	0.4	12.5
	揮発分	%db	82.2	35.1
	固定炭素	%db	17.4	52.4
元素分析	炭素	%db	50.8	73.8
	水素	%db	6.31	4.95
	窒素	%db	0.09	1.82
	酸素	%db	42.4	6.5
	硫黄	%db	<0.01	0.49
高位発熱量		MJ/kg,db	20.76	29.75

単位添え字のarは到着基準、dbは無水基準

出典：参考文献4)

えるが、その生成には数千万年～数億年という期間が必要とされており、残念ながら再生可能資源ではあり得ない。石炭と木質チップの燃料性状を比べると、木質チップの特徴は、灰分が非常に少ないこと、揮発分が多い（固定炭素が少ない）こと、酸素が多く含まれること、窒素や硫黄が少ないこと、等が挙げられる。また、酸素の含有率が高いため、木質チップの発熱量は、石炭の約2/3に留まる。後述する炭化処理を木質チップに施すと、脱酸素が進んで発熱量は向上する。

さて、木質チップに含まれる炭素は、無水基準で約50%であり、これは樹種によらず同程度の値となる。これによると、絶乾状態の木質チップ1kgに含まれる炭素は、約500gであり、これをCO₂に換算すると約1,800g（≒500g×44/12）となる。つまり、絶乾の木質チップ1kgに含まれる炭素は、大気中のCO₂約1,800gを吸収して固定化したものと考えることができる。

一方、絶乾の木質チップを手に入れるためには、樹木を伐採・集材し、工場まで輸送し、粉碎機等により粉碎し、更にこれを乾燥させる必要がある。これら「伐採」「輸送」「粉碎」「乾燥」には何らかのエネルギーが必要であり、殆どの場合、化石燃料に由来するものとなる。伐採・集材には林業機械、輸送にはトラック等が使用され、その燃料としてガソリンや軽油などの化石燃料が消費される。粉碎に用いられる粉碎機では回転動力を必要とし、それには化石燃料または化石燃料由来の電力が消費される。また、乾燥には熱源が必要であり、その多くは化石燃料の燃焼熱によるものである。

このように、木質チップを入手する（製造する）過程で消費される化石燃料を考慮すると、大気中のCO₂は化石燃料を消費した分だけ増加することとなり、木質チップは真にCNな燃料とは言えない。も

し1kgの木質チップを入手するために消費される化石燃料が1,800g以上のCO₂を排出するのであれば、木質チップは既に再生可能エネルギーではなく、これを燃料利用することは、化石燃料を利用するのと同じか、むしろ化石燃料の利用を増やしていることになる。

バイオマスの燃料利用を検討する上では、原料となるバイオマスの調達から、輸送、燃料化、利用に至るプロセスにおいて発生する化石燃料由来のCO₂、つまりLC-CO₂（ライフサイクルCO₂）を考慮したCN性の検討が重要となる。

2.2 木質ペレット

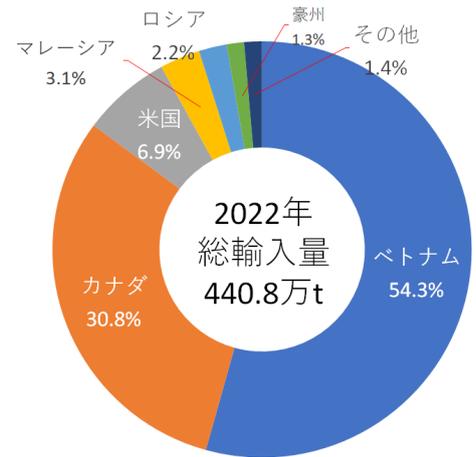
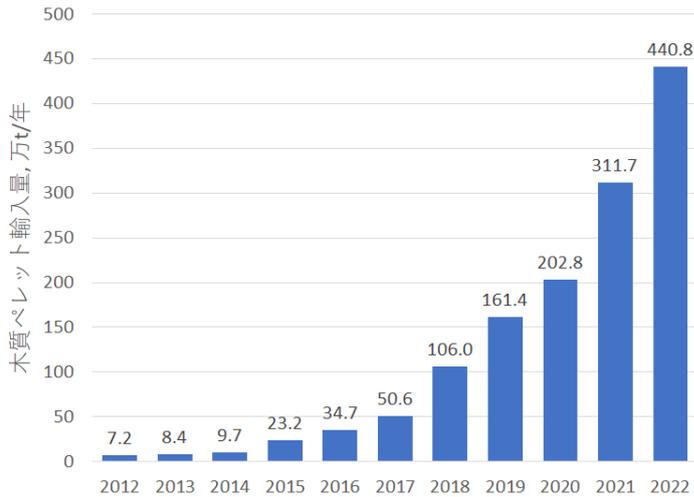
木質ペレットは、粉碎、乾燥した木質チップをペレット成形装置により円柱形（直径φ6～8mm×長さ10～30mm程）に圧縮成形したものである。一般的な木質チップに比べると、水分が10%以下と安定しており、かさ密度は500～600kg/m³と、同じ水分の木質チップの3～4倍に達する。これらの特徴から、輸出入も盛んで、欧州を中心に発電や暖房用の燃料として広く利用されている。2022年の世界の木質ペレット生産量は、4,400万tに達する。

