

## 高密度バイオマスブリケットの着火燃焼特性 ～ バイオマスのエネルギー利用に向けて ～

伊東 弘行\*, 井田民男\*\*, 藤田修\*\*\*

### Ignition and Combustion Characteristics of Highly Densified Biomass Briquette

Hiroyuki ITO\*, Tamio IDA\*\*, Osamu FUJITA\*\*\*

#### 1. 緒言

地球温暖化および化石燃料資源枯渇の問題から、近年再生可能エネルギーが注目されている。カーボンニュートラルの考え方を背景とする植物由来バイオマスの燃料化もそのひとつである。カーボンニュートラルとは、植物が大気中から吸収する二酸化炭素量と、その植物をバイオマス燃料として燃焼した際に放出される二酸化炭素量を均衡させる、すなわち大気中の二酸化炭素量を人為的活動によって増大させないという概念である。バイオマスの燃料利用は古くから行われており、現在でも発展途上国を中心としてバイオマス固体を直接燃焼することにより広く利用されている<sup>(1)</sup>。固体バイオマス燃料の利用形態としては、バイオマス材をチップ状や微粉状に粉碎して使用するもの、ペレットやブリケットに1次加工して使用するもの、また炭化・ガス化の副生物として得られるチャーを利用するものがある。バイオマス材を圧縮成形してペレットやブリケット化することで、エネルギー密度を大きく出来ることから貯蔵や輸送コストを削減できるほか、燃料の均質性を高められることから燃料の燃焼制御を行う上で有利となる。

固体バイオマスの燃料化に関して、燃料製造・強度評価等の観点から多くの研究が行われている<sup>(2-6)</sup>。一方、永橋ら<sup>(7)</sup>が指摘しているように、燃焼特性に関しては、個々

の研究論文として確認できるものは少ないのが現状である。製造したバイオマス燃料を燃焼してエネルギーを取り出す上で、燃料の燃焼特性を理解することは、効率のよい最適な燃焼機器の設計という観点から非常に重要である。

本研究では、高密度固体バイオマスブリケットであるバイオコークス(Bio-coke: 以下 BIC と表記)<sup>(8)</sup>を、燃焼炉で加熱した際の熱分解・着火・燃焼特性を調べた。BICは、鉄溶解炉の石炭コークス代替燃料として開発された高密度・高硬度のバイオマスブリケットの呼称であり、木質材は勿論のこと廃棄物等あらゆる植物由来のバイオマス材から製造できることから、原材料資源調達が比較的容易かつ低コストという特長があり、今後、BIC燃料の利活用が期待されている。しかしながら、BICの燃焼特性に関しても他の固体バイオマス燃料と同様に基礎研究が少なく、BICの基礎燃焼特性、とくにボイラー燃焼炉等を想定した燃焼特性に関しては筆者らの研究<sup>(9-11)</sup>を除いてほとんど見られない。今後、BICの利用範囲拡大および最適な燃焼形態、燃焼器形状や運転条件を決定するには、BICの基本的な燃焼特性を把握する必要がある。

本稿では、平成20年度に北海道下川町で行われた「低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証事業」で取り上げられたタデ科の多年草であるイタドリを原料とするBICに焦点を当て、この燃焼現象に関わる基本的な性質、熱分解および燃焼特性を紹介する。

#### 2. イタドリ BIC の基本的な性質

##### 2.1 イタドリ BIC の製造および物理的性質

北海道下川町内に自生し用途の少ない多年草のイタドリをBIC原材料として使用した。これは下川町内にある

\*准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*准教授 近畿大学理工学部 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Kinki University

\*教授 北海道大学大学院工学研究院 機械宇宙工学部門

Professor, Div. of Space and Mechanical Engineering, Hokkaido University

ビニルハウスの暖房用燃料への使用を想定したもので、消費地にて安価に調達出来る利点がある。収集時のイタドリの外観写真を図1に示す。収集されたイタドリは自然乾燥の後、粉碎器で破砕後、金型に充填して加熱圧縮成型する。BICは使用する金型の形状、寸法により任意に成型できるが、ここではφ48mm×85mmの円筒形状とした。植物由来のバイオマス試料は主に、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンから構成されることが知られている。充填試料を炭化開始以下の温度に加熱しながら加圧保持することで、試料中のリグニンおよびヘミセルロースが軟化あるいは溶解して結合剤として作用し、高密度かつ高硬度のBICが形成される。図2にイタドリBICの外観写真を示す。



