

研究論文

鶏糞との前処理による木質炭化物の
水蒸気ガス化速度の向上

Improvement of Steam Gasification Rates of Woody Biomass Chars by Using Foul Dung

木村 隆 則*・堀 田 共 晃**・守 富 寛**
Takanori Kimura Tomoaki Hotta Hiroshi Moritomi

(原稿受付日2006年9月27日, 受理日2006年12月18日)

Abstract

To establish a woody biomass utilization system consisting of a carbonization process and a gasification process, in the present paper, the gasification rate of the chars produced with the carbonization process were investigated. It was found that the rates of the char are not so different from each other woody biomass and considerably similar to that of coal char without any volatile matter. It suggests that we need not to select the kind of wood. Furthermore, to improve the gasification rate of the char, the catalytic effect of alkali compounds were also investigated. As well as potassium was confirmed as an excellent gasification catalyst, the foul dung including the potassium and phosphorous compounds was found to be effective and useful catalyst to increase the gasification.

1. はじめに

地球温暖化防止のためCO₂排出削減が急務となっている。CO₂排出削減に寄与するエネルギーシステムとして、バイオマスのエネルギー利用が有望視されている。この中で、わが国の木質系バイオマスを対象としたエネルギー導入目標は101万kl (原油換算・総合エネルギー調査会2010年度目標数値)、また、バイオマスニッポン総合戦略の試算では285-543万klである^{1), 2)}。木質バイオマスをエネルギー資源として利用する場合、種々の欠点から利用が限られている。特に、(1) 含水率 (伐採後30%以上) が高く、発熱量 (8-15MJ/kg) が低い³⁾ (2) 形状や性状が多様であり搬送・貯蔵性に劣る、(3) 収量や品質・供給の変動が大きい、などが木質バイオマスをエネルギー資源として活用する場合の課題⁴⁾となっている。この解決手段として、筆者等は小規模に分散している未利用木質バイオマスのエネルギーの利用に着目し、これを賦存拠点 (例えば山地、製材所) で炭化を行った後、炭化物として収集・ガス化し、利用する地域型エネルギーシステムを提案してきた⁵⁻⁷⁾。この場合、炭化時にエネルギー損失を伴うが、賦存地での炭化による搬送の利便性、貯蔵性、均質性、含水量の低下およびタールフリー化はバイオマスを燃料として改善し、ガス化して利用する場合には、タールトラブルを回避することができ、ガス化設備および保守管理を簡素化できる。ガス化方式は、

新エネルギー利用動向を考慮し、水素を主成分とする燃料ガスを目指した水蒸気ガス化方式を対象とした。

水蒸気ガス化プロセスの構築にあたり、ガス化装置の設計に炭化物の水蒸気ガス化速度を把握する必要がある。炭素質の水蒸気ガス化速度に関する研究はこれまで石炭チャーに関して膨大な研究報告がなされてきた⁸⁾。石炭のガス化は大規模なガス化装置を念頭に置いて開発されてきた経緯があり、主として高温・高圧の条件における各種ガス化剤 (空気、水蒸気、CO₂等) と石炭チャーの反応速度が研究されている^{9), 10)}。しかしながら、木質バイオマスの炭化物を対象とした場合、その性状は炭化条件に大きく依存することから、石炭チャーに関する既往研究結果をそのまま適用できるか否かは検討しておく必要がある。

一般に、木質バイオマスの炭化物は燃焼速度及びガス化速度において石炭チャーよりも反応性が高いことが報告¹¹⁾されているが、木質バイオマスの炭化物をガス化利用する場合には、木質バイオマスを出発燃料とした総合エネルギー効率の向上の観点から、低温ガス化が望まれる。さらに、石炭等における既往の研究では、石炭の水蒸気ガス化反応においてカリウム等のアルカリの触媒作用により、ガス化速度を大幅に向上させることが可能であることが知られている^{12), 13)}。しかしながら、石炭にアルカリ触媒を担持させることはコスト的に不利であり、石炭のような大規模なガス化では実現されていないのが実情である。これに対し木質バイオマスのガス化では規模が小さいことから、アルカリを触媒とした低温ガス化が可能である。ここでは、木質バイオマスの立地条件の共有性などから鶏糞に着目した。鶏糞の国内賦存量は、飼養羽数 (種鶏除く) 17695万羽¹⁴⁾ お

