

バイオマス利用技術の現状

Status Quo of Biomass Utilization Technology

松 村 幸 彦
YUKIHIKO MATSUMURA

広島大学大学院工学研究院 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1
TEL: 082-424-7561 FAX: 082-422-7193
E-mail: mat@hiroshima-u.ac.jp

Institute of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8527, Japan

(原稿受付 2016年8月21日 / 原稿受理 2016年9月3日)

Biomass utilization technology is overviewed. Technologies to utilize biomass can be classified into physical, thermochemical, and biochemical technologies. The application of these technologies can be pretreatment, energy conversion, and material conversion. Making the best of the advantages of each technology, appropriate technology should be selected, considering the type of feedstock, final products, and purpose of utilization.

キーワード : バイオマス, 物理的変換, 熱化学的変換, 生物化学的変換

Key words: biomass, physical conversion, thermochemical conversion, biochemical conversion

1. 緒 言

バイオマスは「生物の活動によって生産される原料・燃料として利用可能な有機物」である。これは、化石燃料を代替することを踏まえて議論を行うための定義である。バイオマスを利用して化石燃料による二酸化炭素の排出量削減に寄与するためには、ある程度の量(マス)の貢献が必要である。このため、極めて高価だがごく少量しか生産されない抗生物質や、化石燃料代替とならない食料、飼料は外して考え、化石燃料の主要な用途である原料と燃料を対象としてバイオマスを定義する。バイオマスは光合成によって太陽光から生産できるため再生可能であり、また、光合成の時に二酸化炭素を吸収するため、循環して生産利用する限りにおいては大気中の二酸化炭素濃度を変えない炭素中立である。

近年、地球温暖化対策として再生可能エネルギーの導入が注目されている。太陽光や風力は、ポテンシャルは大きい、希薄性と変動性のために導入が制限されている。これに対して、バイオマスは化学エネルギーであるために貯蔵性に優れ、利用にあたっては従来のインフラストラクチャを利用できる形態が作りやすいメリットを有している。このため、バイオエタノール、バイオディーゼルなどの形で導入が広く進み、さらにバイオマス発電も進められている。この目的のためには、上記の物理的変換、熱化学的変換、生物化学的変換を利用して効率良く安価に望ましい生成物を得るプロセスを構築する必要がある。

バイオマスを利用することを考えると、バイオマスは

天然に存在する1次資源であり、利用にあたっては我々が利用しやすい形態である2次資源に変換する必要がある。これは、地面から掘り出した原油がそのままでは利用できず、精留、改質、分離、発電などの変換によって実際に利用するガソリン、軽油、エチレン、電気などを得ていることに相当する。バイオマスの有効利用にあたっては、効率良く変換を行うために前処理が用いられることが多く、その利用法には、化石燃料と同様にエネルギー利用ならびにマテリアル利用がある。その変換手法には大きく分けて物理的変換、熱化学的変換、生物化学的変換がある。物理的変換は、原料の化学的組成を変化させない粉碎、乾燥、抽出などの操作を行うものであり、比較的安価かつ容易な処理である。熱化学的変換は熱を加えて化学反応を進行させ、求める物質を得るものである。反応が迅速で完全にできるメリットがあるものの、特定の物質のみを得ることは難しい。なお、常温に近い反応であっても生物学的な反応を用いないものは便宜上熱化学的変換として扱う。生物化学的変換は、微生物やその生産する酵素を用いた変換である。常温に近い温和な条件で進行させられ、酵素反応に代表されるように選択率が高く、また、付加価値の高い物質を得ることができるメリットがある。あえて問題点を挙げれば、反応速度が比較的遅く、また、原料のすべてを変換することができないため残渣処理が必要となる。

本稿では、バイオマス利用技術についての分類を示し、技術開発の状況についても簡単に紹介する。

表 1. 各種の変換技術例

	前処理	エネルギー変換	マテリアル変換
物理的変換	乾燥 粉碎	薪生産 チップ化 ペレット化 ブリケット化	建材生産 抽出物生産 パーティクルボード生産
熱化学的変換	水蒸気爆砕 蒸煮 半炭化 酸糖化 水熱前処理	直接燃焼 (専焼) 混焼 熱化学的ガス化 急速熱分解 炭化 超臨界水ガス化 直接液化 水熱炭化 スラリー燃料化 エステル交換	クラフトパルピング ガス化プラスチック合成 土壌改良剤生産 水熱成分分離
生物化学的変換	酵素加水分解 酵素糖化 白色腐朽菌処理	メタン発酵 エタノール発酵 水素発酵 ABE発酵	堆肥化 乳酸発酵 飼料化 有用物質発酵