図1 イタドリ外観

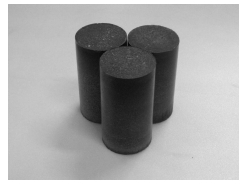


図2 イタドリBIC外観

表1に、イタドリ、木質ペレット(数種の平均値)<sup>(12)</sup>および瀝青炭<sup>(13)</sup>の元素分析結果を示す。イタドリは、木質ペレットよりも炭素割合、発熱量ともに若干小さいが概ね近い値を示していることがわかる。このイタドリをBICに加工することで密度は1300kg/m<sup>3</sup>程度となるが、これは通常の木質ペレットの密度600kg/m<sup>3</sup>のおよそ2倍強であり、エネルギー密度はイタドリBICの方が大きい。

表1 イタドリの元素分析結果

	イタドリ	木質ペレット <sup>(12)</sup>	瀝青炭 <sup>(13)</sup>
GCV <sup>a</sup> [kJ/kg]	17890	20300	32020
C [wt%]	47.72	50.3	77.22
H [wt%]	5.95	5.7	5.60
N [wt%]	0.47	0.22	1.31
Water [wt%]	6.11	7.7	-

a : Gross Calorific Value

## 2.2 イタドリ BIC の熱分解特性

イタドリ BIC の熱重量分析結果の例を図3に示す。熱重量分析には、示差熱天秤（真空理工 TGD-5000RH 型）を用い、試料質量20mg、昇温速度5K/minで、空気中および窒素雰囲気中にて実施した。図3の結果より、水分、揮発分および固定炭素分は、それぞれ10wt%、70wt%およ

び13wt%程度であることがわかる。また、水分の蒸発は400K以下、揮発分の放出は約450K以上で見られる。

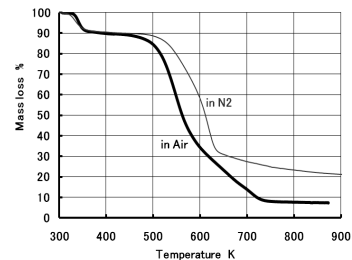


図3 イタドリBICの熱重量分析結果

熱重量分析結果(図3)から、窒素雰囲気中の水分および揮発分の放出による質量減少について、それぞれアレニウス則から導かれる式(1)を適用し、図4に示した。

$$\ln\left(\frac{1}{m} \frac{dm}{dt}\right) = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (1)$$

ここで、m：水分あるいは揮発分の残留質量、t：時間、A：頻度因子、E：活性化エネルギー、R：気体定数、T：温度を示す。

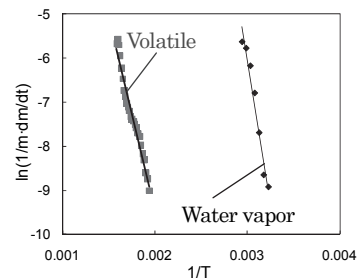


図4 水分および揮発分のアレニウスプロット

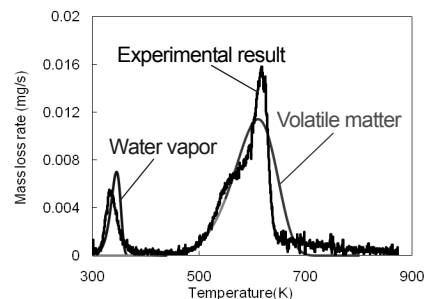
図5 水分および揮発分放出特性(窒素雰囲気中)  
(アレニウス式算出値と実験値の比較)

図4より、水分蒸発と揮発分放出の活性化エネルギー(E)および頻度因子(A)はそれぞれ、水分に対し  $A=1.759 \times 10^{14}$  [1/s],  $E=107.7$  [kJ/mol], 揮発分に対し  $A=3.372 \times 10^3$  [1/s],  $E=73.40$  [kJ/mol]を得る。これらの値を用いた熱重量

