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 Considerations on gas evolution from the bio-coke fuel caused by heating

○正 伊東 弘行 (北大院) 学 酒井 雄人 (北大院)
正 井田 民男 (近大理工) 若月 薫 (消防研)
正 藤田 修 (北大院)

Hiroyuki Ito, Yuto Sakai and Osamu Fujita, Hokkaido University, N13W8 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido
Tamio Ida, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashiosaka-shi, Osaka

Kaoru Wakatsuki, National Research Institute of Fire and Disaster, 4-35-3 Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo

The evolution characteristics of degradation gas from highly densified biomass briquette called Bio-coke (BIC) are experimentally and numerically investigated. In the present study, evolution rates of both volatile and water from the sample are determined as Arrhenius-type equations and the constants such as frequency factors and activation energies are given by the thermo-gravimetric analysis. It is confirmed that the model used in the study can qualitatively describe the gas evolution from the BIC sample. With high water content, the time volatile evolution start is delayed because much heat is consumed to evaporate the water. In the period before the volatile evolution start, the rate of evolved water to the whole water increases with increasing the water content of the BIC sample.

Key Words: Evolution, Bio-coke, Volatile gas, Moisture content

1. 緒言

バイオコークス (以下, BIC と呼ぶ) は鉄溶解炉向けコークス代替燃料として開発されたバイオマス由来の固体燃料⁽¹⁾であり, 高密度 (イタドリ BIC: 1300kg/m^3) かつ高強度という特徴を有する. 今後 BIC を燃料として広く活用していくには BIC の基本的な燃焼特性を把握する必要がある.

前報⁽²⁾において, 高温空気流中におかれた BIC の着火形態および燃焼時の質量減少速度には, BIC 内部温度分布や内部で生じる熱分解反応が支配的影響を持つことが示されている. 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. しかしながら, 熱分解ガス中の水分と揮発分それぞれの放出速度, 割合やその時間変化などは不明であり, これら放出特性を明らかにする必要がある. また水分や揮発分放出速度が BIC 初期含水率の増減に対しどのような関係にあるのかについても, 着火および燃焼特性を調べる上で有益な情報を与える.

本報では, 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.

2. 実験装置および解析モデル

2.1 小型 UFA (Universal Flammability Apparatus) 実験装置

BIC を窒素雰囲気中にて熱流束一定で加熱した際の質量減少を調べるため小型 UFA⁽³⁾実験装置を用いた (図 1). イタドリ BIC ブロック下端面から採取した試料 ($\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$) を, ステンレス製正方形サンプルホルダ中央に断熱材を介して固定した. 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 (A&D AD-4212A-1000) 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.

Fig.1 Schematic of UFA

2.2 BIC 表面加熱による熱分解ガス放出特性解析モデル

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. 試料サイズは UFA 実験と同様 $\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ の円柱形状とし, 以下の仮定を用いた. (1)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. (2)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. (3)試料熱物性値の温度依存性は考慮しない. (4)試料加熱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, 他端面側では断熱とした.

水分および揮発分放出に関する熱分解パラメータは, それぞれの放出速度に温度依存性が認められることから, 熱重量分析結果よりそれぞれアレニウスプロットを用いて求めた (図 2). 得られた熱分解パラメータを用いて水分および揮発分放出特性を再現した結果と熱重量分析から得た質量減少速度の変化を比較した結果を図 3 に示す. 水分および揮発分放出速度のピーク値に若干の差異は認められるものの両者は良く一致しており, BIC の熱分解過程を良く表現出来ることがわかる.

本研究で使用したイタドリ BIC の熱伝導率(λ)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⁽⁴⁾の範囲に納まるように与え、 $\lambda = 2.200 \times 10^{-4} \text{ W/mmK}$, $C = 1300 \text{ J/kgK}$ とした。

Fig.2 Arrhenius plots of BIC degradation in nitrogen

Fig.3 Comparison between experimental results and approximation (in nitrogen)

3. 実験および計算結果

3.1 熱分解ガス放出速度の時間変化

小型 UFA の加熱実験結果と、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 4 に BIC 含水率 (Mc) 11.1%, 加熱熱流束 50 kW/m^2 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、水分と揮発分放出速度を別々のアレニウス温度依存式で与え熱伝導率と比熱を木質材料の値を参考に与えることで、比較的傾向を良く表現出来ていることがわかる。