2. 変換技術の分類

バイオマスの利用技術の分類は、利用する原料が乾燥系のバイオマスか、含水系のバイオマスか、生成物が固体か、液体か、気体か、などによっても行うことができるが、技術全体を系統的に理解する上では、前処理か、エネルギー利用か、マテリアル利用か、その変換に物理的、熱化学的、生物化学的のどの技術を用いるかによる分類がわかりやすい。無論、各変換技術に有効に用いることができるバイオマスの種類ならびに得られる生成物も異なり、実際には経済性を重視して、ニーズを満たす技術が利用されている。表 1 に各種の利用技術の一覧を示す。

2.1 前処理

前処理はバイオマスを実際に変換する前に、変換が容易に、効率的に、あるいは迅速にできるように予め処理をしておくことである。前処理は一つだけとは限らず、場合によっては粉碎したあとに高温高压の熱で成分を分離して、酵素で反応性を高めてから実際の発酵を行うなど、複数の前処理を行うこともある。

乾燥、粉碎などの物理的前処理はよく用いられる。特に、嵩高いバイオマスを変換装置に供給するためにチップに粉碎したり、燃焼やガス化しやすくするために乾燥したりすることは一般的である。また、メタン発酵の原料を発生した固体形状のまま供給するのではなく、粉碎したり異物を除去しておいたりすることは、ガスの発生率を高めることに寄与する。

熱をかけて後段の反応が進行しやすくする熱化学的前処理も高効率化のために有効である。特に、高温高压の水で処理をすることによってバイオマスの細胞構造を壊し、細胞内物質を放出させる水熱前処理は、メタン発酵などの微生物の反応を迅速にする効果がある。同様に、糖以外の原料から工業用、食品用、燃料用などのエタノールを生産するにあたっては、エタノール発酵の原料となる糖をデンプンやセルロースを加水分解して得る必要がある。デンプン質原料を原料としてエタノールを生産する場合には、蒸煮という前処理が酵素加水分解の前に用いられる。これは、デンプンが粉末状であると酵素による加水分解速度が低いために、加熱溶解して糊化することによって均一相とし、加水分解速度を高めるもの

である。高温で加熱するために雑菌も死滅し、さらに後段の発酵で酵母以外の微生物によるコンタミネーションを防止する意味も有する。原料がリグノセルロース系のバイオマスの場合には、セルロースの加水分解を効率良く行うための前処理が求められる。水蒸気爆砕はこの目的のために用いられ、対象バイオマスを高圧の水蒸気の中で処理し、一気に減圧して組織構造を壊す。水熱前処理も同様の目的のために用いられる。特にリグノセルロース系のバイオマスでは、セルロースの周囲にヘミセルロースやリグニン存在するために、後段の酵素加水分解においてセルラーゼがセルロースに効率良く接触することができない。ヘミセルロースやリグニンをセルロースから分離することが求められる。高温高压の水の中では加水分解も一部進行する。また、前処理ではなく、一段の操作で糖を得るために酸加水分解を行うこともある。ロシアで開発されたショーラー法では希硫酸を、戦後に開発された北海道法では、濃硫酸を用いて木材から糖を得た。ただし、酸を用いると生成した糖の一部もさらに分解されてしまう問題点はある。

また、微生物やその生産する酵素を用いて、原料の化学組成を変化させておき、後段の反応を進行させる生物化学的前処理は、発酵において広く用いられている。必ずしもバイオマスの例とは言えないが、日本酒の生産には麴を用いて、ビールの生産には麦芽を用いて、それぞれアルコール発酵の前にデンプンを加水分解して糖化している。バイオマス利用では、セルラーゼを生産する生物にセルラーゼを生産させて、この酵素を抽出、直接原料バイオマスに作用させることが多い。生物そのものを利用する場合には、生成した糖の一部を生物自身が消化してしまうために収率が低下してしまう。ただし、酵素は高価であり、その経済性の改善が求められている。また、加水分解を行って得られるものは糖だけではなく、一般の食品については各種酵素を用いてタンパク質からアミノ酸を、脂質からグリセリン、脂肪酸を得ることができる。これらについては、メタン発酵の速度を高める前処理として検討されることがある。また、白色腐朽菌を用いて、リグニンを分解し、セルロースを後に残すことによってエタノール発酵のための糖化を効率化するプロセスの検討も行われている。