分析における質量減少の予測値と、実験結果を比較した結果を図5に示す。図より、窒素雰囲気中の質量減少は、ピーク値に若干の違いは見られるものの、水分および揮発分の放出にアレニウス式を適用することで比較的良く表現できることがわかる。

### 3. イタドリ BIC の基礎燃焼特性

#### 3.1 燃焼実験装置

ボイラー燃焼炉内における燃焼状態を想定し、大気圧下で高温空気流中に置かれたイタドリ BIC の着火および燃焼挙動を調べた。図6に、使用した基礎燃焼実験装置概略を示す。BIC を内径 100mm の燃焼炉内中央に吊るし、BIC 下端面に所定の温度(473~873K)に予熱された空気を吹き付ける。空気流量は 550NL/min. に設定した。供給する予熱空気条件が安定した後に BIC を燃焼炉内に投入し、BIC の質量減少、下端面温度(IR カメラ計測)、および BIC 近傍ガス温度(T/C 計測)を計測した。

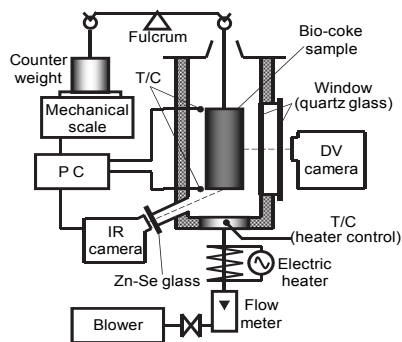


図6 BIC 基礎燃焼実験装置概略

#### 3.2 イタドリ BIC の着火挙動

イタドリ BIC を予熱空気中においた場合、BIC 下端面が赤熱して燃焼する表面燃焼(図7 (a))、および BIC 全体が火炎に包まれて燃焼する有炎燃焼(図7 (b))、の2つの燃焼形態が観察される。

BIC の質量減少への予熱空気温度の影響を調べた結果を図8に示す。図中、急激な質量減少が見られる部位において BIC の燃焼が観察されている。空気温度 473K では図3の熱分解開始温度 450K より高い空気温度条件であるが、60min.以内に着火は見られなかった。空気温度が 523K-573K の場合、有炎燃焼のみが観察され、質量減少の勾配変化は一段であった。これに対し、空気温度が 598K-873K の場合には、最初に表面燃焼、その後には有炎燃焼と質量減少の勾配変化が二段あることが確認され、供給空気温度により質量減少の時間履歴が異なることがわかる。

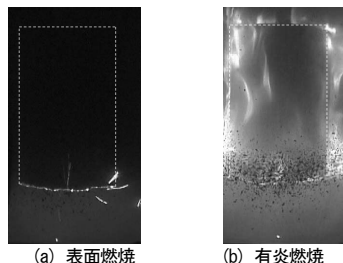


図7 BIC の燃焼形態

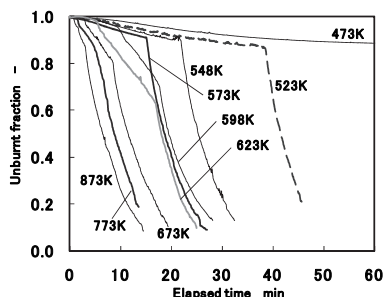


図8 BIC 質量減少への空気温度の影響

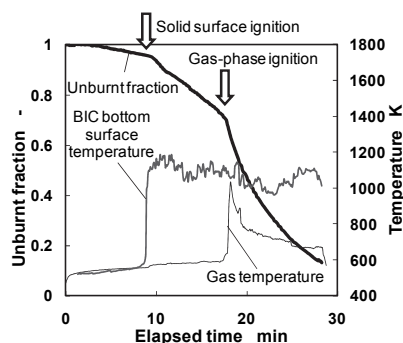


図9 空気温度が高い(598K)場合の着火挙動

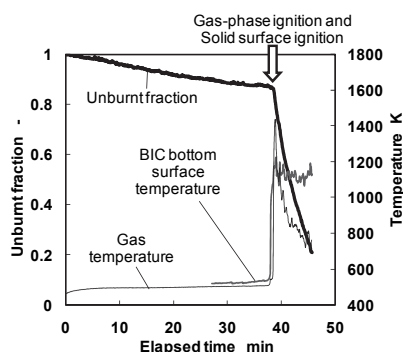


図10 空気温度が低い(523K)場合の着火挙動

空気温度が高い( $\geq 598\text{K}$ )場合、図9に見られるように、表面着火(約 9min.時)が気相着火(約 17min.時)に先行して生じた。一方、空気温度が低い( $\leq 573\text{K}$ )場合、図10に見