図4は、日本に輸入される木質ペレットの輸入量推移を示したものである。その年間輸入量は、2014年まで10万t未満であったが、2015年以降急増の傾向を示し、2021年には約312万t、2022年は約441万tに達している。主な輸入先国は、ベトナム（54%）、カナダ（31%）、米国（7%）であり、近年ベトナムからの輸入が増えている。これに対し国内の木質ペレット生産量は、年々増加傾向にはあるものの2021年で15.6万tに止まる。

木質ペレットの燃料利用を考えた場合、2.1でも述べたように、輸送距離の短い（輸送に係る化石燃料の消費が少ない）国内産木質ペレットの方がCN的には望ましい訳であるが、原料ポテンシャルや生産規模の違いから、現状国内では安価で供給力の高い海外産木質ペレットが優勢である。

3. 石炭火力でのバイオマス混焼利用

石炭火力（微粉炭火力）では、燃料となる石炭を粉碎機で微粉碎してボイラに供給する。ボイラでは微粉碎した石炭（微粉炭）を燃焼し、その燃焼熱によって高温高压の水蒸気を発生させる。ボイラで発生した高温高压水蒸気により蒸気タービンを回すことで発電を行う。ボイラから排出される燃焼排ガスには燃焼灰粒子、窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO₂）などが含まれるため、ボイラ後流に設置され



出典：貿易統計より作成

図4 木質ペレット輸入量の推移

混焼方式	ラインブレンド方式	炉内ブレンド方式
バイオマス供給系イメージ		
混焼率	木質チップ：数%程度が上限	混焼率に上限はなく専焼も可能
設備改造	大幅な設備改造は不要	バイオマス専用粉砕機など大幅な改造が必要

図6 石炭火力でのバイオマス混焼方式

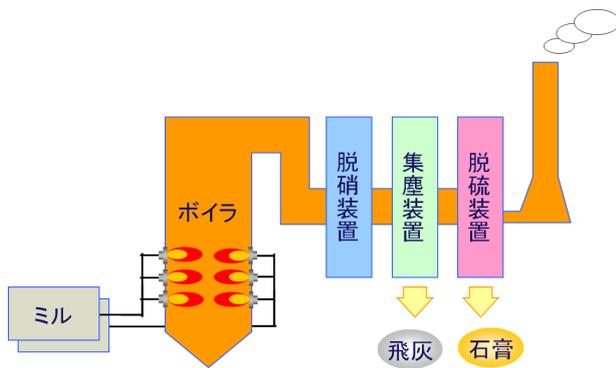


図5 石炭火力の概略系統

た脱硝装置、集塵装置、脱硫装置により、それらの燃焼排ガス中濃度を低減させた後に煙突から大気に放出する。図5に石炭火力の概略系統を示す。

3.1 バイオマス混焼方式

2.1でも紹介したとおり、国内の大型石炭火力の

一部ではバイオマス混焼が既に実施されており、バイオマスとしては木質チップや木質ペレットが採用されている。但し、ほとんどの場合、石炭に対するバイオマスの混焼率は数%に止まる。これは木質チップや木質ペレットが繊維質であるため、その粉砕性が石炭に比べ劣るためである。

石炭火力でバイオマス混焼する場合、石炭とバイオマスの混合位置により、ふたつの混焼方式が考えられる(図6)。ひとつは、石炭粉砕機の手前の石炭搬送ライン上で石炭とバイオマスを混合するラインブレンド方式、もうひとつは、バイオマス専用の搬送ライン、粉砕機、燃焼バーナを用いてボイラ炉内で石炭とバイオマスを混合(混焼)する炉内ブレンド方式である。

ラインブレンド方式は、既存の設備を利用するため、大幅な設備改造は不要であるが、鉱物である石

炭用に設計された粉砕機で石炭とバイオマスの混合物を粉砕するため、粉砕性の悪い木質チップの場合、混合率（混焼率）は、数％が上限となる。

炉内ブレンド方式は、バイオマス専用の粉砕機を新たに導入するか、既存の石炭用粉砕機をバイオマス用に改造して利用するため、石炭とバイオマスの粉砕性の差異は問題とならず、混合率（混焼率）100％のバイオマス専焼も不可能ではない。しかし、バイオマス専用の粉砕機やバーナを新設するため、導入時には大幅な設備改造が必要となる。