2.2 エネルギー利用

エネルギー利用における物理的変換は広く用いられている。特に途上国では薪の利用が重要なエネルギー源となっているが、これは、木材を適切な大きさに切り、天日干しなどによって乾燥するものである。切断によって木の表面積を大きくすることができるが、このことは燃焼における酸素の供給を容易にするとともに、乾燥時に木の内部からの水分の拡散距離を短くして乾燥時間を短縮することにもなる。無論、乾燥することによって燃焼特性は改善し、含有水分の蒸発潜熱による熱損失も抑制できる。近年は、チップ、ペレットなども用いられる。チップは木材を数 cm の大きさに破碎したもの、ペレットはおがくず程度まで破碎してから熱をかけて整形したものである。ペレットは小さな穴に圧力をかけておがくずを通すことによって摩擦熱で温度が上昇させ、リグニン成分を融解、おがくずの粒子同士を接着、固化させるため、強度がある。いずれも化学的組成は変わらず、表面積を大きく増やしてハンドリング性を高める効果がある。薪の連続供給は必ずしも容易ではないが、チップやペレットは機械による連続供給や、その制御が容易であり、また、密度も高くできるため輸送効率も高められる。これらの物理的変換は主として固体燃料を生産するのに用いられる。ペレットと同様に粉碎した木材を固めて燃料化するものにはブリケットと呼ばれる燃料もある。これは薪の大きさに固めるもので、日本ではオガライトという名称でも呼ばれている。

熱化学的変換は、熱をかけて化学反応を進行させ、エネルギー密度の高い燃料を得る操作である。熱をかけるために、一般的には水分を多く含む含水性バイオマスには適用が困難であり、乾燥系のバイオマスを燃焼、ガス化、炭化して利用することが多く行われている。燃焼には、バイオマスだけを燃料として燃焼を行う専焼と、バイオマス以外の燃料と一緒に燃焼を行う混焼がある。混焼は、既に存在している燃焼設備に、必要に応じてバイオマスの処理設備を付带的に追加するだけで実現が可能であり、比較的安価に導入ができる。また、バイオマスそのものの量が少なくても、他の大規模な燃焼設備で全体として大きな規模で燃焼を行うことができる。通常、規模が大きいほど効率も経済性も高くなるので、バイオマスが少量しか集まらない場合でも経済的に、高効率の利用をすることができるメリットがある。一方、供給する酸素の量を絞りながら熱をかけることによって熱分解反応を進行させ、各種の燃料を得ることもできる。気体燃料を得る場合をガス化、液体燃料を得る場合を急速熱分解、固体燃料を得る場合を炭化と呼ぶ。熱分解の条件を制御して目的物質の収率を高くする。例えば、完全燃焼には不十分な量の空気や水蒸気などを供給するとガスの収率が高くなる。急速に昇温して、分解が十分進む前に冷却すれば液体燃料の収率を高くすることができる。一方、含水性のバイオマスを熱化学的に変換する工夫もなされており、この場合には圧力をかけて水が蒸発しないようにする。液相の水の中でバイオマスを熱処理することによって加水分解や熱分解を進行させることができ、温度と処理時間によって炭化物や熱分解油、可燃性のガスを得ることができる。ガスを得る場合を超臨界水

ガス化、熱分解油を得る場合を直接液化、炭化物を得る場合を水熱炭化と呼ぶ。炭化物を水の中に懸濁させた形で燃料として利用することがあり、これはスラリー燃料化と呼ぶ。このほか、油脂から軽油代替燃料を得るためにメタノールとエステル交換反応を行ってバイオディーゼル燃料を得る方法が広く用いられている。油脂は粘度が高く、そのままでは軽油代替燃料としては利用できないが、バイオディーゼルとすることによって従来のディーゼルエンジンでも利用することができる。