られるように、長い加熱時間を経た後、表面着火と気相着火がほぼ同時(約 38min.時)に発生するのが観察された。

このように供給空気温度により着火形態が異なるのは、BIC 表面酸化反応による表面温度上昇が開始されるまでに、BIC 内部にどれだけの領域の予熱層が形成されるかによると考えられている<sup>(10-11)</sup>。空気温度が高い場合には、大きな熱流速により BIC 表面温度が上昇しやすいが、BIC 内部には表面近傍の狭い予熱領域しか形成されない。これにより、加熱開始後の早い時期に表面着火が生じるが、BIC 内部温度上昇が遅れることから気相着火を生じるのに十分な熱分解ガスが放出されず、気相着火に至らない。一方、空気温度が低い場合には、BIC 表面酸化および表面温度上昇に時間がかかることから、長い時間をかけて BIC 内部の広い領域が予熱される。そして、ひとたび表面酸化反応が開始されると BIC 内部の広い範囲が熱分解温度を超え、気相着火が生じるのに十分な量の熱分解ガスが放出される。この結果から、空気温度が低い場合には表面着火と気相着火がほぼ同時に生じる。これら加熱に対する BIC 内部温度分布の形成過程に BIC の熱拡散率 ( $\alpha = \lambda / \rho C$ ,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\rho$ : 密度,  $C$ : 比熱) が寄与しており、さらにこれには BIC の持つ高密度という特性が影響しているものと考えられる。

### 3.3 イタドリ BIC 有炎燃焼時の質量減少速度

気相着火に続いて見られる、有炎燃焼時の BIC 質量減少速度への供給空気温度の影響を調べた。有炎燃焼時の BIC 質量減少速度は、BIC からの熱分解ガス放出速度と密接に関連していると考えられる。図 11 に、有炎燃焼時の質量減少速度の変化を示す。

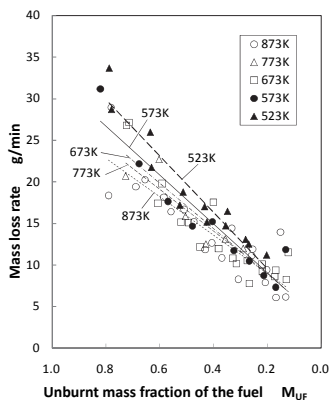


図 11 有炎燃焼時の質量減少速度への空気温度の影響  
(空気流量 550 L/min.)

図 11 より、有炎燃焼時の質量減少速度は、供給空気温度が低いほど大きいことがわかる。この傾向はとくに有

炎燃焼開始直後において顕著である。これらは、空気温度が低い方が有炎燃焼時、とくに有炎燃焼開始直後において熱分解ガス放出速度が大きいことを意味しており、上述の着火形態が空気温度により異なる要因とも合致する。すなわち、有炎燃焼開始前の予熱領域の広さが有炎燃焼時の熱分解ガス放出速度、ひいては質量減少速度に影響を与えるものと考えられる。

熱的に厚いバイオマス燃料の燃焼に関して、従来幾つかの研究がなされている<sup>(14-15)</sup>が、予熱過程の違いによる燃料内部温度分布の影響に関して考慮されているものは見られない。上で述べたように、高密度、大きな寸法など熱的に厚いバイオマス燃料の着火および燃焼過程に予熱履歴が少なからず影響を与えるため、この影響について十分に考慮する必要のあることがわかる。

### 4. イタドリ BIC の熱分解ガス放出特性

BIC 熱分解ガス中の水分および揮発分割合は気相着火のし易さや燃焼速度等に影響を与えることから、水分と揮発分それぞれの放出速度を別々に見積もることは BIC の着火および燃焼特性を把握する上で意義深い。BIC 加熱にともなう水分と揮発分それぞれの放出特性を精度よく表現出来るモデル構築を試み、さらにそのモデルを用いて BIC 含水率の水分と揮発分それぞれの放出特性への影響を調べた。

