

技術チーム

「廃棄物系バイオマスの有効利用とその現状に関する技術調査」報告

【目次】

1. はじめに	1-1
2. バイオマスガス化	1-1
2. 1 利点と方法、プロセス	
2. 2 ガス化、発電の事例	
3. 間接液化（メタノール, DME）	1-5
3. 1 ガス化改質と触媒合成反応	
3. 2 バイオマスからの輸送燃料の製造	
4. 直接液化, BDF, 発酵	1-8
4. 1 直接液化	
4. 2 バイオディーゼル燃料	
4. 3 メタン発酵	
4. 4 エタノール発酵	
5. その他次世代技術	1-14
5. 1 飼料化	
5. 2 肥料化	
5. 3 次世代技術	
6. 木質系バイオマスの収集、運搬	1-25
6. 1 日本の森林と林業の現状	
6. 2 調達コスト	
6. 3 木材の搬出方法	
6. 4 林業機械	
6. 5 労働生産性	
6. 6 エネルギー利用	

1. はじめに

我が国は薪や炭が太古から使用されてきたが、1960年代後半に化石エネルギーの使用の増加に伴い衰退してしまった。1980年代の第二次オイルショックを契機に新たなバイオエネルギーの有効利用が検討されてきた。

バイオマスは多種多様であり、バイオマスの持つエネルギーを有効利用するためにはそれぞれのバイオマス種に応じた熱化学的変換技術を選択する必要がある。代表的なバイオマス種と変換技術を表1-1に示す。

表1-1 それぞれのバイオマス種に応じた熱化学的変換技術

バイオマス種		木質系	草木系	農業残渣	家畜糞尿		都市廃棄物		セルロース	植物油	
Dry/Wet		Dry	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet			
変換技術	燃焼	直接燃焼発電	◎	○		○		○		○	
		混焼発電	◎	○		○		○		○	
	熱化学的変換	溶融ガス化	○	○		○		◎			
		部分酸化ガス化	◎	◎		◎		○			
		低温流動層ガス化	◎	◎		◎		○			
		急速熱分解	◎	○		○		○			
		スラリー燃焼化	◎					○			
		超臨界メタノール抽出	◎							◎	
		超臨界水ガス化			◎		◎		◎		
		炭化	◎								
		エステル化									◎

(◎ : 最適 ○ : 利用可)

本調査では廃棄物系バイオマス、特に木質系を中心とした熱化学的変換技術を中心に技術動向をまとめた。補完的には飼料や肥料、メタン発酵、生分解プラスチックに関しても次世代技術と捉えて現況を紹介した。

2. バイオマスガス化

2.1 利点と方法・プロセス

バイオマス資源の多くは固体であるため、ハンドリングの点で難点があり、熱利用する際にはボイラーなどに用途が制限される。また、高含水率のバイオマスでは水分の蒸発に潜熱が奪われてしまうため、エネルギー効率が低下してしまう。バイオマスのガス化によって、燃料としての質が向上し、エンジンやタービン、燃料電池などに利用先が拡大することによって、高いエネルギー効率で使用できることが期待される。

バイオマスのガス化は生物学的な反応を利用して行うこともできるが、ここでは熱化学的な方法によるガス化について取り扱う。表2-1にガス化の方法について、幾つかの区分¹⁾を示す。ガス化は常圧で行われる場合と、加圧状態で行われる場合があり、超臨界状態も利用されている²⁾。ガス化剤に用いられるのは、空気や酸素、水蒸気などで、これらを組み合わせ用いられる場合もある。反応条件をより穏やかにする目的で、水蒸気に加えて二酸化炭素が用いられることも検討されている³⁾一方、ガス化反応の反応場に二酸化炭素の吸収剤（カルシウム）を投入することで、水素を主成分とするガスを直接製造する手法も検討されている⁴⁾。一方、含水率が高いバイオマスに対しては、水を反応媒体とする水熱ガス化の

方法が用いられる。

表 2-1 ガス化の区分

区分	条件因子
ガス化圧力	常圧(0.1~0.12MPa)、高圧(0.5~2.5MPa)
ガス化温度	低温(700℃以下)、高温(700℃以上) 高温分解(灰溶融温度以上)
ガス化剤	空気、酸素、水蒸気またはこれらの組み合わせ 特殊なケースでは二酸化炭素を利用
加熱方法	直接ガス化(部分酸化) 間接ガス化(外部加熱)
ガス化装置	固定床、流動床、循環流動床、噴流床 混合床、ロータリーキルン、溶融炉

日本エネルギー学会, アジアバイオマスハンドブック—バイオマス利活用の手引—(2008), Table4. 2.1 の一部を和訳

バイオマスのガス化は、100℃前後でまず水分の蒸発が起こり、200~300℃でバイオマスの熱分解が始まり、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、水などの揮発成分が気化する。温度の上昇とともに高沸点の成分が気化し、これらはガス化剤と反応して低分子のガスに転換されるが、未反応のものは縮合してタールやすすとなる。残りの固形成分もガス化剤と反応してガス化されるが、この反応は遅いため残分として残りやすい。木質バイオマスの噴流床型ガス化炉を用いたガス化の冷ガス効率(生成ガスの高位発熱量/投入バイオマスの高位発熱量)では、70~80%の値が報告されている⁵⁾。ガス化プロセスの低温化や、不要なタール分の生成量を低減させるためには触媒の利用が効果的であるが、高価な触媒が劣化する難点もある。

バイオマスガス化により生成するガスの発熱量は、一酸化炭素、二酸化炭素、炭化水素、水素などの構成比によって変化する。一般的な発熱量は数 MJ/m³~十数 MJ/m³であり、天然ガスの発熱量(40MJ/m³程度)と比較すると、かなり低い値となる。従って、既存のガスエンジンやガスタービンを用いる場合には、システムを設計する際に配慮が必要であり、バイオマスガス化に適した装置の開発が求められる⁶⁾。

2.2 ガス化・発電の事例

バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第2版)に記載されている、木質バイオマスガス化・発電の事例を表2-2に示す。最大のもので、1400kWの定格出力となっている。

表 2-2 木質バイオマスガス化・発電の事例

設置場所 県名	事業主体	施設名	運転開始 (年度)	休止 停止 (年度)	事業費 (万円)	バイオマス 利用計画		定格 出力 (kW)	エネルギー 利用方法	
						原料	処理量		発電電力	発生熱
岩手	衣川村	高田バイオ コミュニ ティーセ ンター黒滝 温泉	試運 転中		5600	木材 チップ	0.3t/日	20	温泉施設 で利用	温泉施設 で利用
岩手	月島機械 (株)		2005	2008		製材屑、 間伐材	4t/日	156		
山形	(株)立川 CSセン ター		2003	2007	15000	おが屑、 間伐材	2.3t/日	50	センター 内機械動 力	資材乾燥、 施設暖房、 給湯他
山形	大幸テッ ク(株)		2002	2006		建設廃材	10t/日	28		
千葉	三井造船		2004			木屑、 木材、 廃棄物 チップ	150 kg/時			
神奈 川	フォレスト エンジニ アリング (株)	環境事業 団実証施 設	2000			(選定材、 コンパネ、 柱材)	450 kg/時	270 (LPガ ス混 焼)		
石川	(株)明電 舎		2005	2009		製材屑、 間伐材	1.8t/日	36		
三重	三重中央 開発(株)	バイオマ スガス化 発電	2005		300000	木材 チップ	96t/日	1400	施設内利 用、 水処理施 設	隣接プラ ントで利用

設置場所 県名	事業主体	施設名	運転開始 (年度)	休止 停止 (年度)	事業費 (万円)	バイオマス 利用計画		定格 出力 (kW)	エネルギー 利用方法	
						原料	処理量		発電電力	発生熱
三重	信栄木材		1981			杉おが屑	51.6 kg/時	20	場内利用	
兵庫	宍粟市		2003			製材端 材、 削り屑、 おが粉	40 kg/時	30	丸棒加工 工場、 施設内利 用	燃料乾燥、 暖房
奈良	トリスミ集 成材(株)	おが屑ガ ス化コジ ェネレー ションシ ステム	2005			おが屑 BDF	おが屑 4.7t/日 BDF 144~ 816 L/日	300	工場内利 用	工場内利 用
山口	中外炉工 業(株)	森林バイ オマスの ガス化発 電システ	2003	2006		間伐材 チップ、 竹チップ、 製材屑	5t/日	176	製材工 場、 施設内自 己消費	
徳島	八木建設 (株)		2005	2008		廃木材	1.4t/日	50	場内利用	場内利用
福岡	九州電力 (株)、 西日本環 境エネル ギー(株)		2004	2007		間伐材	1t/日			
長崎	九州沖縄 農業研究 センター、 長崎総合 科学大学	農林バイ オマス3号 機	2004			間伐材、 おが屑、 パーク、 稲わら、 ネピアグ ラス				

