

湿潤バイオマスの炭化とその炭化物の利用

林 順一* 大隈 修**

Carbonization of Wet-biomass and the Utilization of the Char

Jun'ichi HAYASHI, Osamu OKUMA

1. はじめに

バイオマスはカーボン・ニュートラルな新エネルギーとしてもマテリアルとしても利用できる。そのため、バイオマスに大きな期待が寄せられている。バイオマス自体は地球上に非常に多く存在するが、食糧など人間の生活に必要なものとして、すでに利用されているものがある。利用できるバイオマスとしては、それ以外の廃棄バイオマス、未利用バイオマスとなる。表1に日本で排出される破棄物、未利用バイオマスの種類と量を示した。

表1 バイオマス年間排出量

廃棄物系バイオマス	家畜排泄物	8,700万トン
	下水汚泥	7,900万トン
	黒液	7,000万トン
	廃棄紙	3,600万トン
	食品廃棄物	1,900万トン
	製材工場等残材	430万トン
	建設発生木材	470万トン
未利用バイオマス	農作物非食用部	1,400万トン
	林地残材	800万トン

このように、利用できるバイオマスの多くは家畜排泄物、下水汚泥、食品廃棄物など大量に水分を含む湿潤バイオマスである。湿潤バイオマスは多量に水分を含むため、熱化学的変換は水の蒸発に多量のエネルギーが消費され、エネルギー効率のよい変換方法とい

えない。このような湿潤バイオマスをエネルギーに変換する方法としてメタン発酵が挙げられる。しかし、メタン発酵も発酵後の消化液や汚泥の処理が問題となり広く普及していない。そのため、現在は、湿潤バイオマスの大部分が堆肥化されている。堆肥化は以下のように進行する。

一次発酵

家畜排泄物に含まれる易分解性有機物（糖類やアミノ酸）が好気性微生物により分解する。

二次発酵

難分解性の有機物が一次発酵と比べてゆっくりと分解する。

しかし、堆肥の需要には季節変動があるため有効な利用方法としては限界があり、新しい用途が求められている。

ところで、一次発酵の過程で発酵熱で水分が蒸発させることができる（図1）。下水汚泥の場合80wt%の含水率が30wt%程度まで低下させることができる。



図1 一次発酵過程の様子

原稿受付 平成25年9月6日

*環境都市工学部 エネルギー・環境工学科 教授

**公益財団法人 新産業創造研究機構 (NIRO)

つまり、この発酵熱によって時間はかかるが、湿潤バイオマスを外部からエネルギーを投入することなく乾燥させることができる。

このように含水率を低下させることで乾燥に必要なエネルギー消費を抑えて炭化物を製造することが可能となる。さらに、炭化の際に放出される揮発分を燃料とすることにより、その燃焼熱のみで炭化のエネルギーを賄える可能性がある。

このように発酵による乾燥（発酵乾燥）と原料の揮発分を燃料とした炭化を組み合わせたエネルギー自立型（立ち上げ時以外に外部からのエネルギー投入を必要としない）炭化プロセスの開発を行った。なお、この開発は近畿経済産業局の委託事業として、（公財）新産業創造研究機構（NIRO）、（株）白滝有機産業、兵庫県立大学、兵庫県工業技術センター、兵庫県農林水産技術総合センター、兵庫県、宍粟市とその他4企業と協力して実施した。ここでは、本学が担当した炭化挙動と炭化物の有効利用について述べる。

2. 実証試験結果

2.1 炭化原料

炭化原料として、発酵乾燥した下水汚泥（以下、乾燥汚泥）を用いた。乾燥汚泥の元素分析値（乾燥重量基準）を表2に示した。なお、乾燥汚泥の含水率は30.5wt%であった。

表2 乾燥汚泥の元素分析値（単位：wt% (d.b.))