#### 4.1 小型 UFA(Universal Flammability Apparatus)実験装置

BIC 試料を窒素雰囲気中において熱流束一定にて加熱した場合の質量減少を調べるため、小型 UFA<sup>(16)</sup>実験装置を用いて加熱実験を実施した(図 12)。BIC 下端面から採取した試料(φ20mm×10mm)を外径 35mm, 内径 33mm のステンレス製正方形試料ホルダー中央に、断熱材を介して固定した。試料上部に設置されたタングステンランプヒータにて BIC 試料表面を加熱し、電子天秤により試料の質量減少を測定した。予め Gardon 型熱流束計を用いて加熱面に入射する熱流束を検量した。サンプルホルダー周囲を石英管で覆い、試料下方より窒素ガス(50NL/min.)を供給することで BIC 試料の外気による酸化を防いだ。

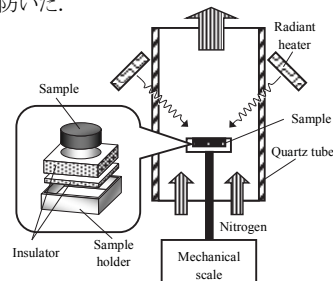


図 12 小型 UFA 実験装置概略

## 4.2 熱分解ガス放出特性の解析モデル

円柱 BIC 試料の片側端面を輻射加熱した際の、試料からの水分および揮発分放出を見積もる一次元解析モデルを作成し、小型 UFA 実験を模擬する数値計算を行った。周囲を断熱された試料の片側端面 ( $x=0$  mm) を一定の熱流束で加熱し、BIC 試料内部温度上昇、水分および揮発分放出を見積もった。試料サイズは UFA 実験と同様  $\phi 20$  mm  $\times$  10 mm の円柱形状、BIC 初期密度  $\rho = 1300$  kg/m<sup>3</sup>、BIC 初期含水率 MC = 11.1 % とした。解析には以下に示す仮定を用いた。(a) モデルは一次元として扱い、半径方向への温度分布は生じない。(b) 試料周囲 (とくに加熱面) の周囲ガス流れの影響は無視する。(c) 水分の蒸発潜熱は考慮するが、燃料の熱分解および酸化にともなう反応熱は考慮しない。(d) 水分および揮発分の放出速度 (熱分解パラメータ) はそれぞれアレニウスの式で与え、各々ガス化すると直ちに BIC 加熱面から放出される (但し放出ガスは入射熱流束には影響を与えない)。(e) 熱分解ガス放出により試料質量は減少するが、体積は不変とする (密度が減少する)。(f) 試料の熱物性値の温度依存性は考慮しない。(g) 試料加熱面表面には灰色体近似を適用する。試料内部のエネルギー保存式、水分と揮発分に関する質量保存式を考慮し、陽解法を用いて式を離散化し計算を行った。境界条件は加熱面側では輻射入熱と放射熱損失を考慮し ( $\lambda$ ; 熱伝導率,  $T$ ; 温度,  $\varepsilon$ ; BIC 試料表面の放射率(0.95 と仮定),  $q$ ; 加熱熱流束,  $\sigma$ ; ボルツマン定数,  $T_s$ ; BIC 試料加熱面温度), 他端面側では断熱とした。

本研究で使用したイタドリ BIC の熱伝導率( $\lambda$ )および比熱( $C$ )は未知であるが、次に示す UFA 実験結果と本解析モデルを用いた計算結果の熱分解ガス放出のピーク時間が一致するよう与えた。この際、これらの物性値は、木材に対して知られている値<sup>(17)</sup>の範囲に納まるように与え、 $\lambda = 2.200 \times 10^{-4}$  W/mmK,  $C = 1300$  J/kgK とした。