#バイオマスエネルギー導入ガイドブック第2版⁶⁾、表 2.1-3 より抜粋

システムフローの一例を図 2-1 に示す。このシステムでは、原料は廃熱を利用して乾燥された後、ガス化炉に導入される。発生ガスはガスエンジンの燃料として利用される。

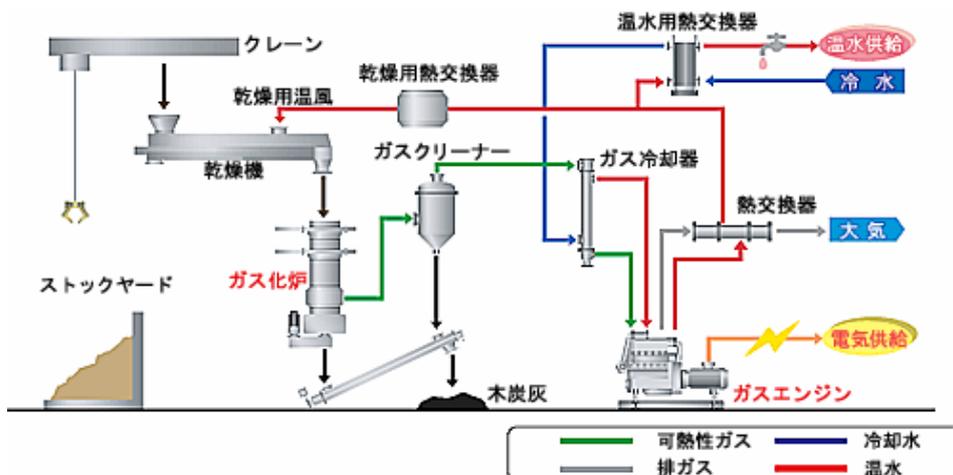


図 2-1 木質バイオマスガス化システムフロー図

#月島機械（株）ホームページ (<http://www.tsk-g.co.jp/tech/industry/bio04.html>)

また、固定床ガス化炉の実施事例を図 2-2 に示す。原料のチップは反応器上部から供給され、ガス化剤は炉底から供給される。ガス化反応は底部から上部へ向けて進み、灰層、チャー層、揮発・熱分解層、生材層の各層を形成する¹⁾。

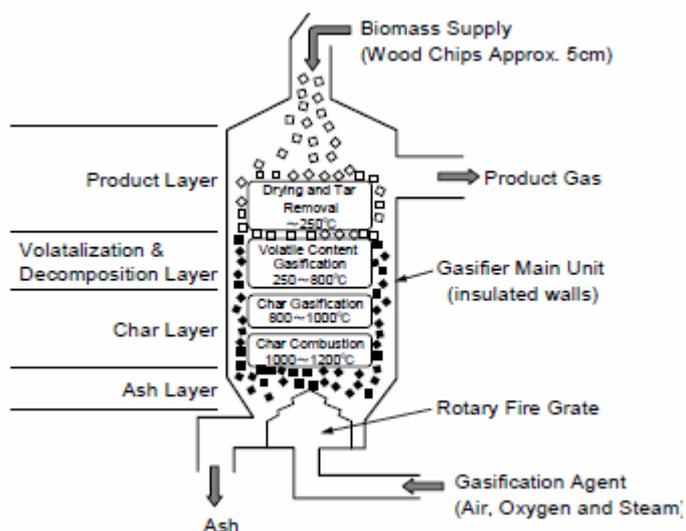


図 2-2 固定床ガス化炉概念図

#アジアバイオマスハンドブック¹⁾、Fig. 4. 2. 2 より

(参考文献)

1) 日本エネルギー学会, アジアバイオマスハンドブック—バイオマス利活用の手引—, (2008)

- 2) 松村幸彦, 超臨界水流動層を利用したバイオマスガス化の技術開発, RITE NOW, 44, p. 15, (2002)
- 3) 特開 2006-008872
- 4) 美濃輪智朗, バイオマスからの水素製造技術の開発, 第 2 回バイオマスプロジェクト研究センターシンポジウム資料, (2005)
- 5) 新日鉄エンジニアリング株式会社ニュースリリース, 木質バイオマスを原料とする高効率ガスエンジン発電システムの開発, (2006)
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), バイオマスエネルギー導入ガイドブック第 2 版, (2005)

3. 間接液化 (ガス化+触媒合成)

3.1 ガス改質と触媒合成反応

燃焼プロセスにおけるバイオマスの熱分解で発生する可燃性熱分解ガスは酸素が供給されれば炎をあげて燃焼する。この過程は非常に早い反応である。一方、ガス化しなかった炭素は固定炭素 (チャー) と呼ばれ、これが燃焼するためには酸素が固体の細孔内を拡散し気相へ出て行く過程を経なければならない。従って、この過程は緩慢に進む過程であり、この間、固相は赤熱する。熱分解プロセスとは、無酸素状態もしくは酸素濃度の希薄な状態でバイオマスを加熱し、低分子の物質に分解することで、熱分解を受けたバイオマスは、水素、メタンなどの炭化水素の他一酸化炭素など常温で気体である可燃ガスとアセトン、メタノールなどの常温で液体や固体である多くの物質を含んだタールや油、さらに固定炭素 (チャー) と灰分からなる固体に分解される。一般的にはガス化の割合を多くするためには加熱の速度を早くするのが望ましい。

一般に、ガス化プロセスは熱分解ガスの一部を燃焼して高温とし、ガスに含まれるベンゼン核等の低分子を、一酸化炭素や水素等を主成分とするガスに改質する。改質後、除去設備で硫黄化合物、塩素化合物、煤塵等を分離し、精製合成ガスとして工業用燃料やメタノール、アンモニア合成に利用する。なお、ガス改質後にガスを概ね 200°C 以下に冷却し、ダイオキシンの発生を防止する¹⁾。

合成ガスからの液体燃料の製造に関しては、バイオマスガス化でのガス浄化を十分行い、触媒の被毒・劣化防止を防止する。上記一酸化炭素と水素からのメタノール、ガソリン、DME の合成技術は表 3-1 に示す既存プロセスの合成反応に従う。表に示すように触媒層への導入前にガス化条件を整え、ガス比 (H₂/CO) をメタノールでは 2、DME では 1 に調整する。最適なガス比を得る技術、条件等を確立し、水蒸気改質行程を不要とすることが究極の目標である²⁾。

表 3-1 液体燃料の合成反応条件

液体燃料	合成反応	反応条件	触媒系
メタノール	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	230-260°C, 6-10MPa	Cu-Zn 混合酸化物
ガソリン	$n\text{CO} + 2n\text{H}_2 \rightarrow (-\text{CH}_2-)n + n\text{H}_2\text{O}$ (Fisher-Tropsch 反応)	200-300°C, 1-5MPa	金属 (Fe, Co, Ru 等)
ジメチルエーテル	$3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{CO}_2$	230-260°C, 6-10MPa	Cu-Zn 混合酸化物+ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, HZSM-5 等

3.2 バイオマスからの輸送燃料の製造

バイオマス由来のエタノール、BDF、ガス化合成液体燃料（エタノール、DME など）の通称バイオ燃料はカーボンニュートラルから炭酸ガス削減が期待され、硫黄、窒素などのヘテロ化合物や芳香族が含まれていないことから、自動車排ガス浄化の観点からも有利である。図3-1に食糧や付加価値の高いものと競合しない廃棄物系の固形バイオマスをガス化して合成ガスを製造し、これからメタノール、DME、ディーゼル代替燃料など輸送用の液体燃料を製造する技術、あるいはリグノセルロースを酵素や酸でC6やC5の糖に分解してから発酵法でエタノールを製造する技術を示す³⁾。