灰分	C	H	N	S	O (diff.)
16.8	40.7	5.0	2.6	0.8	34.1

2.2 エネルギー自立型炭化装置

装置の概略図を図2、装置の写真を図3に示した。炭化装置は投入バイオマス量（含水率30wt%）1t/hとして設計し、（株）白滝有機産業岡山工場に設置した。乾燥汚泥はスクリュウ式原料供給装置によって炭化炉（熱分解炉）へ送られる。炭化炉の形式は外熱式ロータリーキルンを用いた。キルン内では供給された乾燥汚泥の熱分解によって生成した揮発分（タール、ガス）は、すぐに燃焼器に誘導されそこで燃料として燃焼される。揮発分の燃焼条件は、焼却炉の構造基準・管理基準を満足する800℃以上、燃焼ガスの滞留時間2秒以上である。燃焼炉より排出される高温ガスがキルンを外側から加熱する。さらにキルン内に設置した内管を通りキルン内部からも加熱する。その後、排ガスは焼却炉基準の処理をされ煙突より放出される。

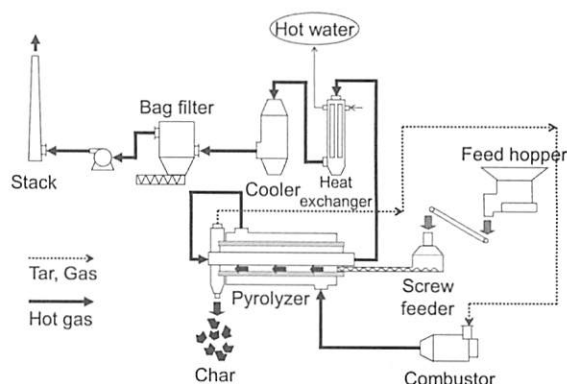


図2 装置概略図

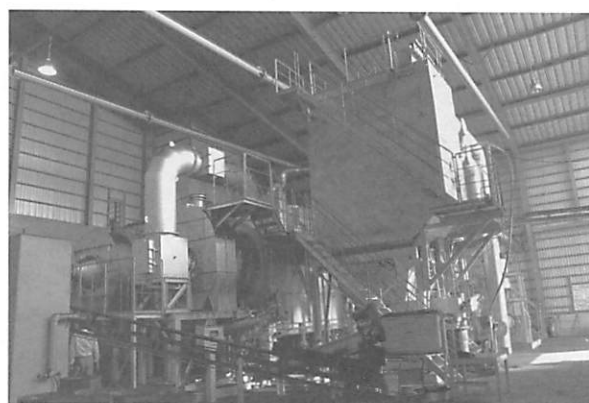


図3 装置全景

2.3 エネルギー自立運転の実証

表2に示した乾燥汚泥を平均950kg/h（乾物660kg/h）で供給するとスタート時以外に重油を使うことなく、キルン内の温度415℃で安定した炭化物の製造が可能であった。表3にこのとき得られた炭化物の元素分析値を示した。

表3 得られた炭化物泥の元素分析値（単位：wt% (d.b.))

灰分	C	H	N	S	O (diff.)
29.0	41.7	2.7	4.0	1.0	21.6

灰分量が炭化前後で変化がないと考えると、炭化収率は57.9%となる。また、灰分を除いた有機物の炭化収率は49.4%となる。つまり、はじめの有機物の半分程度が揮発して、炭化のための燃料となったことを示している。

3. 実験結果

3.1 炭化挙動の測定

乾燥汚泥炭化の燃料として原料の揮発分を利用するためには、揮発分（ガス、タール）の生成挙動つまり

重量減少挙動について知見を得る必要がある。そこで、重量減少挙動について熱天秤を用いて測定した。

図4に乾燥汚泥の重量減少挙動と重量が大きく減少する温度域における重量減少速度を示した。200℃を超えたあたりから重量減少が始まり600℃まで続いている。特に、300~400℃で急激に揮発分が発生していることがわかる。図5に示すように、この300~400℃の温度域で生成するガスは二酸化炭素と少量の一酸化炭素であることから、揮発分が燃料となるのはタービン分であると考えられた。