## 4.3 熱分解ガス放出速度の時間変化

小型 UFA を用いた加熱実験結果と、本研究で用いた解析モデルによる計算結果の比較を行った。図 13 に、加熱熱流束  $50$  kW/m<sup>2</sup> の場合の比較を示す。計算により得られた質量減少は、小型 UFA 実験結果と比較して放出の開始時期および放出ピークに若干の差異は見られるものの、比較的傾向を表現出来ていることがわかる。BIC 試料から放出されるガス (水分+揮発分) 量は、加熱開始からある期間は比較的一定に近い値を示すが、その後 (図 13, 4.7 min. (計算値) 経過後) 急激に増加しピークを示す。同条件における BIC 試料内部温度の変化 (計算結果) を

図 14 に示す。本研究で使用した BIC 試料は有限の長さ (10 mm) を持ち、かつ水分を約 10 wt% 程度含有する。水分の蒸発する温度 373 K 位置の時間推移を見ると、試料全体が 373 K 以上に加熱されるまでの時間すなわち試料中の水分が蒸発するまでの時間はおおよそ 4.7 min. であることがわかる。また 4.7 min. 経過後には急激な試料温度上昇が見られる。このことから、有限長さの BIC 試料を加熱する場合、試料中に水分が残っている間は試料内部の温度上昇が緩やかであるが、水分が抜けきった後に急激な温度上昇が見られるようになることが分かる。仮に BIC 試料が無限長さを有している場合には、緩やかな内部温度上昇が続き放出ガス量は一定の値を維持するものと予想される。BIC 試料の水分放出完了後の急激なガス放出速度の増大は試料長さが有限であることに起因していると考えられるため、以降の議論ではこの急激なガス放出速度増大がみられる以前の時間について扱う。

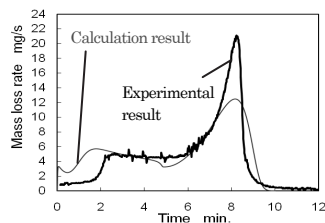


図 13 実験結果と計算結果の比較

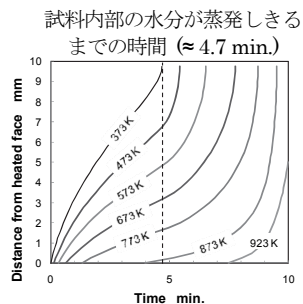
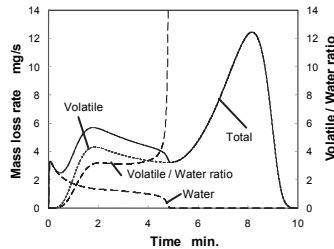
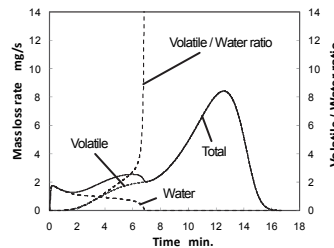
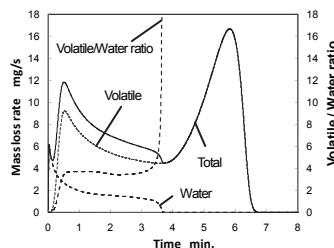


図 14 BIC 試料内部温度変化 (50 kW/m<sup>2</sup>)

図 15 に、BIC 試料からの揮発分および水分放出速度の計算結果を示す。加熱開始後すぐに水分の放出が始まり、その後緩やかに放出量は減少している。揮発分放出は水分の放出にわずかに遅れて開始し、早い時期 (1.8 min. 程度) に小さなピークを示した後に緩やかに減少している。揮発分/水分の放出速度比を同時に示したが、加熱開始後 1.8 min. から 4 min. の間に総ガス放出速度は緩やかに減少している一方で揮発分/水分比はほぼ一定であること、すなわち放出ガス中の水分割合はほぼ一定であることがわかる。



図 15 放出ガス中の揮発分および水分 (50 kW/m<sup>2</sup>)図 16 放出ガス中の揮発分および水分 (25 kW/m<sup>2</sup>)図 17 放出ガス中の揮発分および水分 (100 kW/m<sup>2</sup>)