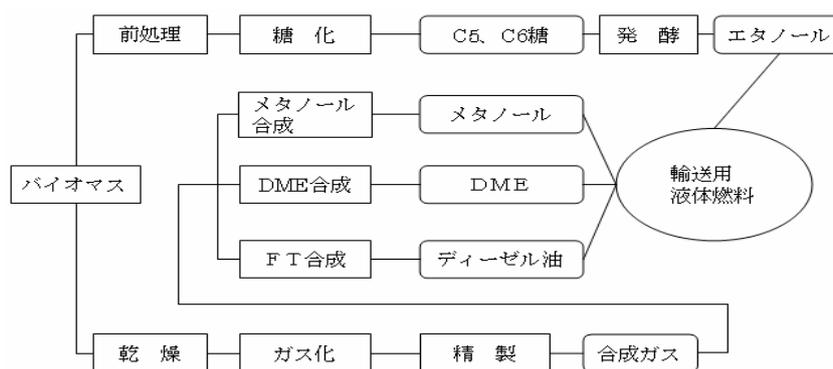


図3-1 廃棄物系バイオマスからの輸送用燃料の製造

バイオマス供給からメタノール製造までのシステムの構成の一例を図3-2に示す⁴⁾。装置は原料の前処理、供給、ガス化炉、ガス精製、メタノール合成から構成され、はじめに粉砕・乾燥された原料バイオマスをガス化炉へ定量供給する。バイオマスと酸素・水蒸気をガス化炉に供給し、バイオマスの一部を燃焼して800~1200°Cの高温領域を形成し、この熱によりバイオマス ($C_xH_yO_z$) を H_2 と CO を含有する生成ガスに転換する。次に、生成した高温ガスは生成ガス冷却塔にて冷却浄化される。冷却塔で回収した熱によりプロセス用の水蒸気を発生させ、その水蒸気および酸素により、メタノール合成に適する生成ガス組成（ガス比）に調整する。生成ガス中のダスト（未燃分と灰分）を除去後、水溶性成分、余剰水分および触媒被毒を除去する。最後に、精製されたガスを昇圧し、触媒を充填した合成塔で圧力3~12MPa、温度180~300°Cの下でメタノール合成し、合成塔出側の気液分離器でメタノール製品として分離する。NEDOは平成13年度よりバイオマスエネルギー高効率転換技術開発プロジェクトを進めている。

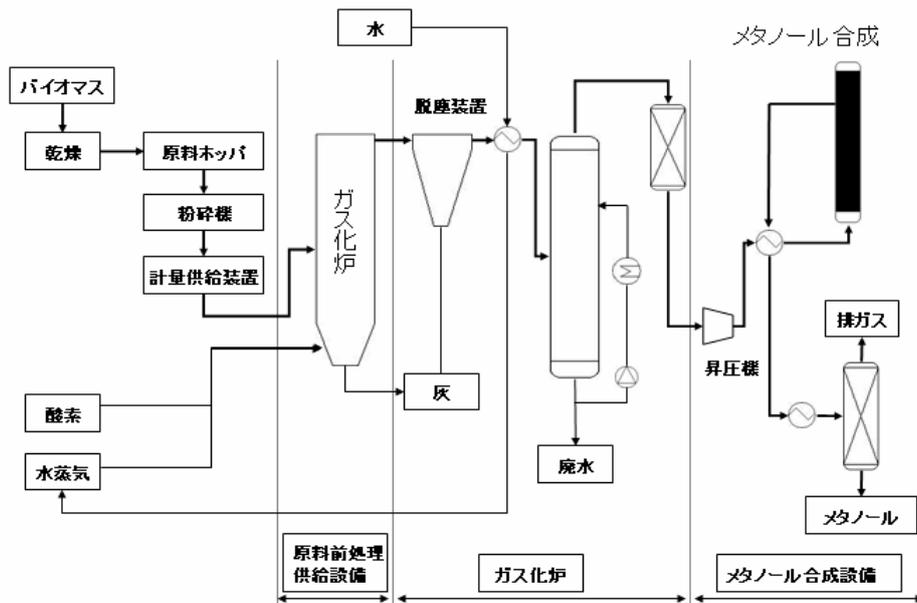


図 3-2 バイオマスガス化メタノール製造システムの構成

例えば、中部電力での日量 2 トン規模でのメタノール製造プラントにおける供給バイオマスの性状を表 3-2 に示す⁴⁾。粉碎後のバイオマス粒子は細長い円筒形状であり、表中の粒径はふるい分けによる粒径、すなわち短径である。また灰分は 0.3~1%であるが、流木は土砂の混入により 11%と大きい。建設廃材には壁紙や樹脂が混入している。バイオマスの構成元素は C:H:O の比率は約 50:6:43 と株の差異はない。発熱量はセルロースとリグニン含有量で差異があるが、ほぼ流木を除き、4600~5000kcal/kg と大きい。

表 3-2 バイオマス供給材の性状比較

項目	単位	杉	広葉樹	バーク	伐採木	流木	建築廃材	
水分 (破碎, 乾燥後)	wt%	13.7	13.7	15.9	11.1	10.7	11.8	
平均粒径 (短径)	mm	1.1	1.6	0.7	0.9	0.9	0.9	
かさ密度	kg/m ³	173	187	149	152	216	214	
(無水) 元素分析	C	wt%	50.8	48.2	50.7	50.2	45.3	49.7
	H	wt%	6.0	5.8	5.7	5.9	5.4	5.9
	O	wt%	42.8	45.1	41.4	43.0	37.7	42.5
	N	wt%	0.09	0.14	0.26	0.14	0.18	0.60
	S	wt%	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.08
灰分	wt%	0.31	0.74	1.87	0.59	11.4	1.08	
HHV (高位発熱量) (無水)	kcal/kg	4942	4684	4966	4869	4381	4818	

図 3-2 に示す噴流層ガス化炉では水蒸気投入を H_2O/C (モル比) = 2~3 とし、 O_2/C を 0.4 以上で冷ガス効率 70%を達成した。生成ガス中の微量成分濃度を表 3-3 に示す⁴⁾。アンモニアや硫化水素濃度が高い。COS、HCN 濃度は 1ppm 以下で低い。メタノール収率は計算では小型プラントで 20%程度、大型では 50%前後である。

表 3-3 生成ガス（乾きガス中）中の微量成分濃度

成分	杉	広葉樹	バーク	伐採木	流木	建築廃材
NH ₃	112 (11.7%)	597 (36.4%)	— —	228 (16.0%)	599 (25.3%)	926 (12.4%)
HCN	0.2 (0.02%)	0.3 (0.02%)	— —	0.2 (0.02%)	1.1 (0.05%)	0.9 (0.01%)
H ₂ S	30 (57.4%)	63 (41.0%)	102 (71.7%)	51 (37.9%)	105 (45.4%)	— —
COS	< 1 (—)	< 1 (—)	1.6 (1.1%)	< 1 (—)	1.8 (0.78%)	— —

単位：ppm 下段は原料中の元素からの転換率

過去の研究事例から木質バイオマスの受け入れ基準としては破碎前で長さ 150mm、厚さ 30mm 以下で、ガス化炉投入前で 1~2mm 以下に粉碎（バイオマス粒径 D50）し投入されちる。精製ガスのレベルは H₂S、COS、Sox が 30ppm 以下含まれており、硫黄分は酸化亜鉛、鉄キレートなどの脱硫触媒で 0.1ppm 以下に塩素系、アンモニア系も同じレベルにクリーン化されている。DME やメタノール触媒の被毒防止のためである。タール除去も重要で、主に水洗浄、接触改質、ガス濾過がある。

（参考文献）

- 1) 廣瀬他、バイオマスエネルギー変換技術の概観、化学工学、66、8、p455 - 458 (2002)
- 2) 鈴木、木質バイオマスの液化とガス化、木材学誌、48、4、p217 - 224 (2002)
- 3) 横山、バイオマスエネルギー変換技術の最新動向、クリーンエネルギー、16、p56 - 63 (2006)
- 4) 石井他、バイオマスの噴流床部分酸化ガス化、液体燃料合成一貫システムの開発、日本エネルギー学会誌、84、p420 - 425 (2005)

4. 直接液化, BDF, 発酵

4.1 直接液化

木材を 500~600℃で熱分解するとガス状生成物、水溶性生成物（木酢液）、重質液状生成物（タール）および残渣が生成する。しかし液状生成物は主に水や酢酸で、他にメタノール、フェノール等が含まれているに過ぎない。木材を水酸化ニッケルや硫化コバルト共