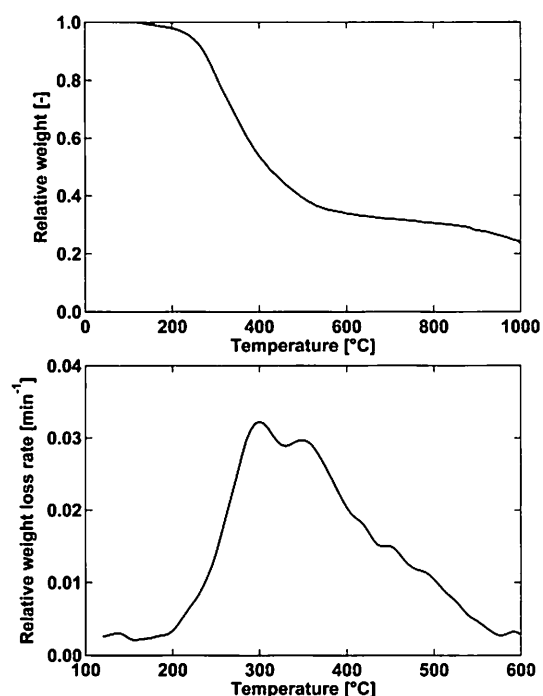


図4 乾燥汚泥の重量減少挙動

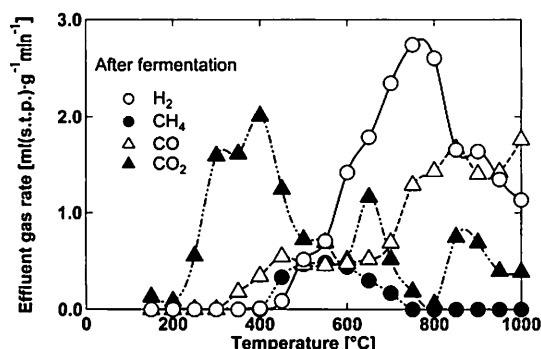


図5 炭化過程での生成ガス挙動

3.2 炭化物の利用

得られた炭化物の利用としては、固体燃料としての利用(エネルギー利用)と吸着剤などとしての利用(マテリアル利用)の両方が考えられる。

3.2.1 固体燃料としての利用

得られた炭化物の元素分析値(表3)からDulong式によって炭化物の発熱量を計算した。発熱量は乾燥炭化物1.0kgあたり、14,200kJ/kgであった。これは、発電やボイラーに用いられる一般炭の発熱量25,700kJ/kgの約半分程度の発熱量である。

次に、この燃料を生産するために必要なエネルギーについて検討する。発酵乾燥では、堆肥を移動させるために必要な重機の燃料などが必要となる。炭化では、装置の立ち上げの間のみ重油と電力を使用し、定常運転の後には電力のみ使用する。実際の運転中のデータに基づいて計算すると炭化物の発熱量よりも少ないエネルギーで炭化物が製造できることがわかった。つまり、発酵乾燥と揮発分を燃料として利用する炭化装置の組み合わせがエネルギー生産プロセスとして成立していることになる。

3.2.2 炭化物の吸着剤としての利用

ここまでは、乾燥汚泥の炭化物について述べた。このプロセスは他の湿潤バイオマスについても適用可能であり、ここからは牛糞堆肥の炭化物について述べる。

図6に炭化温度が比表面積に及ぼす影響について示した。

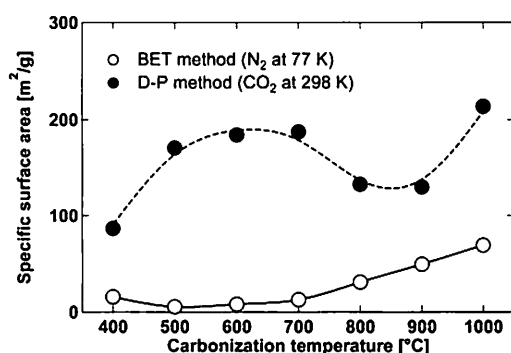


図6 炭化温度が比表面積に及ぼす影響

窒素吸着による比表面積と二酸化炭素吸着による比表面積に大きな差が見られる。これは、窒素吸着が非常に低い温度(77K)で行われているために、分子サイズに近い細孔では、平衡に達するまでに非常に長時間を要する。このため、比表面積が平衡に達していない吸着量から算出されるため小さくなったと考えられる。

次に、炭化物の調湿剤としての利用について検討するために水蒸気吸着等温線を測定した。図6に炭化温度の異なる炭化物への水蒸気の吸着等温線を示した。炭化温度が400℃の場合には、相対圧が0.8を超えると急激な吸着量の増加が見られる。炭化温度が1000℃に

なると、この急激な増加が見られなくなっている。図6に示すように1000℃で得られた炭化物の方が、400℃の場合よりも比表面積が大きい。しかし、図7に示される水蒸気吸着量は1000℃の方が少ない。このことから、相対圧0.8以上の水蒸気吸着量の増加は、比表面積以外の要因が関係していると考えられる。