3.2 バイオマス炭化の特徴

ラインブレンド方式の問題は、バイオマスの粉砕性が石炭に劣る点であり、既存設備が利用可能で大幅な設備改造が不要な点は、導入コストの面からも有利である。そこでバイオマスの粉砕性向上に向けた前処理技術として炭化を紹介する。

炭化は、熱処理のひとつであり、高温の不活性／還元雰囲気下における脱酸素プロセスである。木質チップなどのバイオマスを炭化する燃料視点でのメリットとして、①粉砕性の向上、②発熱量の増加、③撥水性の発現、④腐敗等の抑制、などが挙げられる。一方、デメリットとしては、①粉塵が発生しやすい、②自己発熱性が強くなる、などが挙げられる。

3.3 バイオマス炭化物の粉砕試験⁴⁾

石炭とバイオマス炭化物に対し、試験用ローラミルを用いて実施した粉砕試験の結果を図7に示す。バイオマス炭化物の粉砕動力原単位（単位重量あたりの粉砕動力）は、石炭とほぼ同等であり、バイオマスを炭化することにより、粉砕性は大きく向上することが分かる。一方、図8、上記粉砕試験で得られた粉砕物の粒子径を示したものであり、同じ条件で粉砕された石炭とバイオマス炭化物の粒子径を比べると、バイオマス炭化物の粒子径は、石炭よりも粗くなっていることが分かる。粉砕物の粒子径は、

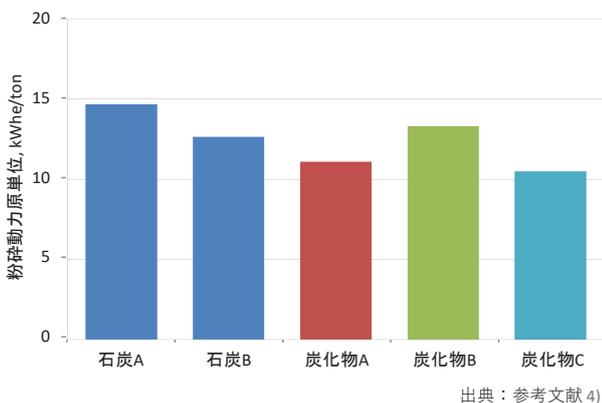


図7 粉砕試験結果 粉砕動力の比較

ボイラ内での燃焼性に強く影響する因子であるが、後述の石炭とバイオマス炭化物の混焼試験では燃焼性への影響は確認されなかった。

3.4 バイオマス炭化物の混焼試験⁴⁾

3.3の粉砕試験で得られた石炭およびバイオマス炭化物の粉砕物を燃料に、石炭燃焼試験炉（図9）を用いて石炭とバイオマス炭化物の混焼試験を実施した。石炭に対するバイオマス炭化物の混焼率は、熱量基準で0％（石炭専焼）、10％、20％、30％とした。各混焼率においてバーナ先端に形成される火炎の写真を図10に示す。混焼率を30％まで増やしても火炎の様子に変化はなく、火炎の吹き飛びなども確認されなかった。試験炉出口の燃焼排ガスに含まれるNO_xとSO₂の濃度を図11示すが、バイオマス炭化物の混焼率の増加に伴って、NO_xとSO₂いずれの濃度も低下しているのが分かる。

4. バイオマス炭化物による炭素固定

地球温暖化対策は、大気中のCO₂をできる限り増やさないようにするCO₂排出量の削減技術に止まらず、大気中のCO₂を回収して固定化するネガティブエミッション（NE）技術が求められている。代表的なNE技術として、バイオマス発電所の後流にCCS（CO₂ Capture and Storage）を設けたBECCS、大気から直接CO₂を回収するDACCS、森林によるCO₂固定、などが挙げられる。ここでは、NE技術のひとつとして期待されるバイオマス炭化物による炭素固定について紹介する。

バイオマスが大気中のCO₂を炭素として自身に固定化することは前述のとおりであるが、これを燃料利用せずに長期保管すれば、CO₂は発生せずNEとなる。但し、長期保管するためには腐敗等の要因