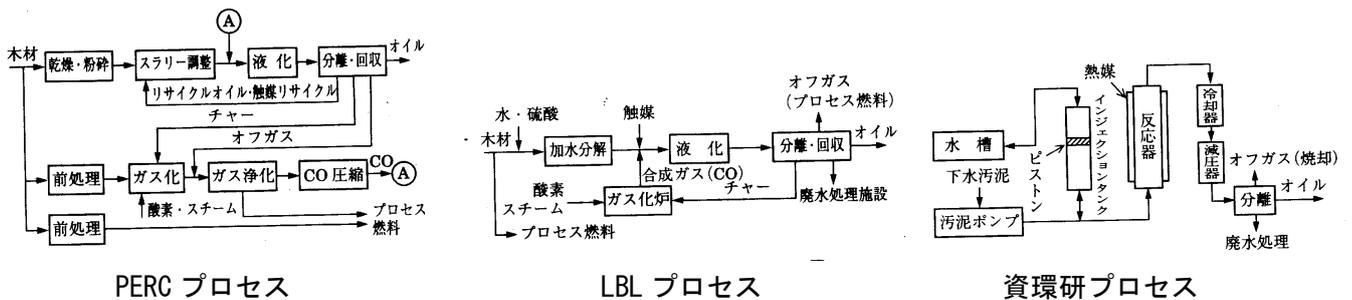


図 4-1 木材の直接油化反応プロセスの概要

存下の高圧水素中で反応させると液化することは 20 世紀初めには既に報告されているが、高価な水素が水として多く副生するため、工業的に実用性は乏しい。

木材などのバイオマスを 300°C、10 MPa 程度の熱水中で分解すると、バイオマスはいったん水溶性の生成物に分解され、この中間体が重合と分解を繰り返して最終的に 50%程度の油状生成物、チャー15%、ガス 15%、水溶性有機物 20%が得られる。水熱液化法はバイオマスを乾燥させずに直接処理することができるので、含水率の高い汚泥、藻類、生ゴミ等の処理に対してはエネルギー的には有利である。

● PERC プロセス

米国鉱山局が開発したプロセスで、木材を乾燥・粉砕させた後にリサイクル油と炭酸ナトリウム等の触媒と混合してスラリー状にしたものを、木材やチャーをガス化して発生させた一酸化炭素を主成分とする合成ガス中反応温度 340~360°Cで油化する。油化収率は乾燥重量基準で 42%、エネルギー回収率は高位発熱量基準で 63%である。

● LBL プロセス

カリフォルニア大学ローレンスバークレイ研究が開発したプロセスで、木材を 180°C、10 気圧、0.17%の硫酸で加水分解してスラリー状にした後、中和して炭酸ナトリウムと一酸化炭素を主成分とする合成ガス中 280 気圧、360°Cで油化する。原料の乾燥・粉砕工程が不要で、油化収率は乾燥重量基準で 35%、エネルギー回収率は高位発熱量基準で 54%と試算されている。

● 資環研液化法

PERC プロセスや LBL プロセスでは合成ガスが必要であったが、本法は還元性ガスを用いずに炭酸ナトリウムのみを使用する特徴がある。粉砕した木材に 5%の炭酸ナトリウムを添加し、300°C、100 気圧の熱水中で油化する。油化収率は乾燥重量基準で 50%、エネルギー回収率は高位発熱量基準で 70%を超える。この方法を下水汚泥に応用した場合には炭酸ナトリウムは不要で、0.5 t/d のパイロットプラントを運転した結果、有機物基準で下水汚泥の 50%が油化され、エネルギー回収率は高位発熱量基準で 70%であった。

還元性ガスを用いる PERC プロセスや LBL プロセスから得られた生成油の H/C は資環研法に比べて高い。これらの生成油には 10%~20%の酸素が含まれているために発熱量は石油系重質油に比べて低く、また酸性成分が多く含まれているために腐食性あり、粘度が高く重合による固化などの問題も多く、実用化するために改質が不可欠である¹⁾。

4.2 バイオディーゼル燃料 (BDF, Bio-diesel Fuel)

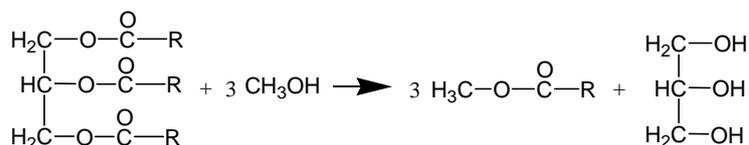


図 4-2 エステル化反応

植物油は常温で液体で発熱量が比較的高く、燃料として有望であるが粘性が高く引火点が低いためにそのままディーゼルエンジン用として利用す

ることはできない。通常、植物油をメタノールなどの単価のアルコールを水酸化ナトリウムなどのアルカリ触媒を用いてアルコリス反応させ、メチルエステルとグリセロールに分解して利用されている。

(1) ディーゼルエンジンの特徴

ディーゼルエンジンの熱効率は46%(直噴射式)とガソリンエンジンの32%に比べて高く、燃費が高く同じ走行距離での温暖化ガスの排出量が少ない。また高圧縮比に耐えるように頑強で、電気点火装置がなく構造が単純で耐久性に優れ、低回転域から広い範囲でトルクが一定であるためにトラックやバスなどの大型車で良く使用されている。一方、重量が大きいため騒音や振動が大きく最高回転数が制限されて同一排気量のガソリンエンジンに比べて出力が低い。また、窒素酸化物(NOx)やPM(粒子状物質)の排出量が多く、大気汚染の大きな原因の一つとなっていた。最近、軽油中の硫黄濃度規制が劇的に引き下げられてことで排ガス用触媒の機能が向上し、燃料噴射出力制御系も改良されたことでディーゼルエンジンからの排出ガスは大幅に清浄化された。

(2) バイオディーゼル燃料の製造ⁱⁱ

バイオディーゼル燃料の製造プロセスの概要を図4-3に示すⁱⁱⁱ。植物油とメタノールは混ざり合わないため、植物油に対して10倍以上のメタノールを加えて攪拌させなければならない。また、アルコリシス反応は可逆的な逐次反応であり、反応率を上げるには速やかにグリセロールを分離する必要がある。生成した粗メチルエステルから残留している水酸化ナトリウムを除去するために水洗浄されるが、生成したメチルエステルが加水分解して脂肪酸へ戻り、この脂肪酸が水酸化ナトリウムと反応して石鹸発生し、メチルエステル層と水層との分離が困難にありメチルエステルの回収率を低下させる原因となる。このため、希薄な酢酸水溶液で残留しているアルカリを中和させる方法などが提案されている。アルカリ触媒を用いた場合、原料中に遊離脂肪酸が含まれると石鹸が生成するため、原料中の遊離脂肪酸や水分が少ない方が有利である。廃食用油には多くの遊離脂肪酸が含まれているため、アルカリ触媒を用いるには酸化カルシウムや酸化マグネシウムを添加し、不溶性の脂肪酸カルシウム塩を形成させた後に除去する前処理が必要である。

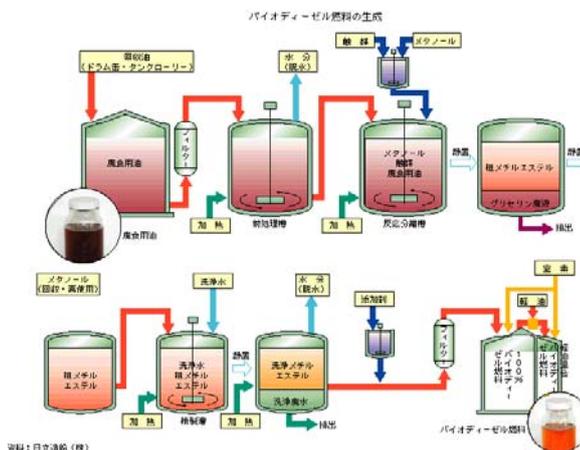


図4-3 バイオディーゼル燃料の製造プロセスの概要

超臨界メタノール中(350°C、20~40 MPa)では、植物油とメタノールが均一相となるために反応速度が著しく向上し、触媒を添加しなくても植物油のアルコリシスが進行する。このこの反応条件では、不飽和脂肪酸の二重結合がシスからトランスに異性化してエステルの融点が高くなり、生成したBDF燃料の流動性を著しく低下させる。このため、植物油をいったん亜臨界水中(270°C、27MPa)で脂肪酸へ加水分解させた後、超臨界メタノール中(270°C、17 MPa)でエステル化させて不飽和エステルの異性化を抑制する2段階超臨界メタノール法が提案された。