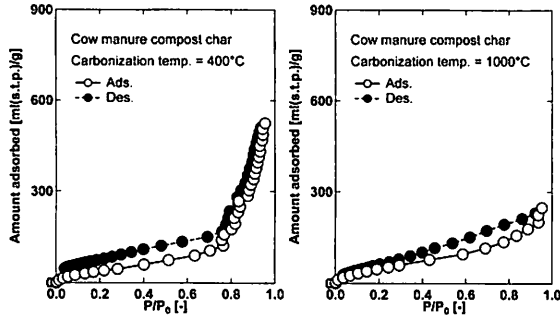


図7 牛糞堆肥炭化物への水蒸気吸着等温線

そこで、炭化物中に含まれる灰分の影響について検討した。まず、炭化物を塩酸により脱灰処理した炭化物を得た。この炭化物への水蒸気吸着等温線を測定すると、図8に示すように、脱灰により相対圧0.8以上の吸着量の増加は見られなかった。このことより、吸着量の増加は灰分が影響していることが明らかとなった。

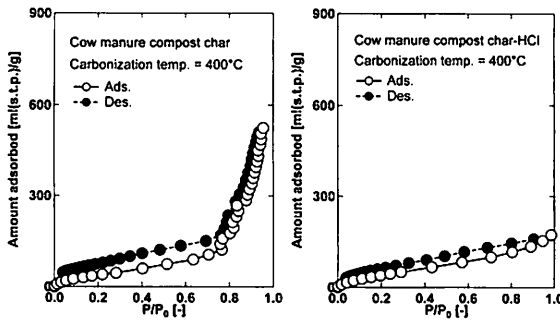


図8 脱灰が水蒸気吸着等温線に及ぼす影響

灰分のどの成分が影響しているのかについて検討した。図9に各炭化物に対するX線回折パターンを示した。炭化物にはSiO₂、KClが多く含まれており、脱灰によりKClが大きく減少した。このことから、灰分としてKClが相対圧0.8以上での水蒸気吸着量の大きな増加に影響したことが明らかとなった。

炭化物の調湿能の評価を行った。調湿能は相対圧0.55と0.90の水蒸気吸着量の差で評価した。なお、比較する吸着剤としてヤシガラ活性炭を用いた。

図10にヤシガラ活性炭の水蒸気吸着等温線を示した。牛糞堆肥と異なり低相対圧部での吸着量が少なく、

相対圧0.6を越えると吸着量が大きくなっている。

牛糞堆肥炭化物の調湿能は0.251g-H₂O/g、市販のヤシガラ活性炭の調湿能が0.158g-H₂O/gであった。このように牛糞堆肥炭化物は調湿材として優れた性能を有していることが明らかとなった。

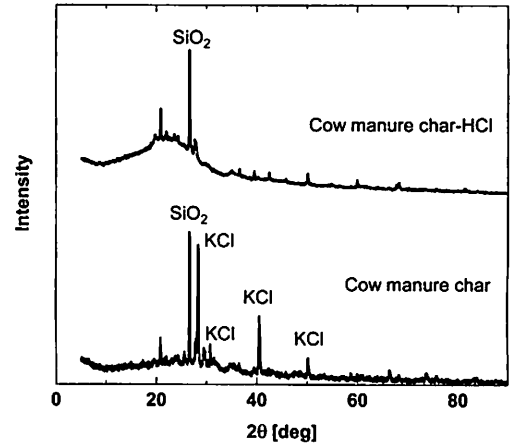


図9 各炭化物に対するX線回折パターン

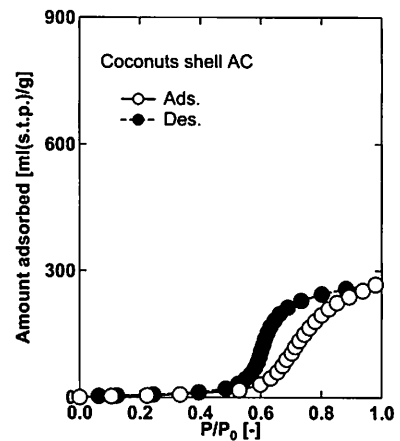


図10 ヤシガラ活性炭に対する水蒸気吸着等温線

4. 結言

湿潤バイオマスの堆肥化過程の発酵熱によってバイオマスを乾燥させ、その乾燥したバイオマスからバイオマス自身の揮発分を燃料として炭化物を製造するプロセスは、エネルギー生産プロセスとして成り立つことが明らかとなった。

また、得られた炭化物を調湿剤として利用する場合、市販の活性炭よりも優れた調湿能を示すことが明らかとなった。

現在、このプロセスは(株)白滝有機産業岡山工場で商業的に稼働中である。