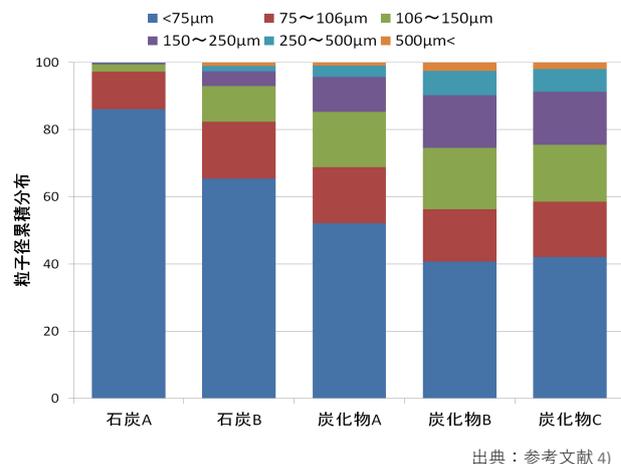
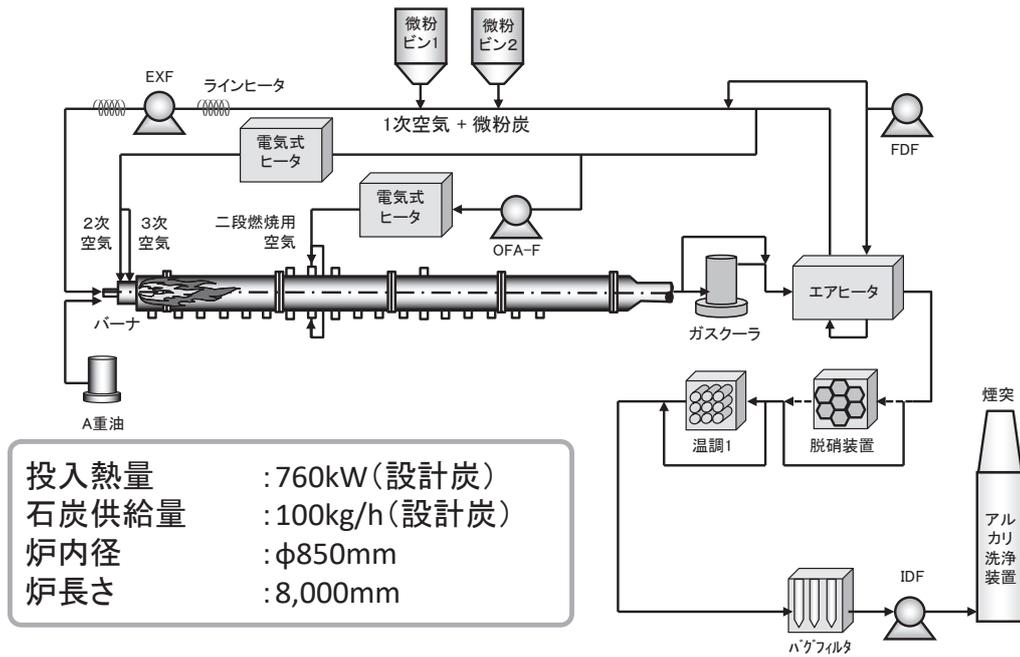


図8 粉砕試験結果 粉砕物粒子径の比較



出典：参考文献 4)