図 5 に BIC 試料からの揮発分と水分放出速度の計算結果を別々に示す。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。

Fig.4 Comparison between experimental results and calculation results (Mc=11.1%, 50 kW/m^2)

Fig.5 Volatile and water fractions in the evolution gas (Mc=11.1%, 50 kW/m^2)

3.2 熱分解ガス放出速度への試料初期含水率の影響

前節の計算において、水分と揮発分放出速度への BIC 試料初期含水率の影響を調べた。試料体積、水分以外の BIC 密度および揮発分/(固定炭素分+灰分)割合を一定として水分割合を変化させた。本研究で用いた BIC の熱伝導率 λ および比熱 C から求められる熱拡散率 $\alpha = \lambda/\rho C = 0.078 \text{ cm}^2/\text{min}$ が軽水の値 $0.082 \text{ cm}^2/\text{min}$ ⁽⁵⁾に近いこと、および木材の熱拡散率が水分の増大とともに $0.078 \text{ cm}^2/\text{min}$ 程度に漸近すること⁽⁶⁾から、BIC 含水率の増大による熱拡散率の変化は小さいと予想されるため、本研究では熱拡散率一定とした。

図 6, 図 7 に初期含水率 5.3% および 25% の場合の計算結果をそれぞれ示す。試料含水率が高い場合 (図 7), 水分放出速度が大きくなる一方で揮発分放出速度は小さくなり揮発分/水分比も小さくなる。本研究では試料熱拡散率一定の条件で計算を行ったが、含水率により水分と揮発分の放出速度すなわち試料内部の熱拡散速度に大きな違いが現れるのは、試料内部の熱の移動に熱拡散率のほか水分の蒸発による熱量の消費が大きく影響しているためである。

揮発分放出開始時間を比較すると、含水率 5.3% では 24s, 含水率 11.1% では 36s, 含水率 25% では 60s 程度であり、含水率増大にともない揮発分放出開始が遅れることがわかる。揮発分放出開始までに放出される水分の試料全体の水分量に対する重量割合は、含水率 5.3% では 20.8%, 含水率 11.1% では 22.7%, 含水率 25% では 26.3% であり、含水率の増大とともに大きくなる傾向にある。このことから、試料加熱初期に放出される水分量は単に試料含水率に応じて放出されるのではなく、含水率の高い場合に水分が先行して放出される傾向がある。揮発分放出開始までに水分蒸発に消費される熱量の入熱に対する割合を見積もると、含水率 5.3% では 25.0%, 含水率 11.1% では 36.3%, 含水率 25% では 50.3% である。含水率が高い場合には水分蒸発による熱量消費が大きく、BIC 試料の温度上昇および揮発分放出が遅れるため、水分蒸発に費やされる熱量が増大し、加熱初期の水分放出量が大きくなることが窺える。

Fig.6 Volatile and water fractions in the evolution gas (Mc=5.3%, 50 kW/m^2)

Fig.7 Volatile and water fractions in the evolution gas (Mc=25%, 50 kW/m^2)

4. 結言

高圧縮固体バイオマスブリケットである BIC 試料を加熱した際のガス放出特性を調べるため、小型 UFA 実験およびそれを模擬した数値計算を行い以下のような結果を得た。

(1) 熱重量分析の結果から水分および揮発分放出速度を別々のアレニウス温度依存式で与え、熱伝導率および比熱を木質材料の値を参考に与えることで、BIC 試料のガス放出の傾向を比較的良く表現出来る。

(2) 試料初期含水率が高い場合、揮発分放出開始までに放出される水分量の試料全体水分量に対する割合が大きくなり、この間の水分蒸発に消費される熱量の割合も大きくなる。

謝辞

本研究は、平成 22 年度文部科学省科学研究費補助金(萌芽, #205060176)の支援により行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) Ida, T. et al., Osaka TLO, Patent No.4088933 (2006), Japan.
- (2) 伊東, 他, 熱工学コンファレンス, 10-25 (2010), 319.
- (3) 小張, 他, 日本火災学会研究発表会概要集, (2010), 386.
- (4) 日本機械学会, 伝熱工学試料 改訂第 4 版, 322.
- (5) 日本機械学会, 伝熱工学試料 改訂第 4 版, 331.
- (6) 満久, 京都大学木材研究所報告, 6 (1951), 43.