上述の2法以外にも、酸触媒を用いる方法や、植物油とメタノールとの相溶性を有するテトラヒドロフラン(THF)を溶媒として利用する方法等多くの方法が提案されている。

4.3 メタン発酵

メタン発酵は雑多な嫌気性微生物集団により反応が進行し、加水分解過程、酸生成過程、メタン生成過程の3段階からなる。メタン発酵の初期段階では、加水分解細菌と呼ばれる微生物群がセルロースなどの多糖類を単糖に、たんぱく質をアミノ酸に、脂質を脂肪酸やグリセロールへそれぞれ分解する。次に単糖やアミノ酸は酸発酵微生物によって酢酸やプロピオン酸などの有機酸や水素へ分解される。メタン発酵の最終段階では、メタン生成微生物により酢酸や水素からメタンと二酸化炭素が生成する。通常メタン発酵では、メタンの70%は酢酸から生成し、他の大部分のメタンは二酸化炭素が水素で還元されて生成する。メタン生成微生物はメタンを生成する嫌気性微生物の総称で、メタン生成微生物が利用できる物質は、水素、ギ酸、酢酸、2-プロパノール、2-ブタノール、メチルアミン類、メタノール、メチルメルカプタンなど限られた物質である。

メタン発酵の対象としては、食品廃棄物、畜産廃棄物、農産廃棄物、植物性バイオマス、排水処理汚泥、有機性排水、し尿などがある。メタン発酵を効率的に行うためには、原料の形態や組成によって前処理が必要な場合がある。夾雑物の少ない固形分濃度8~10%の糞尿ならば直接投入できるが、藁などが混入する場合には固形物を除去する必要がある。下水汚泥は通常2%程度と濃度が薄く処理効率を高めるために、汚泥濃縮槽や浮上濃縮装置を設置する必要がある。また、生ゴミや食品残渣を原料とする場合には、異物を取り除いた後に粉碎およびスラリー化する必要がある。

メタン発酵は処理温度により高温(55℃)、中温(35℃)、低温の3つに分類できる。現時点で熱損失が少なく障害物質や温度に対する耐性があり信頼性の高い中温発酵が日本では多く採用されている。一方、高温発酵は中温発酵に比べて2~2.5倍処理能力が高く、高温の高負荷メタン発酵では乾燥生ゴミ1kg当たり435Lものメタンを製造することが報告されている。最近断熱技術、熱交換技術、発酵槽の温度制御技術が飛躍的に進歩し、また、高温発酵槽から排出される脱離液を農業用肥料とする際の殺菌効果が高いため、高温発酵法のプラントが多く建設されている。メタン発酵で生成するバイオガスには、一般にメタンが約60%、二酸化炭素が約40%、硫化水素が0.1~0.5%程度含まれ、21~23 MJ/m³の低位発熱量を持つ。有害な硫化水素を除去するため、乾式脱硫(活性炭吸着など)、湿式脱硫(水

洗浄など)、生物脱硫(活性汚泥など)装置が設置され、残留硫化水素濃度が200 ppm以下になるよう運転されている。

メタン発酵プロセスの概要を図4-4に示す^{iv}。本装置では、毎日35m³ずつスラリー化した原料を体積700m³の3系統の発酵槽へ送り35℃の中温発酵を行っている。滞留日数20日間で、ガス圧によって液を攪拌する無動力攪拌方式の発酵槽を採用し、発生したメタンガスはいったん

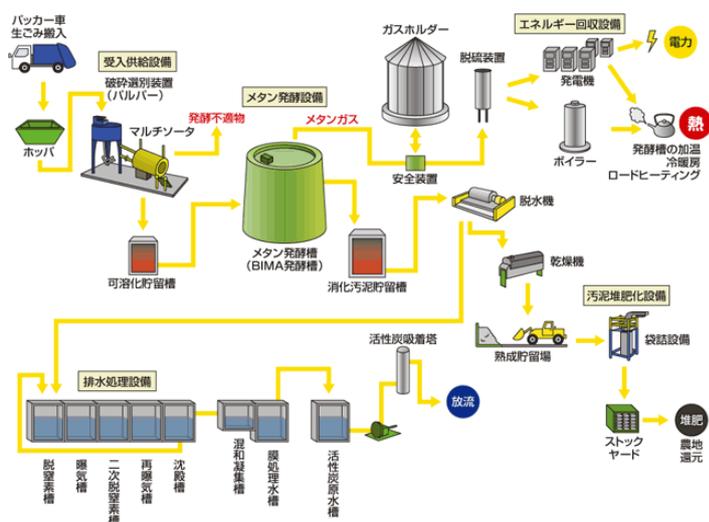


図 4-4 メタン発酵処理フローの概要

容量1,000m³のガスホルダーに貯留され、硫化水素を除去した後に発電用燃料として使用され、メタンガスと軽油(補助燃料)を燃料として1基あたり出力80kWの電力を発電している。また、発電機から出る廃熱は、バイオガスまたは重油を燃料とする蒸気ボイラーで発生させた蒸気とともに、発酵槽の加温や冷暖房、ロードヒーティングなどに利用されている。メタン発酵槽で発酵を終えた消化汚泥は、脱水、乾燥処理後、水分を加えて散気をしながら40日間熟成貯留させ、メタン発酵肥料として販売されている。消化汚泥の脱水によって生成した排水の処理量は130m³/日で、「高負荷生物脱窒素処理+膜分離処理+高度処理」を行い、厳重な水質管理の下で河川放流されている。

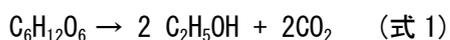
4.4 エタノール発酵

(1) エタノール発酵の歴史

エタノール発酵は古く、歴史的には数千年前の古代文明までさかのぼることができる。エタノールが酒類から蒸留濃縮されることは中国やアラブ世界で発見され、17世紀には蒸留酒がつくられ医薬品としても使われるようになった。近世ヨーロッパでは産業革命以降溶媒や化学原料としての需要が生じ、エタノールの製造は最初の化学工業として発展した。1857年にフランスのパスツールにより発酵が微生物によって起こることが証明され、1883年にデンマークのハンゼンによってビールのもろみから初めて純粋な酵母が分離された。さらに1897年にはBuchnerによって酵素を用いてもエタノールが生成されることが証明された。

(2) エタノール発酵の原理^v

多くの生物では1分子のグルコースからピルビン酸を経て2分子の乳酸を生成する。酵母によるエタノール発酵では、最後の部分が異なりピルビン酸から2分子のエタノールと二酸化炭素が生成する(式1)。糖分の一部は酵母の生育に使われるのでエタノールの収率は実際には理論値より少し低い値となり、デンプン質で88~93%程度、糖蜜で80~83%程度がエタノールへ転換される。この発酵過程でグルコースの持つエネルギーの約91%がエタノールに保存される。デンプンはグルコースのポリマーであり、分解酵素であるアミラーゼによってグルコースへ分解した後、式1に従ってエタノールへ転換される。



100gのグルコースから51.14gのエタノールと48.86gのCO₂が生成するが、糖質原料は多くの場合非発酵性の糖を一定濃度含んでおり、また発酵性の糖分の約5%は酵母菌体の増殖や副産物の生成に使われるので実際の発酵歩合は95%以下となる。ケーン糖蜜またはビート糖蜜を発酵原料として用いる場合には、糖濃度を20~24%に薄め必要に応じ窒素源として硫酸を補う。95 vol%のエタノール1klを製造するのに必要な糖蜜は約3.3tとなる。

サツマイモを原料とする場合、ハンマークラッシュで割砕した後に80~90℃で30分蒸煮する。全糖分が約15%になるようもろみを調製し、58℃まで冷却し α -アミラーゼとグルコアミラーゼを加えて約2時間でデンプンを糖化する。次に34℃に冷却し酵母を加えて30~33℃で4日間発酵させると約8 vol%のエタノールが得られる。サツマイモのグルコース含量は27%であり、95 vol%のエタノール1klを製造するのに必要なサツマイモは約6.03 t/kl

となる。トウモロコシを原料とする場合、初めに希硫酸に浸漬した後に湿式粉碎して胚芽、繊維分、タンパク質を分ける。残ったデンプン質を蒸煮してアミラーゼを添加して糖化する。冷却した後、糖質原料と同じく酵母を加えて発酵する。胚芽からは胚芽油を回収し、繊維分とタンパク質のグルテンは家畜の飼料に使われている。トウモロコシのグルコース含有率は70%であり、95 vol%のエタノール1klを製造するに必要なトウモロコシは約2.4tとなる。