#### 4.4 熱分解ガス放出速度への加熱熱流束の影響

図 16, 17 に 25 kW/m<sup>2</sup> および 100 kW/m<sup>2</sup> の計算結果をそれぞれ示す。加熱熱流束が小さい図 16 (25 kW/m<sup>2</sup>) では図 15 (50 kW/m<sup>2</sup>) とは異なり揮発分放出が緩やかに開始され早い時期の揮発分放出速度のピークは見られない。これは 25 kW/m<sup>2</sup> の場合には加熱熱流束が小さく、BIC 加熱面付近の温度上昇が遅れることにより揮発分ガス放出も遅れるためと考えられる。この結果、放出ガス中の揮発分／水分比は最初小さく、その後徐々に上昇することになる。一方、加熱熱流束が大きい図 17 では、加熱開始後の早い時期に揮発分ガス放出の大きなピークが現れ、総ガス放出速度も大きくなる。この時、揮発分ガス放出開始後の揮発分／水分比が時間によらずほぼ一定の値で推移する、すなわち放出ガス中の水分割合は大きく変化していない。このときの揮発分／水分比は 3.7 程度であり、BIC 本来の値 (7.0 程度) に比べて小さく、水分が揮発分に先行して放出されていることが窺える。この要因として、BIC の熱拡散率が十分大きく試料加熱面側が揮発分放出温度に達するよりも試料内部が水分蒸発温度に達し易いことが挙げられる。水分が先行して放出され易

いことから、本研究の範囲ではこの期間に得られる放出ガスは、BIC 本来の揮発分／水分割合から予想されるよりも着火、燃焼し難い組成であると考えられる。

#### 5. 結言

イタドリを原料とする高密度固体バイオマスブリケット(BIC)の熱分解、着火および燃焼特性を調べた。その結果、着火前の加熱履歴(加熱速度)が BIC 内部温度分布、放出ガス成分(揮発分／水分割合)については着火形態および燃焼特性に大きく影響することがわかった。今後 BIC の利活用を進める上で、これら熱特性と BIC 製造上の特性から、最適な製造・燃焼形態を調査する必要がある。

#### 参考文献

- (1) C.Wang, F.Wang, Q.Yang, R.Liang, "Biomass and Bioenergy" 33, (2009), pp. 50-56.
- (2) S.Sadaka, S.Negi, "Environmental Progress and Sustainable Energy" 28-3 (2009), pp.427-434.
- (3) T.Honjo, T.Ida, M.Fuchihata, H.Sano, "Journal of the Japan Institute of Energy" 84 (2005), pp.142-148.
- (4) P.Gilbert, C.Ryu, V.Sharifi, J.Swithenbank, "Fuel" 88 (2009), pp. 1491-1497.
- (5) O.C.Chin, K.M.Siddiqui, "Biomass and Bioenergy" 18 (2000), pp. 223-228.
- (6) D.Singh, "Agricultural wastes" 13 (1985), pp.189-196.
- (7) 永橋, 村上, 雑賀, "日本燃焼学会誌 (in Japanese)" 51 (158) (2009), pp.310-317.
- (8) T.Ida, A.Nakanishi, Osaka TLO, Patent No. 4088933 (2006) Japan.
- (9) 伊東, 酒井, 井田, 藤田, "日本燃焼学会誌" 第 53 巻 164 号 (2009), pp.1-6.
- (10) H.Ito, Y.Sakai, T.Ida, Y.Nakamura, O.Fujita, "Proc. ASME/JSME 8<sup>th</sup> Thermal Engineering Joint Conference" (2011), AJTEC2011-44145.
- (11) H.Ito, Y.Sakai, T.Ida, Y.Nakamura, O.Fujita, "J. Thermal Sci. Tech." Vol.6, No.1 (2011), pp.111-122.
- (12) I.Oberberger, G.Thek, "Biomass and Bioenergy" 27 (2004), pp.653-669.
- (13) E.Kharbat, K.Annamalai, C.Gopalakrishnan, "Combust. Flame" 100 (1995), pp.413-421.
- (14) M.J.Hagge, K.M.Bryden, "Chem. Eng. Science" 57 (2002), pp.2811-2823.
- (15) A.Ouedraogo, J.C.Mulligan, J.G.Cleland, "Comb. Flame" 114 (1998), pp.1-12.
- (16) 小張, 他, "日本火災学会研究発表会概要集" (2010), p.386.
- (17) 日本機械学会, "伝熱工学試料 改訂第 4 版", p.322.