生物化学的変換は比較的温和な条件で、高い選択性での変換が可能である。エネルギー変換のための生物化学的変換については、メタン発酵、エタノール発酵がすでに広く用いられている。前者は嫌気性発酵によって含水性の有機物からメタンと二酸化炭素を主成分とする燃料ガスを得る技術であり、比較的簡便な設備でも一定量のガスが得られることから、発展途上国で広く用いられる他、我が国においても戦後多く用いられていた。特に、家畜を飼っている農家では、その糞を空気が入らないようにした空間にためておくだけで燃料ガスが得られるメリットがある。現在の日本ではさらに温度や滞留時間などを制御して効率を高める設備が、ビール工場、下水処理場、畜産農家などを中心に導入されている。メタン発酵の問題点の一つは廃水処理で、廃水が発生しない乾式メタン発酵の技術開発も進められている。エタノール発酵は酵母を用いて糖からエタノールを得る技術であり、生成したエタノールはガソリンに混合したり、そのまま燃料としたりして、自動車に用いられる。もともとブラジルで砂糖価格の安定化のために用いられていたが、その後、米国で農家の保護も目的としてトウモロコシから生産されるようになってきた。トウモロコシのようなデンプン原料の場合には糖化前処理が必要になる。中国でもトウモロコシを用いた生産が一部行われ、タイでは廃糖蜜やキャッサバを用いたエタノール生産が進められている。糖やデンプンは食料となるため、人口増加と食糧不足が懸念されていることから、これらの原料ではなく、木や草などのリグノセルロース系バイオマスのセルロースを糖化してグルコースを得、これを原料としてエタノールを生産することも検討されている。これは第2世代バイオエタノールと呼ばれる。メタン発酵の条件を変えて水素の生成までで生成物を回収する水素発酵や、主に *Clostridium* 属細菌を用いてアセトン、ブタノール、エタノールを得る ABE 発酵なども利用が検討されている。

2.3 マテリアル利用

マテリアル利用においても上記の変換技術は有効である。エネルギー生産と比較して生成物の販売価格が高く設定できるメリットがある。

木質バイオマスについて考えれば、材木から建材を生産するのは基本的に物理的処理である。パーティクルボードの生産も粉碎してチップ化したものを接着剤を用いて熱圧成形しているもので、化学的組成を変えない物理的変換である。この意味ではもっとも基本的な変換方法と考えることもできる。抽出物の生産も化学反応を伴わない物理的な変換である。

熱化学的変換は、特定の生成物だけを得るには適しておらず、マテリアル利用には限定的になるが、炭化物を

土壌改良材にするなどの検討がなされている。成分の化学組成を変えずに有用成分を分離回収するという意味では、クラフトパルピングが大きな市場を有するマテリアル変換である。リグノセルロースを構成するヘミセルロース、リグニン、セルロースのうち、アルカリ処理によってヘミセルロースとリグニンを分離して、セルロース繊維を残し、こうして得られたパルプを原料として製紙を行っている。成分分離という観点では、アルカリではなく高温高压の水を用いて所定の成分を回収する研究もなされている。この他、基礎研究段階ではあるが、バイオマスのガス化を前処理として用い、得られた合成ガスを原料としてガス発酵を行ってバイオプラスチック原料を得る検討なども行われている。

生物化学的変換は、選択性が高いためマテリアル利用には有効であり、好気性発酵による堆肥化、乳酸発酵によるポリ乳酸の生産、同じく乳酸発酵が主として行われる飼料化などが行われている。堆肥化は家畜排泄物やメタン発酵残渣を原料として好気性の微生物によって分解を進行させ、このときの発酵熱で雑草の種子や病原菌微生物を殺すと共に、有機酸やアンモニアなどの有害物を分解、揮発除去して、肥料を得るものである。リン、カリウムなどの栄養塩をそのまま濃縮して残して再利用することにつながり、有機系廃棄物の再生利用技術として広く用いられている。なお、時々誤解があるが、しっかりと堆肥化を行う場合には炭素分の8割程度は二酸化炭素として放出してしまうので、炭素固定の効果は限定的である。乳酸発酵は、糖を原料として行われ、バイオプラスチックであるポリ乳酸を生産するために工業的に行われている。バイオプラスチックにはポリ乳酸の他にも各種のものが提案されており、目的とした生成物を生産する微生物が利用される。飼料化は、天然に存在する乳酸菌を用いて草などを発酵させ、乳酸によって保存性を高めるもので、サイロなどを用いて夏の間草を貯蔵し、自然に飼料化して冬の間家畜に供給することが以前から行われている。近年は、大きなサイロではなく、プラスチックのシートで原料の草を密閉してその中で飼料化を進行させることも行われている。このほかにも付加価値油などの有用物質を生産する微生物を用いる技術開発も行われている。