図9 石炭燃焼試験炉の概略系統と仕様

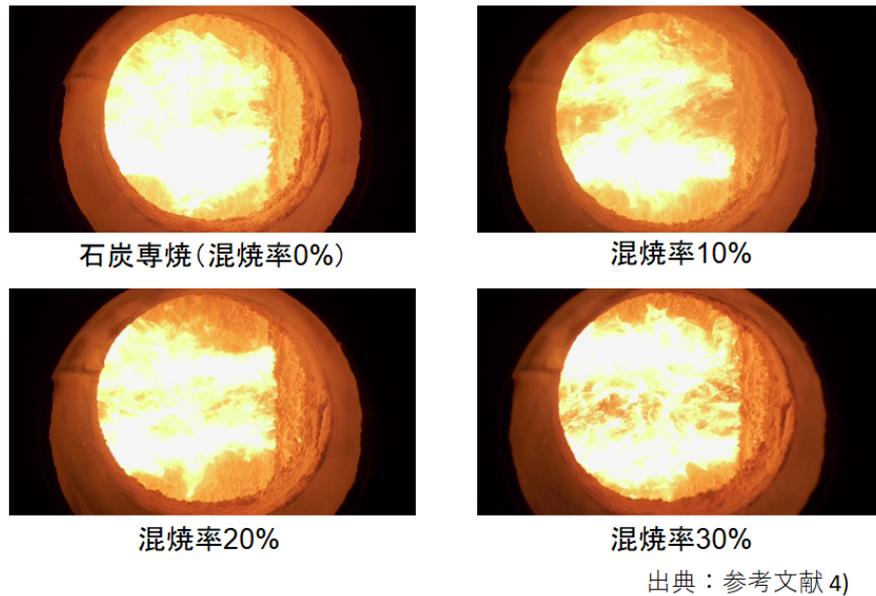


図10 バーナ先端部の火炎写真

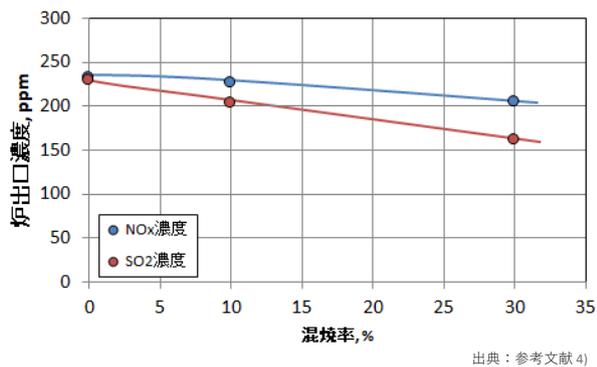


図11 燃焼排ガス中に含まれるNOxとSO₂

となる水分を取り除くなどしてバイオマスを安定な状態にする必要がある。そこで、バイオマスを炭化することにより安定な状態にして、土壌等にすき込むことで炭素固定を図る技術が提案されている⁵⁾。

バイオマス炭化物による炭素固定のプロセスのイメージを図12に示す。BECCS / DACCSのプロセスにおいて燃焼排ガス / 大気からのCO₂分離回収は不可欠であり、熱や電気を供給する必要がある。バイオマス炭化物による炭素固定では、これを森林の樹木(バイオマス)が成長する過程でバイオマス

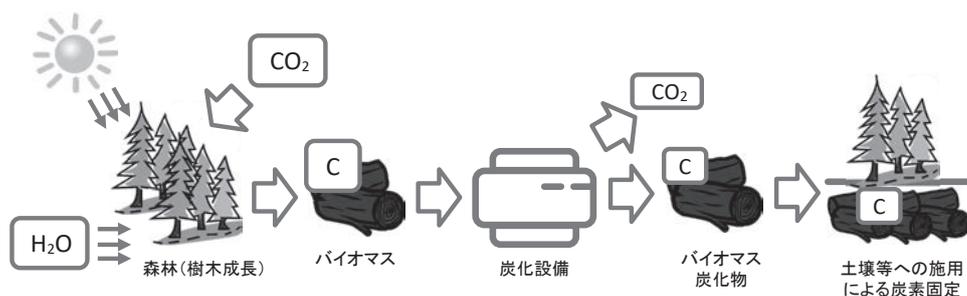


図 12 バイオマス炭化物による炭素固定

が行ってくれるので CO₂ 分離回収に人工的な熱や電気を供給する必要はない。また、炭化プロセスは、熱的に自立が可能である（炭化条件等による）ことから、炭化プロセスに供給される熱や電気は、非常に少なく済む。

BECCS や DACCS では気体の CO₂ を昇圧してパイプライン等で輸送し、さらに加圧圧縮して地下深部の帯水層等に貯留（固定化）するのに対し、バイオマス炭化物による炭素固定は、固体の炭化物に含まれる炭素を固定化することから、その輸送には鉄道やトラック等の既存のインフラが活用可能であり、昇圧や圧縮に要する動力も不要である。勿論、固定化するための地中帯水層も不要である。さらに言うと、炭素固定に用いるバイオマス炭化物には、燃料としてのクオリティが求められないことから、原料となるバイオマスとして、より低品位なバイオマスを選択することが可能となる。

5. まとめ

バイオマス炭化物の石炭火力混焼利用と、バイオマス炭化物による炭素固定について紹介させていただいた。バイオマス炭化することにより、国内の発電電力量の 3 割強を支える石炭火力でのバイオマス高混焼率利用が可能となり、大幅な CO₂ 排出量削減に貢献することができる。一方、その燃料利用においてバイオマスは不完全な CN 性を有しており、LC を考慮したバイオマスの選択が重要となる。また、バイオマス炭化物は、燃料利用に限らず、NE 技術としての可能性を持っていることから、より有効な再生可能資源としての活用が求められる。

参考文献

- 1) 令和 3 年度エネルギーに関する年次報(エネルギー白書 2022), (accessed Apr. 13 2023), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/index.htm>
- 2) 今村, 電源別のライフサイクル CO₂ 排出量を評価, 電中研ニュース, No.468, 2010.
- 3) 経産省, 次世代火力発電に係る技術ロードマップ 技術参考資料集, 平成 27 年 7 月.
- 4) 環境省 CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業, バイオ改質炭普及拡大に向けたエネルギー自立型製造プロセスの構築並びに微粉炭ボイラでの 100% 専焼技術の開発, 委託業務成果報告書, 平成 27 ~ 29 年度.
- 5) 日本クルベジ協会, (accessed Apr. 13 2023), <https://coolvege.com/>

著者略歴



大高 円 (オオタカ マロム)

1994 年 3 月北海道大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。

同年 4 月財団法人電力中央研究所入所。2001 ~ 2002 年クリーンコール

パワー研究所に出向, IGCC 実証機開発に従事。IGCC, バイオマスガス化発電, バイオマス炭化燃料化に係る研究開発に従事。

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て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、 casting 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砕し、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