* (株)エルウィング

〒350-0222 埼玉県坂戸市清水町30-11

** 岐阜大学大学院工学研究科

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1

よび1羽平均排泄量から8500t/日(風乾燥)と推定される。これらの鶏糞の一部は肥料として利用されるが、ほとんどは廃棄処理されている。有効利用のために嫌気醗酵プラントを併設し発生するメタンを利用することが試みられている。そこで、この醗酵残渣液と木質バイオマスを前処理することにより、醗酵残渣液中に多量に含まれるカリウムによりガス化触媒能を発現させることは現実的な手段と言える。こうした処理の可能性を併せて検討した。本報告では、水蒸気ガス化において、木質系バイオマス炭化物および炭化物に鶏糞醗酵残渣液を前処理した試料のガス化速度を評価した結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 流動層ガス化装置

木質炭化物の水蒸気ガス化速度の測定は、流動層形式のガス化装置を用いて行った。装置構成を図1に示す。ガス化反応器本体は内径38mm、長さ560mmの透明石英製で、反応管下部に焼結石英板を取り付け、流動化ガスの分散板とした。使用した流動媒体はJIS7号珪砂(平均粒径0.25mm)で、静止層高60mmに充填し、流動層を形成させた。使用した流動媒体粒子の1023Kの空気による最小流動化速度は約0.05m/sである。熱電対(JIS K)により測定した流動層温度が所定温度になるように、反応管を電気炉で加熱した。ガス化時の流動化ガスは、N₂と水蒸気の混合ガスとした。また、燃焼時は空気と水蒸気の混合ガスとした。いずれの場合も全ガス流量を約3.2NL/minで一定とした。空塔速度は0.47m/sであり、最小流動化速度の約9倍の流速とした。水蒸気ガス化に必要な水蒸気は、蒸留水を高圧ポンプでコイル状のステンレス管を電気炉で加熱する形式の水蒸気発生装置に所定量の水を連続供給し、水蒸気を発生させた。流量測定したN₂または空気を、流動層ガス化装置下部で水蒸気に混合し、流動層に供給した。反応管上部より内径6mmの石英管を流動層内部まで挿入し試料投下管とした。その上部に2個のバルブを設け、バルブの間に秤量した粒径0.5-1.0mmの木質バイオマスの炭化物粒子を20mgまたは

50mg充填した。流動層温度、水蒸気分圧等が定常となっていることを確認後、下部のバルブを瞬間的に開くことにより、木質バイオマスの炭化物粒子を流動層内に落下させ、水蒸気ガス化反応を開始させた。反応器出口の生成ガスを含むガスを水冷の凝縮器を通して水蒸気を凝縮除去し、さらにシリカゲル層を通して除湿後、CO₂連続分析装置(NDIR方式、株堀場製作所製VIA510)で連続分析した。CO₂分析計の出力は5s毎に計算機に記録した。また、同一のガス試料をマイクロガスクロマトグラフ(Agilent Technologies(株製))により150s毎に分析しCO濃度を測定した。

ガス化実験は下記の手順により行った。(1) N₂と水蒸気の混合ガスにより所定温度で流動層を形成させ、出口ガス中にCO₂・COが検出されないことを確認する。(2) 試料投下管に設けた下部バルブを開け、バイオマス炭化物試料を流動層中に投下する。(3) CO₂・CO濃度を連続分析計とマイクロガスクロマトグラフによりモニターする。(4) 所定時間経過後にN₂を空気に切換え、排ガス中にCO₂が検出されなくなるまで流動層中の未反応物を燃焼させる。以降(1)~(4)を所定反応条件(流動層温度、水蒸気分圧)のもとで繰り返す。CO₂・CO濃度および総ガス量から求めた炭素量と投下炭化物試料中の炭素量の収支を確認し、ガス中の炭素収支の誤差として-10%以内であるデータのみ解析の対象とした。カリウム等の触媒を使用した場合、数回の実験毎に流動媒体を入れ替え、残留する触媒の影響を最小に抑えた。

2.2 水蒸気ガス化速度

今回の実験条件で用いた試料の木質バイオマスの炭化物と水蒸気との反応生成物はH₂とCO₂およびCOが主要成分であり、生成ガス中のCO₂とCOの濃度変化から、炭化物の水蒸気ガス化反応速度を求めることができる。木質バイオマスの炭化物中の炭素がCO₂とCOに転換される割合、すなわち炭素転換率 X [t] は、全ガス量がガス化条件、燃焼条件で一定と仮定すると、次式で計算できる。

$$X(t) = \frac{\int_0^t (C_{CO_2} + C_{CO}) dt}{\int_0^\infty (C_{CO_2} + C_{CO}) dt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ガス化反応速度 $R(t)$ [s⁻¹] は、炭素転換率 X の時間変化より計算でき、未反応炭素量に対し一次反応を仮定すると、

$$R(t) = \frac{dX}{dt} = k(1 - X(t)) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。 k [s⁻¹] は水蒸気ガス化反応速度定数である。本実験では、ガス化反応初期(0-1000s)における反応速度により、木質バイオマスの炭化物の水蒸気ガス化反応特性を評価した。