(3) 木材からのエタノール製造^{vi}

木質の主要構成成分は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンからなる。セルロースはほぼC6糖のグルコースのみであるのに対し、ヘミセルロースの構造は樹種によって異なり、加水分解するとキシロース、マンノース、ガラクトース、アラビノースなどのC5糖が得られる。糖化の方法としては酸加水分解法と酵素加水分解法があり、これまでは主に濃硫酸を用いた手法が試みられてきたが、最近、1%程度の希硫酸と酵素を用いた加水分解法(BCI法)が注目されている。希硫酸+酵素法では、ヘミセルロースを先に加水分解し、固液分離後に固体のセルロースを酵素で糖化するものである。

セルラーゼはセルロースを分解する酵素の総称で500種以上ある。非結晶セルロースはエンド型セルラーゼによってランダムに加水分解され、結晶セルロースはエキソ型セルラーゼでセロビオース(グルコースの二量体)へ分解し、 β -グルコシダーゼによってグルコースまで加水分解される。セルラーゼはセルロースの結晶性あるいは非結晶性により糖化特性が大きく異なるため、酵素による糖化では前処理は非常に重要であり、爆砕やボールミルなどを利用したメカノケミカルによる改良が進められている。ヘミセルロース由来のC5糖は、従来の発酵微生物ではエタノールへ転換できないため、キシロース代謝能力を有している微生物へのエタノール発酵能力の向上、あるいはエタノール発酵微生物へのキシロール代謝能力の付与が大腸菌を用いた遺伝子操作技術によって開発されている。

(4) 各種のエタノール製造プロセス

Arkeno1社のプロセスでは、原料となる稲ワラ、ネピアグラス、紡績くず、バガスなどのバイオマスをタンタル製の反応器中40℃、70%濃硫酸で処理し、ヘミセルロースの分解が終了した時点で生成物がさらに分解消失するのを防ぐためにペントースとヘキソースの糖の混合物を分離回収する。次に95~100℃、30%硫酸で処理し、残りのセルロースを完全にグルコースに変換する。この加水分解の過程では試料の粘度が高いため、攪拌機のデ

ザインは重要である。濃硫酸と糖をイオン交換樹脂との相互作用の違いを利用して分離し、回収した濃硫酸は濃縮して再利用する。生成したグルコース、ヘキソースおよびキシロースなどの種々の糖を濃度14~15%で発酵槽へ導入し、米国の再生可能エネルギー研究所(NREL, National Renewable Energy

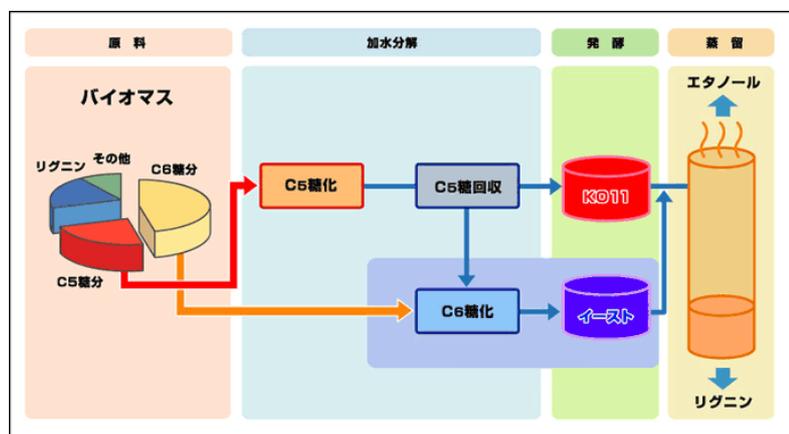


図4-5 木材からのエタノール製造プロセスの概要

Laboratory)がDNA組み換え技術で育種した菌を用いて30時間エタノール発酵する。

BCInternational社のエタノール製造技術は、稲ワラやバガスなどのバイオマス原料をセラミックを貼り付けた反応器を用いて希硫酸処理で糖化し、得られたヘキソースやペントースの混合糖液を遺伝子組み換え技術で育種した大腸菌(K011株)でエタノール発酵させるものである。セルロースの分解酵素であるセルラーゼの一種である β -グルコシダーゼは、グルコースが蓄積すると阻害されるが、最近阻害反応の起こらない新しい酵素が開発されてセルラーゼの使用量が大幅に節約できるようになった。しつつある。図4-5に、BCI社から技術導入した月島機械がバイオエタノール・ジャパン・関西に製造したプロセスの概要を示す^{vii}。ヘミセルロースは多種のペントースからなり、樹木の種類によって多様であるが、いくつかの仮定を前提とすると、95 vol%のエタノールを1kl製造するに必要な広葉樹原料は、2.54 t/klと試算される。

(参考文献)

- 1) バイオマスハンドブック 日本エネルギー学会 オーム社 2002.
- 2) バイオディーゼル最前線 工業調査会 2006.
- 3) 平成19年度版 環境・循環型社会白書
- 4) NEDO ホームページから転載
<http://www.nedo.go.jp/nedohokkaido/kitanodaichi/interview/itv05.html>
- 5) バイオエタノール最前線 工業調査会 2004.
- 6) 遠藤貴士、矢野伸一、井上宏之、澤山茂樹、日本エネルギー学会誌, 87(6), 430-437(2008).
- 7) バイオエタノール・ジャパン・関西株式会社のホームページより転載
<http://www.bio-ethanol.co.jp/flow/index.html>

5. その他次世代技術

5.1 飼料化

(1) 食品廃棄物の飼料化

バイオマスの有効利用法として牛・豚・鶏などの家畜の餌とする飼料化がある。餌は、わら類・穀類・牧草類などの粗飼料とこく類・油粕類・ヌカ類などの濃厚飼料の2種類である。餌の機能を高め、給餌作業を簡略化するために2つを適宜混合した配合飼料もある。

人間用食品の廃棄物はそのまゝ濃厚飼料として使用可能である。課題は、生ものであり数日で腐ること、爪楊枝や煙草の吸殻などの異物で家畜が痛むこと、1箇所での排出量が少なく大量処理の工業化が難しいことなどがあげられる。このため、質の悪い廃食品はコンポスト化して肥料となる。

長岡市では学校給食残渣(290トン)のリサイクルを行っている⁽¹⁾。野菜屑などは発生源で餌として使えるものを選別し水切りをする。収集したものは畜産業者で発酵、乾燥、殺菌などを行い、飼料として畜産農家へ提供している。運営は多くの人をネットワーク化して、収集選別などのワークを分担している。上記循環を事業とする会社や共同組合もある。

また、食品廃棄物発生量の多い醸造会社では酒粕などを濃縮・乾燥して飼料原料としている。三和酒類では、三井造船製のプラントで140トン/日処理している。プラントは固液分離設備、濃縮設備、乾燥設備、メタン発酵設備、排水処理設備で構成されている⁽²⁾。このシステムは時代の要請による急速に増加している。

(2) 木質材の飼料化

木材の成分はセルロース約 50%、ヘミセルロース約 25%、リグニン約 25%で構成されている。前の 2 つは炭水化物で、家畜の胃の中の微生物により分泌される酵素により分解され、ブドウ糖となる。ただ、餌として利用するにはセルロース類を包んでいるリグニンを取り除く必要がある。この方法として、薬品溶解法、菌分解法、振動破壊法、高圧蒸煮法などがあり、80 年代に北海道や九州の公的な研究所で盛んに研究された⁽³⁾。その結果、技術としてはほぼ確立し、高圧蒸煮法が選定されている。

高圧蒸煮法は木材チップをオートクレーブに入れ飽和水蒸気で蒸煮（シラカンバの場合：180℃（10 気圧）×20 分）して柔らかくした後、解繊機で繊維状に粉碎する。高温高圧でヘミセルロースは加水分解され単糖となり水に可溶になる。また、リグニンの一部は、低分子化して有機溶媒に可溶化する。これで木質材は、家畜の胃の中で分解吸収されるようになる。栄養としての目安は牛の消化率 TDN（可消化養分総量）とほぼ同等な糖化率表示で 60%以上となる。木の種類により糖化率が異なり⁽⁴⁾（表 5-1）、針葉樹は 60%以下であり、広葉樹でも 10%程度バラツキがある。60%を得るための蒸煮条件は図 5-1⁽⁴⁾になる。

表 5-1 樹脂別最大糖化率

蒸煮条件：18kg/cm³×5 分

樹種	糖化率 (%)
シラカンバ	73.2
ダケカンバ	72.2
ウダイカンバ	70.5
シナノキ	63.9
ナラ	63.7
ブナ	60.6
イタヤカエデ	59.9
ポプラ	59.1
カラマツ	34.0
トドマツ	23.6