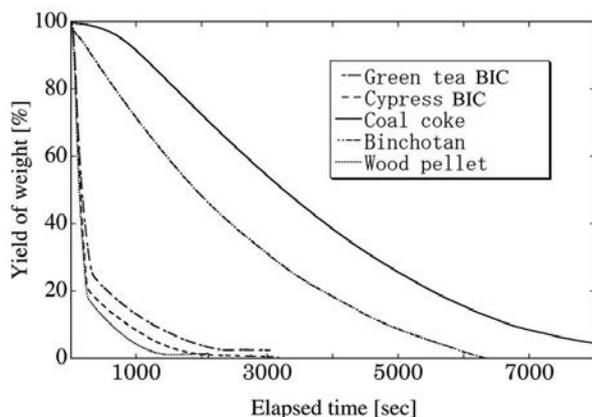


Fig. 1 Weight reduction curves for various solid fuels for $T_A=973K$

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

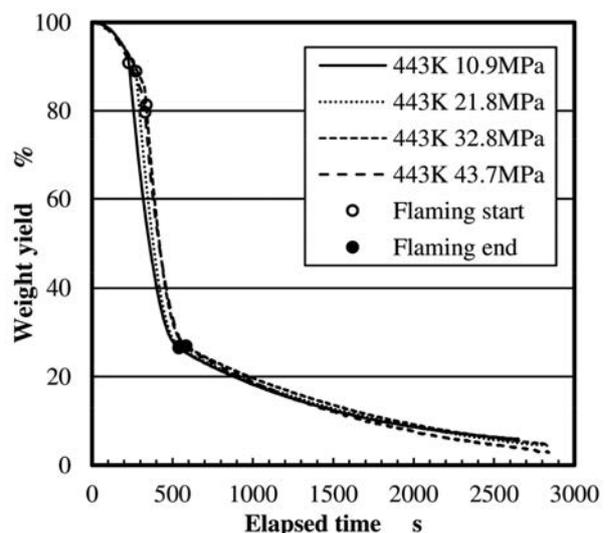


Fig. 2 Weight reduction curves for $T_M=443K$, specific gravity 1.35.⁵⁾

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

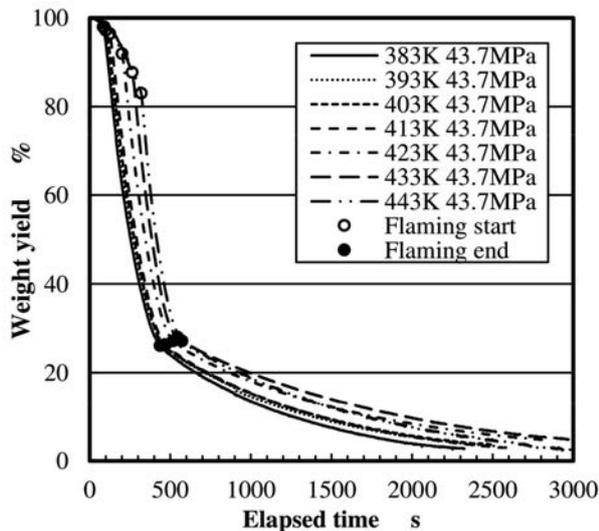


Fig. 3 Weight reduction curves for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

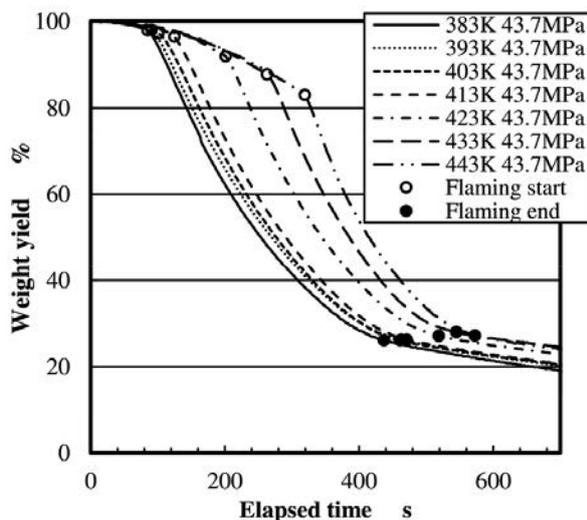


Fig. 4 Weight reduction curves for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35. (From heating start to flaming end)⁵⁾

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、着火しにくいガス化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