図2に炭素転換率 X の時間変化の一例を示す。反応速度定数 k が一定である場合には(2)式の積分形は次式となる。

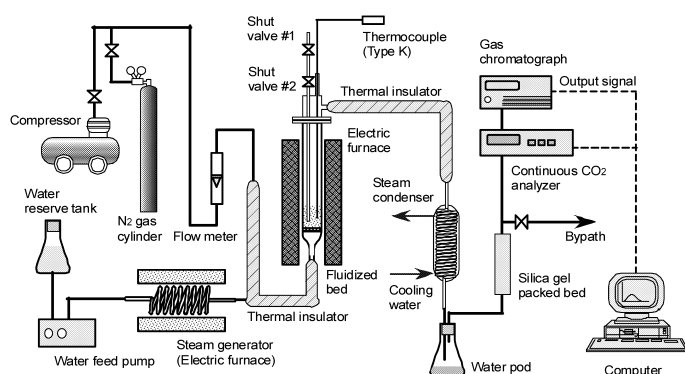


図1 実験室規模の流動層ガス化装置構成

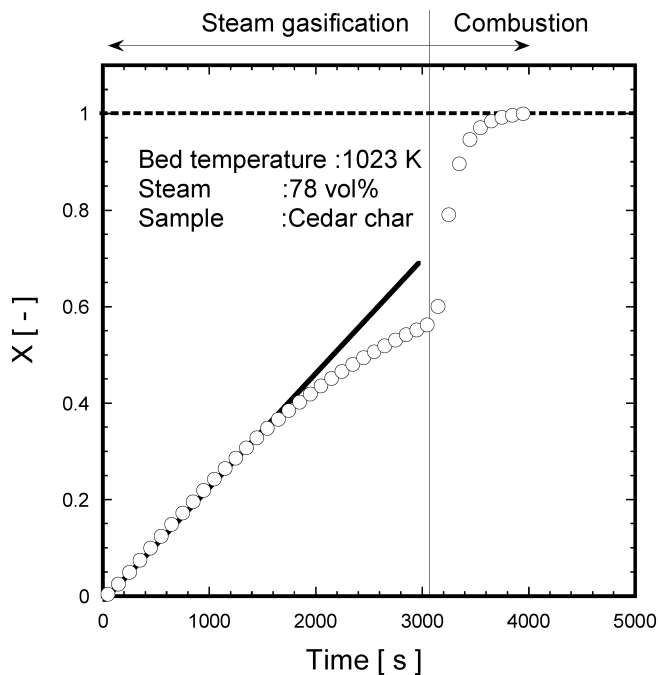
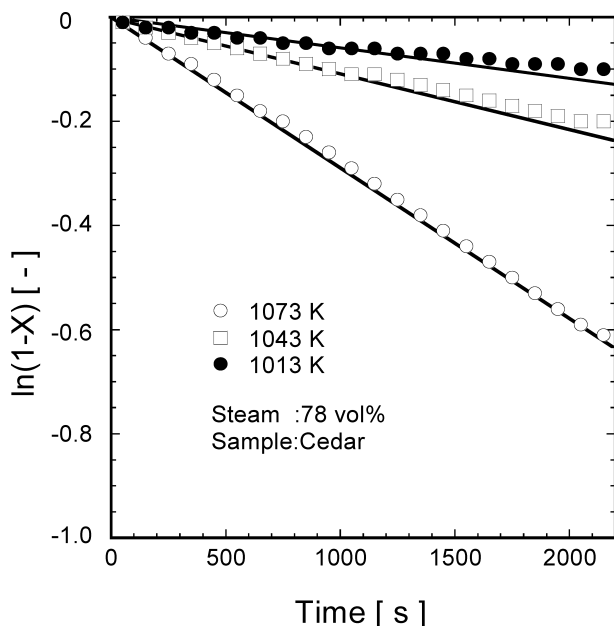