3. 新規の技術開発

バイオマスそのものは、有史以来用いられてきたものであり、現在利用されている技術の大部分は、薪炭利用、燃焼発電、ペレット燃焼、エタノール発酵、バイオディーゼル生産など、確立された従来技術である。無論、効率化の工夫はなされており、環境影響も低減されているが、発展途上国などでは、旧来の技術がそのまま利用されている例も少なくない。一方、新規の技術開発も進められている。本章では新規の技術開発の代表的なものを以下に紹介する。

リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産は、草や木からセルロースを分離して加水分解し、得られたグルコースを原料にエタノール発酵を行うものである。セルロースの加水分解が大きな問題となっていたが、近年、酵素の改善などの技術開発によって商用プラントがいくつか稼働する状況になっている。高温高压技

術を利用したバイオマスの変換も研究開発が進められている。水を用いて比較的低温で処理を行えば、後段の発酵速度を高めるなどの効果が得られ、臨界点以上の高温高压で処理を行えば、水素やメタンを含む可燃性のガスを得ることができる。実用化にはコスト面での改善が必要だが、実証運転は行われている。海洋バイオマス利用も近年注目を浴びて進められている。陸地は食料生産に用いる必要があるという認識の上で、海洋を利用して資源を生産するもので、微細藻類を使うシステムと大型藻類を用いるシステムの検討が進められている。近年、導入が進んでいる技術にはバイオマス高温ガス化発電がある。これまで、生成ガス中に含まれるタールが問題となって実用化が進んでいなかったが、これを解決したプラントが生産されて普及が進んでいる。バイオリファイナリーは、システムの経済性を高めるために検討が進められており、技術の組み合わせによるシステムの効果を期待して、様々な中間体をプラットフォームとしたものが提案されている。遺伝子組み換えによる微生物の設計も進められている。各種の微生物に遺伝子を組み込んで従来にはない化学反応を進行させることによって新規なプロセスを効率良く進めさせることができる。

また、上記の組み合わせによる発展的なシステムの検討されている。例えば、CRESTプロジェクトでは大型藻類を水熱前処理してメタン発酵ならびに有用油発酵を行い、廃棄物は光合成細菌で有用金属を、イオン液体で有用物質を回収することによってエネルギー生産と経済性を両立するシステムが提案されている。

4. 終わりに

各種の変換技術が、前処理、エネルギー変換、マテリアル変換のために利用できる。実際のプロセスを構築するにあたっては、適切な技術を利用して、処理速度の向上、操作性の改善、コストの低減、収率の最大化などが実現される。現在のプロセスを改善するにあたって、適切な前処理や副生物の処理を表1を参考に検討することも有効であろう。

最後に参考文献を紹介しておく。バイオマス利用技術に関する基本的な情報を得るには、バイオマスハンドブック第2版³⁾が良い。学術的な検討の基礎を得るにはバイオマスプロセスハンドブック¹⁾を勧める。用語の英語表記などを理解するにはバイオマス用語事典²⁾が有効である。一方、実際にバイオマスを導入する上で注意する項目については、バイオマス技術ハンドブック—導入と事業化のノウハウ⁴⁾が役に立つ。

文 献

- 1) 化学工学会・日本エネルギー学会共編. 2012. バイオマスプロセスハンドブック. オーム社.
- 2) 日本エネルギー学会編. 2006. バイオマス用語事典. オーム社.
- 3) 日本エネルギー学会編. 2009. バイオマスハンドブック第2版. オーム社.
- 4) 新エネルギー財団編, 日本エネルギー学会編集協力. 2008. バイオマス技術ハンドブック—導入と事業化のノウハウ. オーム社.