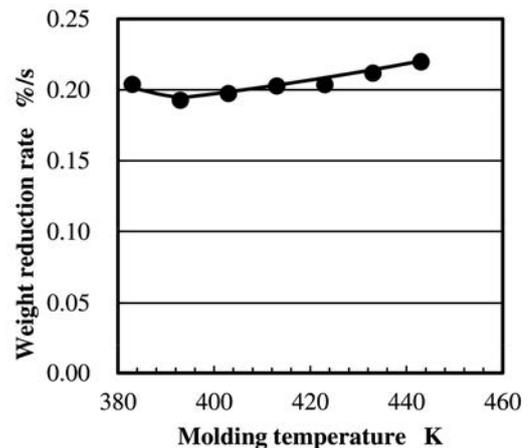


Fig. 5 Variation in weight reduction rate with molding temperature during flaming period for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

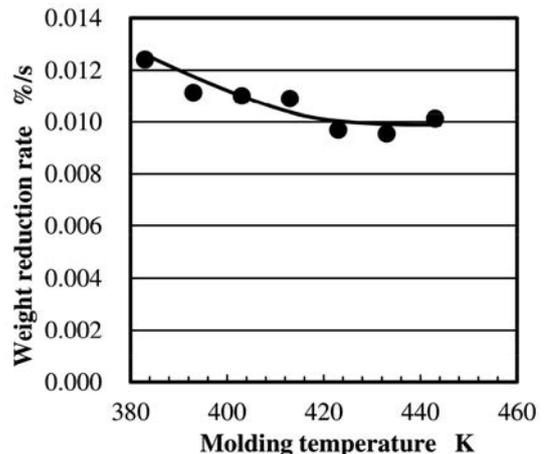


Fig. 6 Variation in weight reduction rate with molding temperature during char combustion period for $P_M=43.7\text{MPa}$, specific gravity 1.35.⁵⁾