図2 炭素転換率の時間変化の一例

$$\ln(1-X) = -kt \quad \dots\dots\dots (3)$$

図3に実験データと(3)式の比較を示す。流動層水蒸気ガス化条件においては、図3に示されるとおり、反応初期においては、炭素転換率 X は概ね(3)式により直線近似でき、その傾きから速度定数 k は求めることができる。なお、 CO_2 連続ガス分析計には装置固有の応答遅れ(数十秒程度)があり、本来は数学的信号処理を行い真の CO_2 濃度を計算して解析すべきであるが、水蒸気ガス化反応による生成ガス中の CO_2 濃度の時間変化に比べ、 CO_2 連続分析計の応答速度は充分速いと判断されるため、計算に必要な CO_2 濃度は

図3 種々のガス化温度における $\ln(1-X)$ の時間変化の一例

分析計の指示値をそのまま用いた。

2.3 木質バイオマスの炭化条件

本実験では標準試料として、絶乾状態にしたスギ(粒径2-3 mm)およびサクラ(粒径2-3 mm)を用いた。ガス化触媒としてアルカリ成分の影響を検討するために次の前処理を施した試料を作製した。処理前のスギ、サクラに含まれるアルカリ成分はそれぞれ0.35wt%, 0.4wt%であった。

(1) 減圧下で3.90wt%水酸化カリウム水溶液を含浸させた後、乾燥器で378K、24時間乾燥、(2) スギ試料の3倍重量の自然乾燥した鶏糞を蒸留水で溶解し(以降鶏糞液と呼ぶ)、24時間放置後、ろ過処理、固形分を分離した溶液を(1)と同様に含浸した後、乾燥器で378K、24時間乾燥、(3) 鶏糞に含まれるリン酸の影響を確認するため、3.10wt%リン酸水溶液を(1)と同様に含浸した後、乾燥器で378K、24時間乾燥した。未処理の試料も比較のため用いた。水酸化カリウム水溶液中のカリウムは全て水溶性であるが、今回製作した鶏糞液に溶解したカリウムはおよそ10wt%であった。したがって、水酸化カリウムを含浸させた場合は約39mg/gが、鶏糞液を含浸させた場合は約3 mg/gのカリウムが担持されている。前述の試料を装填した坩堝を電気炉に設置し、室温から5 K/minで昇温し、973Kで60min保持後、5 K/minで室温まで冷却させ、炭化処理した試料を実験に供した。この炭化処理条件は、炭化物試料中に揮発分がほとんど残存せず、水蒸気ガス化への揮発分の影響は無視できる。また、炭化温度の上限はカリウムの沸点以下とした。表1に使用した木質バイオマスの炭化物および石炭との比較のため用いた亜瀝青炭であるインドネシア産Adaro炭チャー(1173Kに保持した N_2 雰囲気流動層に投入して急速昇温、30min乾留)の分析値を、表2に使用した鶏糞(Sample A)および参考のために入手した鶏糞(Sample B-E)の分析値を示す。

表1 木質バイオマスの炭化物およびAdaroチャーの分析値

	Cedar char	Cherry char	Adaro char
Ultimate analysis (daf wt%)			
C	92.50	89.50	87.72
H	1.80	2.20	1.06
N	-	-	1.05
S	0.10	-	10.17
O	6.40	8.60	(S+O)
Proximate analysis			
Moisture (wt%)	2.20	2.65	1.04
Volatiles (dry wt%)	5.20	5.60	0.00
Fixed carbon (dry wt%)	79.65	81.25	91.84
Ash (dry wt%)	1.58	1.63	8.16
Specific surface (m^2/g)	375	390	-

表2 鶏糞の分析値

Analysis value	Average	Foul dung samples				
		A	B	C	D	E
P (wt%)	5.5	4.8	5.9	4.6	5.1	7.2
K (wt%)	3.7	3.6	3.8	3.2	3.7	4.1
N (wt%)	2.6	3.1	2.8	1.6	2.7	2.8
Cu ($\mu\text{g/g}$)	53.6	40.0	62.0	40.0	68.0	58.0
Zn ($\mu\text{g/g}$)	368	330	360	345	420	385
Moisture (wt%)	16.1	11.5	17.7	17.6	15.6	18.2