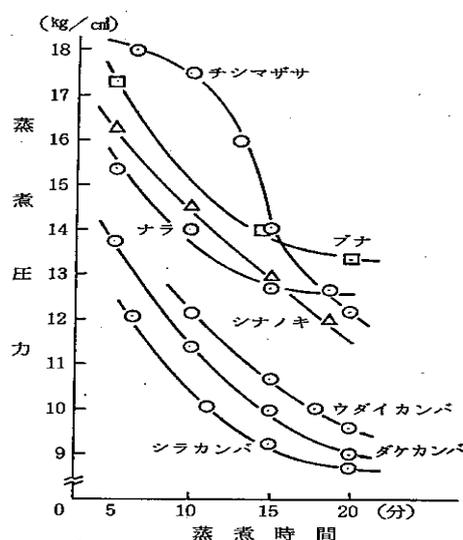


図 5-1 糖化率 60%を得るための蒸煮条件

木質飼料には、蛋白質、ミネラル、ビタミンなどがほとんどなく、単なるエネルギー源であり、偏った飼料といえる。このため、前記不足分を補う必要がある。増量剤としての使い方もある。また、木質飼料化で生成する副産物として、蒸煮工程でフルフラール、木質飼料を熱水処理するとリグニンが分離でき、熱水にはキシロースやグルコースが検出される。どれも少量で分離精製コストに見合わないようだが、キシロース含有水はそのまま散布するキノコ成長促進剤としての可能性が得られている⁽⁵⁾。

そして、処理コストが高いという課題がある。表 5-2⁽²⁾にその一例を示す。コストは 56 円/kg と試算され、粗飼料の平均価格 30 円/kg に比べて 2 倍高い。

表 5-2 製造コストの内訳

前提：総建設費 750 百万円、処理量 25 トン/日、稼働 330 日×24 時間

項目	内容	年間コスト (千円)
原料費	25 円/kg・乾物、25 トン/日	206,250
運転要員費	5 人	20,000
運転管理費	運転要員費の 15%	3,000
メンテナンス	総建設費の 2%	15,000
蒸気代	4000 円/トン、12.5 トン/日	16,500
電力	20 円/kwh、100kwh/トン・チップ	16,500
その他		3,300
減価償却	10%、10 年間	75,000
固定資産税、保険	総建設費の 3%	22,500
金利	総建設費の 5%	37,500
合計		415,550
単位製造コスト	年間処理量：8250 トン	(56 円/kg)

(3) 木質材飼料化の事業化

木材リサイクルの機運が高まり、90 年代から飼料化の動きが復活した。80 年代に得られた知見をもとに、まだ助成事業の段階だが、野外の実証試験が行われた。その結果⁽⁶⁾、以下の効果が確認された。

- ①通常飼料と成長状態に差がなく、安全性も高い
 - ・採食性・繁殖・分娩も順調。子牛も安全に発育
 - ・胃液の臨床生化学検査でも酢酸・酪酸がバランスよく増加
 - ・尿検査でも生理障害を示す排泄はない
 - ・血液検査でも異常なし
- ②動態が穏やかで反芻が促され排便も良好
- ③下痢が減り、毛艶が良くなる

そこで、さらにモデル事業として実規模実証試験が行われ、17 年度に 701 トン製造し、牛 4086 頭に給餌した。

また、宮崎みどり製菓（株）は蒸煮法で調製した粗飼料を製品化している⁽⁶⁾。杉材をチップ形状に裁断し、圧力釜（150～160℃、4 気圧、約 1 時間）で蒸煮し、チップを繊維状にすりつぶし、粗飼料とした。飼料の特徴として、以下の 4 点を強調している。

- ①反芻回数が増えて体重が増加
- ②発酵促進、絨毛発達で食い止りがなくなる
- ③コストダウンが可能：繊維量は稲わらの 1.8 倍で給餌量が減る
 粗飼料：30 円/kg×1.8kg/日×20 ヶ月＝32,400 円
 新飼料：45 円/kg×1.0kg/日×20 ヶ月＝27,000 円
- ④国内産杉材が原料で、一定品質・安定供給可能。

また、樹皮の処理から有用物が回収できることを示した。

樹皮を熱処理して抽出した木酢液（酢酸、有機酸など）と樹皮の炭（ミネラル、微量金属など）を混合したものを商品化している。濃厚飼料に 1～1.5% 添加すると、便臭気の低減、糞の水分含有率の減少、腸内環境の改善、むね肉の発育増加があるとのこと。

また、竹の飼料化も試みられている⁽⁷⁾。青竹を粗破碎、微粉碎して繊維状にし、焼酎粕などと混合発酵させる方法で、竹の持っている乳酸菌で乳酸発酵するサイレージ効果がある。飼料に5%添加する添加剤の形で商品化されている。これは竹を毛羽立たないように切断破碎する製造機開発の効果でもある。

(参考文献)

(1) 北陸農政局 HP：北陸バイオマスニッポン、平成17年度北陸管内におけるバイオマス利活用の取組み事例、事例10：学校給食の調理残さを飼料化利用

(2) 三井造船 HP：2008年4月24日プレスリリース

(3) 林産試だより 1984年5月号

(4) 林産試だより 1985年12月号

(5) 林産試だより 1987年9月号

(6) 宮崎みどり製薬 HP

(7) 丸大鉄工 HP

5. 2 肥料化

(1) 生ゴミの肥料化

ゴミの減量化を目的に各家庭から排出される生ゴミの堆肥化利用を推進する為、平成20年度(社)日本電機工業会の調査結果によると65%の自治体が家庭用コンポスト機への補助金制度を設けている。

生ゴミの堆肥化・肥料化について東京農業大学応用生物科学部の報告があるので以下引用する。

生ごみの肥料化方法は、堆肥化処理法と乾燥処理法とに大別される。前者は、従来からの一般的な技術で、生ごみリサイクルといえば生ごみから堆肥(コンポスト)をつくることと思われるくらいである。後者は筆者らが最近開発した技術で、乾燥した生ごみに少量の窒素成分を添加して短時間に肥料化する方法である。

①農業生産者と消費者で異なる「堆肥と肥料」

世間で生ごみリサイクルといえば、生ごみを堆肥にしてそれを使って有機野菜をつくる。それを店で販売すれば資源循環が廻ると考えがちであるが、消費者と農家では「堆肥」に対する意識に大きな違いがある。多くの消費者は堆肥＝肥料と思っている。一方、肥料取締法で堆肥(たい肥)は特殊肥料に分類されるが、農家には堆肥とは土壌改良資材であって肥料ではないという意識が強い。そのため、農家に生ごみ堆肥を供給すると多量に施用し、その上さらに既存の肥料を施してしまうことが多い。その影響で土壌養分の過剰やアンバランス化が進んで硝酸イオンによる地下水汚染や土壌病害の多発を招く恐れすらある。そのようなことでは生ごみリサイクルの意義がなくなってしまう。生ごみリサイクルを円滑に進めるには、農業生産者と消費者の堆肥に対する意識のギャップをなくすること、たとえば堆肥化した生ごみ堆肥でも農業生産者には肥料という認識で利用させることが大切である。そのためにはごみ堆肥の製造方法や養分含有率の他に窒素無機化率などの情報を提供することが望ましい。

②生ゴミの乾燥処理法による肥料化

エネルギーを使って生ゴミを乾燥するなどのもつてのほかとの意見も多いが、生ゴミを肥料として資源化するには不可欠な工程である。生ゴミ乾燥機には処理量 1kg 程度の家庭用小型機から 100kg 程度の業務用まで多岐にわたるが、いずれも生ゴミを 100℃程度に加熱して、数時間で処理する。このような生ゴミ乾燥物は炭素率が 15 程度であるため、直接土壌に施用すると、窒素の有機化が起り、植物の生育に支障を来す恐れがある。そこで、生ゴミ乾燥物に尿素を添加して炭素率を 10 に調節することにした。尿素の代わりに、硫安やリン安などの窒素肥料を使っても同じような効果が期待できるが、窒素含有量の高い尿素が最も使いやすい。また、化学肥料ではなく、窒素を多量に含む鶏糞や下水・食品産業汚泥を生ゴミ乾燥物に混合して、炭素率を 10 程度に調節することも有効である。さらに、見栄えと施用時のハンドリングをよくするためにペレット状に成型加工した資材を生ゴミ肥料と名付けた。