はわずかに増加し、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。

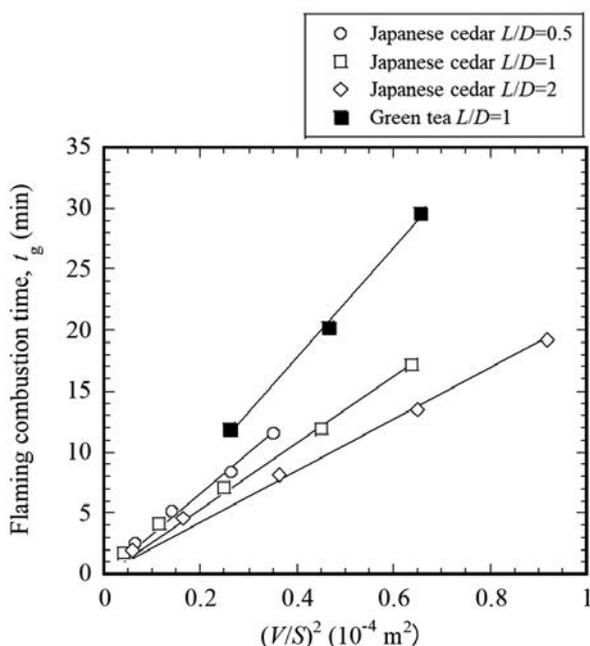


Fig. 7 Flaming combustion time versus $(V/S)^2$ for various size of BICs¹⁰⁾

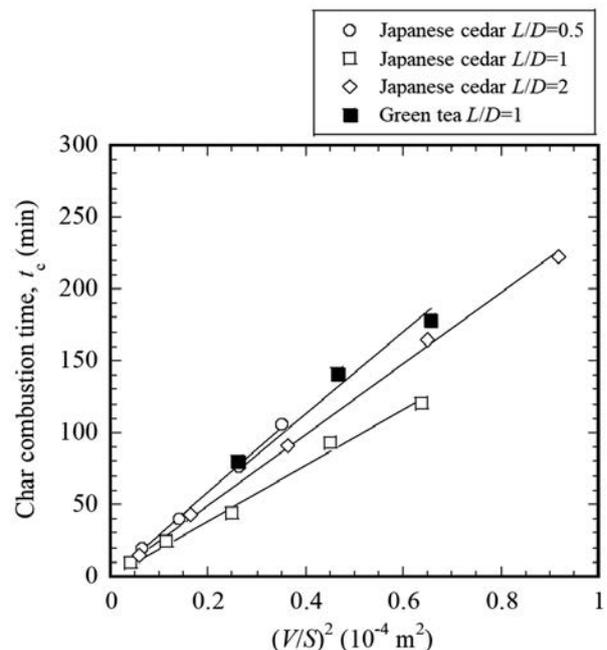


Fig. 8 Char combustion time versus $(V/S)^2$ for various size of BICs¹⁰⁾

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

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

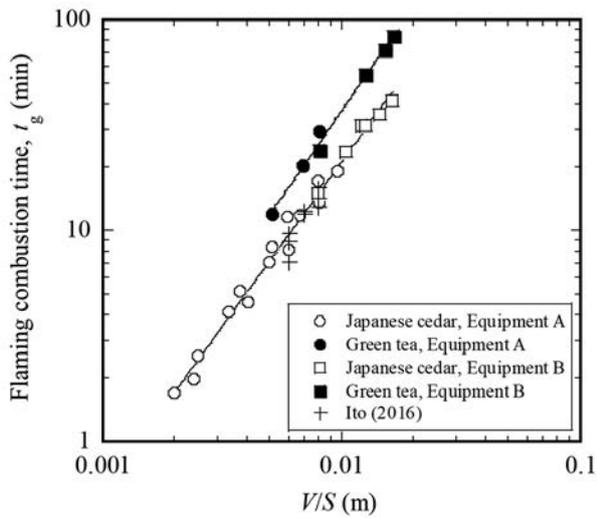


Fig. 9 Flaming combustion time versus V/S for various size of BICs¹⁰⁾

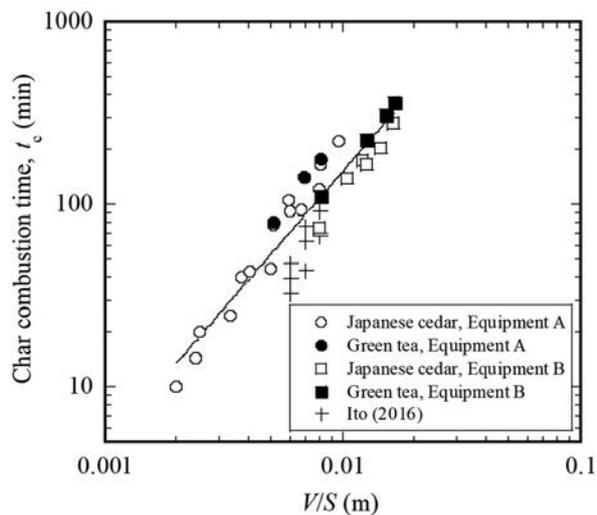


Fig. 10 Char combustion time versus V/S for various size of BICs¹⁰⁾

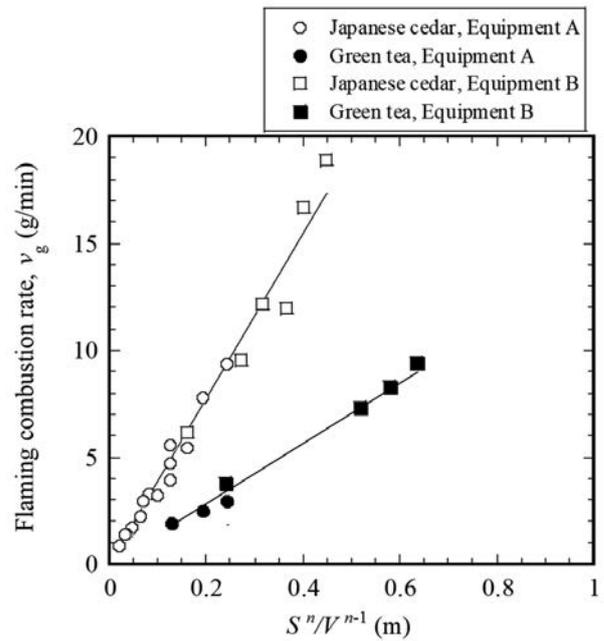


Fig.11 Flaming combustion rate versus S^n/V^{n-1} for various size of BICs¹⁰⁾

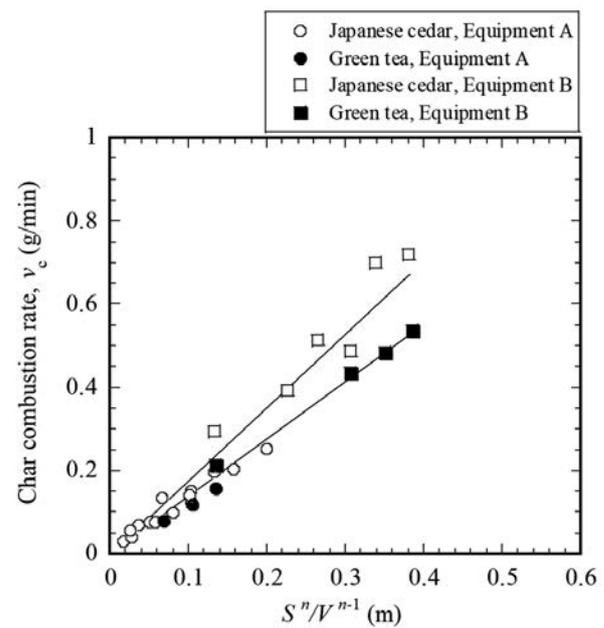


Fig.12 Char combustion rate versus S^n/V^{n-1} for various size of BICs¹⁰⁾

(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