3. 実験結果および考察

3.1 水蒸気分圧の影響

バイオマスチャーの水蒸気ガス化速度に対する主要な影響因子としては、チャー粒子の外部境界膜内拡散速度、チャーの粒径、水蒸気分圧、およびガス化温度が考えられる。このうち、外部境界膜内拡散は流動層状態であること、および水蒸気ガス化反応が燃焼と比べ遅い反応であることから、外部境界膜内拡散の影響は小さい。また粒径については、実用の装置を想定して、炭化物試料をmmオーダーで一定とした。ここでは、ガス化速度の水蒸気分圧およびガス化温度依存性について調べることにした。図4にガス化温度1073Kにおけるガス化反応速度定数 k [s⁻¹]の水蒸気分圧 P_{H_2O} [kPa]に対する依存性を示す。図4より、反応速度定数は水蒸気分圧に対しては0.57次であることがわかる。粒径数十 μ mの同一試料を用いて加圧熱天秤により別途行った水蒸気ガス化実験では、炭化物の水蒸気ガス化反応速度定数は水蒸気分圧に比例し、小粒径では水蒸気分圧の影響が大きくなることを確認している¹⁵⁾。この結果から、大粒径試料では、粒子内の拡散抵抗が無視できないことがわかる。

3.2 水蒸気ガス化反応速度定数の温度依存性

水蒸気分圧の影響が明らかになったので、次に水蒸気分圧を73kPaで一定にして木質バイオマスの炭化物のガス化温度に対する依存性を調べた。図5に4種の木質バイオマス（スギ、サクラ、タケ、赤松試料）の炭化物（1073Kまで20K/minで昇温、60min保持で炭化）および、Adaro炭チャーの水蒸気ガス化反応における初期反応速度定数 k のArrheniusプロットを示す。4種のバイオマス炭化物のガス化反応速度定数は、石炭としては反応性の高いAdaro炭チャーと比較して同等程度であった。また、活性化エネルギーもおおよそ120kJ/molでほぼ等しかった。この結果より、前記の湿潤な条件で乾留した木質バイオマスの炭化物の水蒸気ガス化反応性は、1173Kで乾留したAdaro炭チャーと同程度であることがわかった。固気反応においてガス化速度を支配する因子は、チャー構造、例えば比表面積、細孔径分布、細孔容積等が考えられるが¹⁶⁾、本実験結果では、木質バイオマスを揮発成分の残存がない状態まで炭化を進行させた場合、反応速度に差異はなく、木質バイオマス4種で均質であった。この結果より実用化時に想定される樹種混合は、ガス化速度に影響しないことがわかった。

3.3 鶏糞による水蒸気ガス化反応速度向上効果

木質バイオマスの炭化物をガス化して利用する場合には、エネルギー効率向上とコンパクト化の観点から、ガス化反応速度の向上が期待される。ここでは、石炭の水蒸気ガス化反応速度の向上が確認されているカリウムの触媒効果について検討した。図6に木質バイオマスと木質炭化物に水

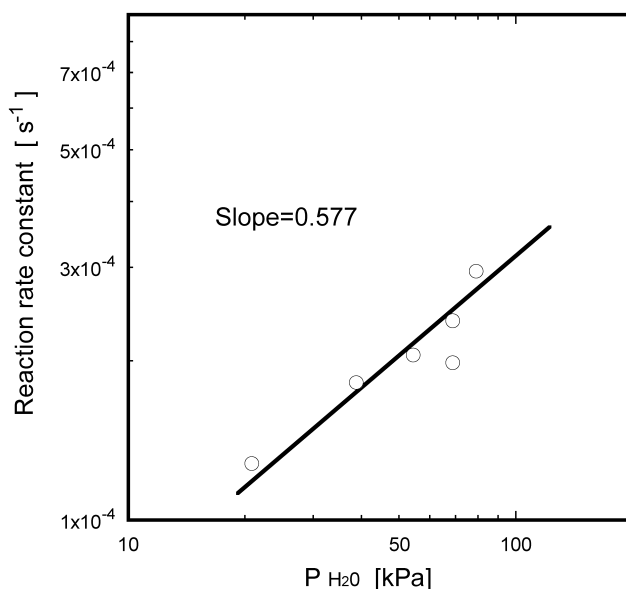


図4 水蒸気分圧のガス化反応速度への影響

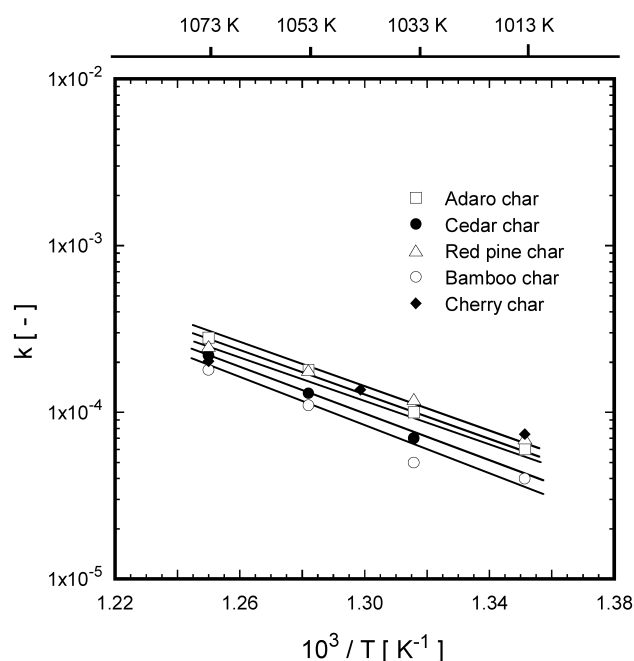


図5 水蒸気ガス化反応速度定数のArrheniusプロット

酸化カリウム、カリウムとリンを多く含む鶏糞液あるいはリン酸水溶液を含浸させ、水蒸気ガス化反応における初期反応速度定数 k のArrheniusプロットを示す。図より水酸化カリウムを含浸した場合には、水蒸気ガス化反応が大幅に促進されることがわかる。また、活性化エネルギーの値は138.5kJ/molから102.5kJ/molと未処理試料のよりも低下し、ガス化速度の律速過程が拡散律速に移行すると判断される。以上の試薬を用いた実験により、木質バイオマスの炭化物へのカリウムの添加によるガス化反応速度の向上が認められたので、実際の鶏糞液を用いた実験を行った。鶏糞液を含浸した場合も、図6に示したように水蒸気ガス化速度が促進され、水酸化カリウムを含浸した場合と同様に活性化エネルギーの低下が認められた。これは鶏糞中のカリウム

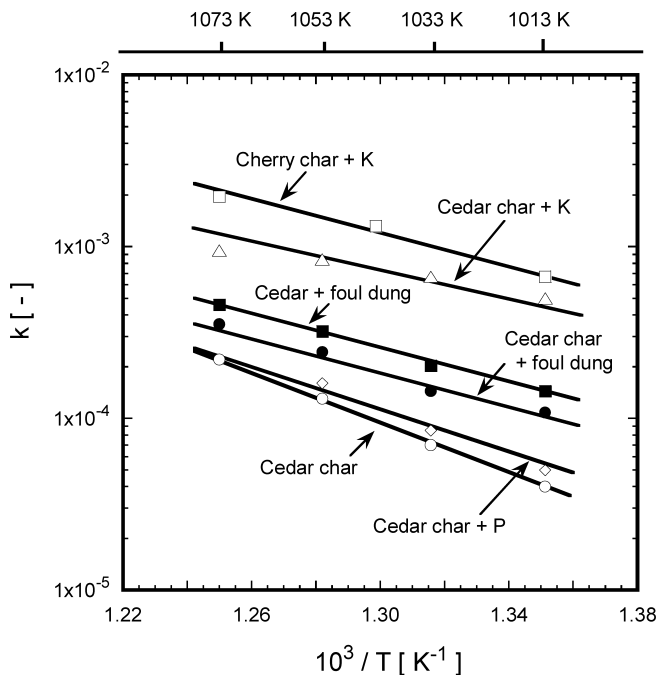


図6 触媒を担持した場合のガス化反応速度定数

が触媒効果を発現したものと考えられる。表2に示されるように、鶏糞中のカリウムは3.2-4.1wt%であり、鶏糞5種類ではほぼ一定である。鶏糞中には、カリウムの他にリン(4.6-7.2wt%)を多量に含む。そこでリンのガス化触媒効果を確かめるため、リン酸で同様の検討を行ったところ、図6に示すようにガス化速度は若干向上した。また、リン酸による阻害効果は認められなかった。ガス化反応促進効果については、石炭等での研究では報告例が無いことからさらに検討する必要がある。

これまでの、初期ガス化反応速度定数により水蒸気ガス化速度を評価し、水酸化カリウムおよび鶏糞中のカリウムがガス化反応の初期に効果があることが確認できたので、次に、触媒能の持続状況を把握するため、水蒸気ガス化反応の中後期におけるガス化速度を検討した。図7にスギの未処理試料、鶏糞液を含浸した試料および水酸化カリウムを含浸した試料の炭素未反応率(1-X)の経時変化を示す。水蒸気ガス化反応の中後期では、鶏糞液を含浸した試料の反応速度は時間の経過とともに低下し、最終的には未処理の試料のそれとほぼ等しくなり、鶏糞中のカリウムの効果が急速に失われることがわかる。水酸化カリウムを含浸した試料においても触媒能は低下した。触媒能が失われるまでの時間はおおよそ600sで、それまでに約60%のガス化が完了している。この触媒能低下をより定量的に把握するため、図7よりカリウム含浸試料と鶏糞液含浸試料の反応速度定数 k を計算し、それぞれの時刻ゼロに外挿した反応速度定数 $k_{t=0}$ に対する比の経時変化を図8に示す。反応速度定数の絶対値はカリウム含浸量に差があるので、図7に示されるように異なるが、速度定数の比 $k/k_{t=0}$ で比較した場合は

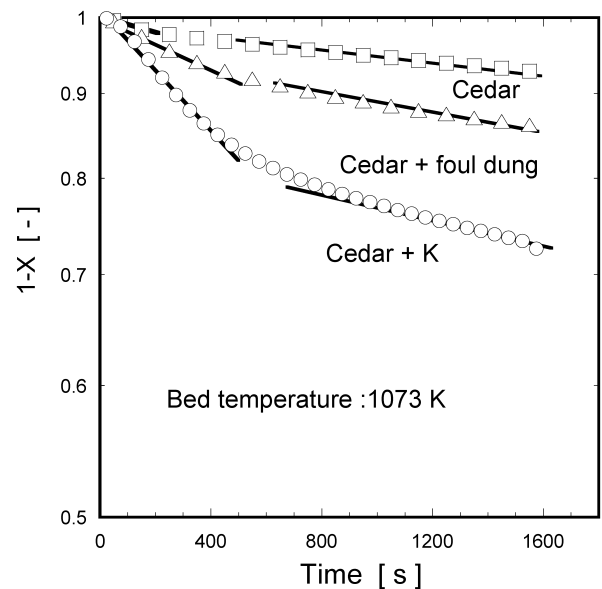
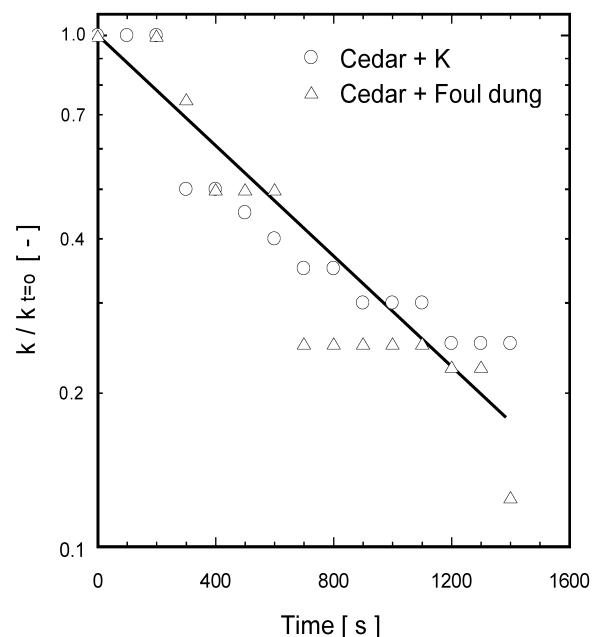


図7 各種炭化物の未反応率の経時変化

両者に差異はなく、同一のメカニズムにより触媒能が失効していることが示唆される。鶏糞の触媒効果による水蒸気ガス化反応速度向上が確認できたが、その効果は反応中期以降では急速に失われ、限られた反応時間では高いガス化率は達成できないことが示された。しかしながら実際のガス化プロセスでは、水蒸気発生用の燃料が必要であるので、必ずしも高いガス化率は要求されない。触媒能が低下して水蒸気ガス化速度の低下した炭化物を前段の水蒸気発生用の燃料として利用することが合理的である。さらにこの未反応炭化物は、水蒸気賦活されその吸着性能が向上されていることが期待されるので、燃料以外の吸湿用や水質浄化用などの用途で一旦利用するなど、経済性向上に資した検討も可能である。

図8 $k/k_{t=0}$ 比の時間変化

4. 結論

木質バイオマスを一旦炭化し、木質バイオマスの有する欠点を解消した後、最終的に水蒸気ガス化し燃料ガスを製造・利用するシステムを検討するため、木質バイオマスの炭化物の水蒸気ガス化速度を流動層ガス化装置により測定した。ガス化速度向上のため、カリウムを含む試薬で前処理した試料、および鶏糞（水溶ろ過液）で前処理した試料のガス化速度も合わせて測定した。その結果、

- (1) 揮発成分の残存がほとんどない状態まで炭化した木質バイオマスの炭化物の水蒸気ガス化反応速度は、ガス化速度の比較的大きいアダロ炭チャーと同程度であり、特別高いガス化反応性は示さない。樹種による炭化物の水蒸気ガス化反応速度の差異は小さく、樹種混合の問題はない。
 - (2) カリウムのバイオマス炭化物への担持は、石炭と同様に水蒸気ガス化反応速度を大幅に増大させる。
 - (3) 入手が容易な鶏糞（水溶ろ過液）を木質系バイオマス炭化物に含浸した場合、および木質バイオマス含浸して炭化物にした場合に、ガス化触媒として機能できる。
- の結論を得た。以上から筆者らが提案しているシステムにおいては、木質バイオマスの炭化物の水蒸気ガス化速度が石炭等に比べ特別大きなものではないことから、システムの効率向上の観点からは何らかのガス化速度向上が必要であり、その一つの方法として、木質バイオマスと同時に入手しやすい鶏糞の利用が効果的であることが示された。

謝辞 ガス分析装置類の使用を許可して頂いた(独)産業技術総合研究所、鈴木善三氏とガス化速度データの解析に協力頂いた東京理科大学大学院、梶原大介君に感謝します。

使用記号

C_{CO_2} , C_{CO} :	CO_2 , CO 濃度	[%]
P_{H_2O} :	水蒸気分圧	[kPa]
X :	炭素転換率	[-]
$R(t)$:	水蒸気ガス化反応速度	[s ⁻¹]
k :	ガス化反応速度定数	[s ⁻¹]
$k_{t=0}$:	$t=0$ における反応速度定数	[s ⁻¹]
t :	時間	[s]

参考文献

- 1) 週刊エネルギーと環境, No1719 エネルギージャーナル社 (2002).
- 2) 農林水産省ホームページ
<http://www.maff.go.jp/biomass/senryaku/senryaku.htm>
(アクセス日2006. 4. 10)
- 3) 山地憲治, 山本博巳, 藤野純一; バイオエネルギー, (2000), 86, ミオシン出版.
- 4) 小木知子; バイオマスエネルギーの特性, 日エネ誌, 78(1999), 232.
- 5) Takanori Kimura, Hiroshi Moritomi; Proc. Int. Conf. on Coal Sci. and Tech., Paper No.3, Okinawa, Japan (2005), 402.
- 6) 木村隆則, 加納益子, 守富寛; 木質バイオマスの炭化物ガス化システムの事業性評価, 第14回日エネ学会大会講演要旨集, (2005), 354-355.
- 7) 木村隆則, 加納益子, 守富寛; 林地等残存木質バイオマスの賦存拠点炭化の経済的有効性評価研究, 第3回木質炭化学会研究発表会講演要旨集 (2005), 19-22.
- 8) Klaus Otto, Leslie Bartosiewicz, Mordecai Shelef; Effects of calcium, strontium, and barium as catalysts and sulphur scavengers in the steam gasification of coal chars, Fuel, 58 (1979), 565.
- 9) Kayembe, N, A. H. Pulsifier; Kinetics and catalysis of the reaction of coal char and steam, Fuel, 55 (1976), 211.
- 10) Takayuki Takarada, Shinji Ichinose, Kunio Kato; Gasification of bituminous coal with K-exchanged brown coal prepared from potassium chloride, Fuel, 71 (1992), 883-887.
- 11) Eleni Kastanaki, Despina Vamvuka; A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal-biomass char blends, Fuel, 85 (2006), 1186-1193.
- 12) Bazardorj Bayarsaikhan, Jun-ichiro Hayashi, Taihei Shimada, Chirag Sathe, Chun-Zhu Li, Atsushi Tsutsumi, Tadatoshi Chiba; Kinetics of steam gasification of nascent char from rapid pyrolysis of a Victorian brown coal, Fuel, 84 (2005), 1612-1621.
- 13) Wu, H., J. Hayashi, T. Chiba, T. Takarada, and C. Z. Li; Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part V. Combined effects of Na concentration and char structure on char reactivity, Fuel, 83 (2004), 23-30.
- 14) 農林水産省ホームページ; 分野別分類/畜産畜産統計
<http://www.maff.go.jp/www/info/bun06.html>
(アクセス日2006. 4. 10)
- 15) 堀田共晃, 守富 寛, 神原信志, 木村隆則; 木質炭化物の水蒸気ガス化速度の評価, 化学工学会第71年会研究発表会講演要旨集, (2006), L314.
- 16) Yasushi Sekine, Kiyohiro Ishikawa, Eiichi Kikuchi, Masahiko Matsukata, Akemitsu Akimoto; Reactivity and structural change of coal char during steam gasification, Fuel, 85 (2006), 122-126.