この生ゴミ肥料を土壌に施用すると土壌微生物により分解されて、図 5-2 のようにゆっくり窒素が無機化し、このような性質が後で述べる特性を発揮する。なお、生ゴミと尿素混合物をペレット化することにより土壌中での窒素の有機化が緩和され、相対的に無機化パターンがより一層緩効化することも判明している。

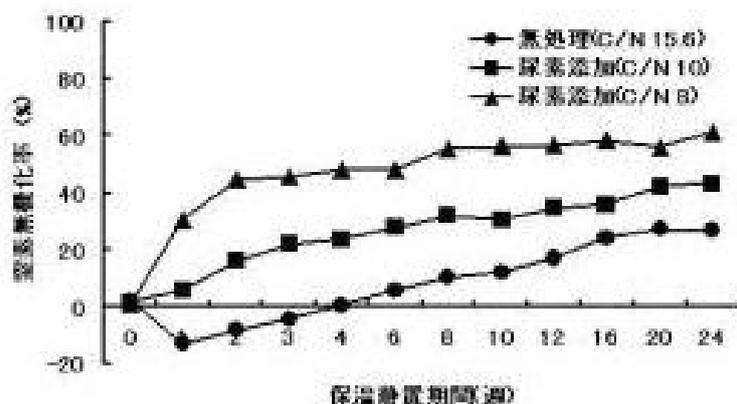


図 5-2 生ゴミ肥料の土壌中での無機化パターン

③東京農大式生ゴミの肥料化プラント

上記のように、生ゴミを乾燥して尿素による炭素率の調整を行い、成型化すれば肥料を製造できることが明らかになった。しかし、この技術を実用化するには毎日多量に排出される生ゴミをどのように処理するか、製造した肥料の品質やその変動や利用・流通方法など多くの課題がある。そこで、本学では都市部における地域循環型生ゴミリサイクルを実践する目的で、平成 14 年 4 月世田谷キャンパス内にリサイクル研究センターを開設し、そこに生ゴミの乾燥肥料化プラント(写真 5-1)を設置した。

このプラントを使って学内レストランの他、東京都世田谷区の学校給食センター、近隣のスーパーマーケットから出る一日あたり約 500 kg の生ゴミを再資源化し、大学周辺の農地で利用する実践的研究を開始した。



写真 5-1 東京農業大学リサイクル研究センター内の生ごみ乾燥肥料化プラント

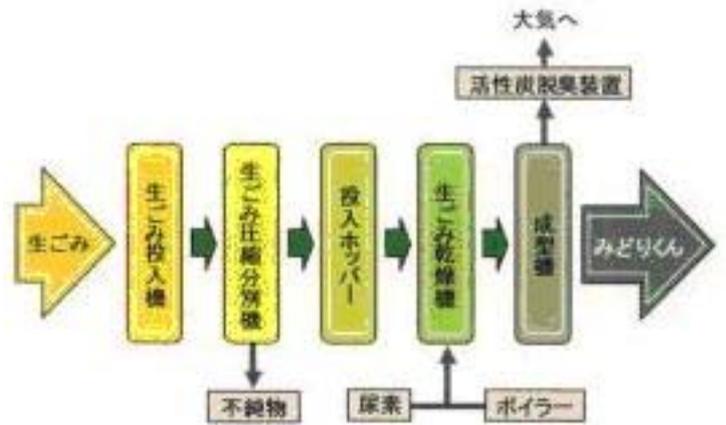


図 5-3 生ごみ肥料「みどりくん」の製造工程

④生ごみ肥料「みどりくん」製造プラント（図 5-3）

専用コンテナから貯蔵ホッパーに投入された生ごみは混合攪拌され、圧縮分別機に送られる。ここでは篩い目 0.7mm のスクリーンを通し、異物や肥料原料とならない粗大有機物を除去する。スクリーンを通過してペースト状になった生ごみが投入ポッパー内に蓄えられ、生ごみに対して約 0.3%の尿素が添加される。生ごみペーストと尿素混合物約 80kg が乾燥機に送り込まれ、ボイラーから供給される水蒸気による間接乾燥方式により約 90℃ で約 50 分間乾燥される。この乾燥処理により水分約 90%の原料ペーストの水分が約 15% にまで減少する。乾燥処理を終えた処理物 3 回分を混合ポッパー中に蓄えて混合し、バッチ間の成分の変動を少なくする。混合された乾燥処理物を粉碎機にかけて、さらに成分の均一化を図った上で、ディスクペレットにより、写真 5-2 のような直径 3mm、長さ 5mm のペレットに成型する。

原料投入から成型化までに要する時間は約 2 時間で、このプラントを連続的に 24 時間稼働させれば最大約 2 トンの生ごみを約 200kg の生ごみ肥料に再資源化することができる。また、生ごみ処理過程で微生物による分解を一切受けなためアンモニアガスなどの悪臭が発生しないこともこのプラントの大きな特長といえる。東京農大式生ごみ肥料化プラントは安全・安心プラントである。このプラントから製造される生ごみ肥料を東京農大のスクールカラーにちなんで「みどりくん」と命名した。

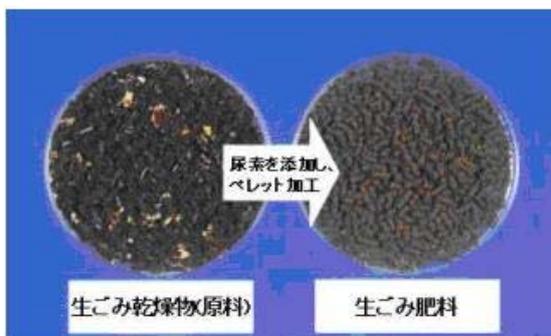


写真 5-2 生ごみ肥料「みどりくん」

(2) 家畜糞尿・食品廃棄物の肥料化

食品廃棄物は食品リサイクル法により食品製造業・食品小売業・外食産業など食品関係事業者に対し食品廃棄物を資源循環する為、飼料・肥料化などを義務づけている。油分の多い食品廃棄物は飼料に適さない為、肥料化されるケースが多い。

循環型農業の実現の為、酪農家では日々大量に発生する家畜糞尿を短期間で効率的に堆肥化する目的で好気性醗酵処理を行い、液肥や堆肥を生産し圃場利用などで活用している。

(3) チップ材の肥料化

「テラプリモ菌群TM」を利用して、有機性廃棄物を高機能土壌改良材化、高機能堆肥化に転換する方法が試みられている。

その工法の中でも、堆肥化の際に生じる悪臭が少ない事、地球温暖化に影響する二酸化炭素を発生しない事、土壌改良材として効果があるという事が、特にこれからの循環型社会、環境保全にアドバンテージを持つと考えられる。この方法を用いた結果、短期間にチップ材が完全に堆肥化され、これからの廃木材現場処理に大きく貢献できるものと思われる。この方法で得られた堆肥化されたチップ材の使用法について色々模索がされており、まず地元の農家にモニターとして使ってもらい評価を得る活動が行われている。

堆肥・肥料化の対象は家庭の生ゴミや家畜糞尿・食品廃棄物が中心で、廃木材を原料に堆肥化・肥料化を行っているのは極めて稀であり、廃木材の利活用の主流はバイオマス発電である。

(4) 海外事例

ドイツは欧州最大のバイオマス利用国で林産系廃棄物は主として燃やして熱源として利用されている。家庭用廃棄物は近年バイオリジカル・メカニカルプレトリートメント(MBP)方式が多数導入され生ゴミの様な生物分解性の有機物成分はバクテリアによる嫌気性発酵によりメタンガスに分解しこれをガスエンジンの燃料として利用する方式が広がっている。

堆肥化を行っている例としてオランダのOrgaworld社のプロセスを紹介する。

この企業は2000年に設立され、含水量など受入れた廃棄物の特徴により、処理手法を選び、低コストでリサイクルを行っている。

農産物生産企業との契約により、農家から排出される植物性廃棄物を受入れ、コンポスト化し、契約企業へのコンポスト供給を行う。システムは、コンポスト化工程と得られたコンポストをドラムスクリーンで粒径により分離し、精製する行程からなる。受入れた植物性廃棄物に含まれる夾雑物はコンポスト化前に除くのではなく、コンポスト化を行い乾燥された状態でドラムスクリーンを用いて4つの分画に分級される。コンポスト化が進んだものは最も小さく、コンポスト化が進んでいないものは、より大きな2つの分画、残渣としてプラスチックフィルムなど大きな形状を有する残渣分が得られる。プラスチック成分は、コンポスト化過程で乾燥されており、処理に好都合である。

前処理なしで好気性生物処理を7~10日→ドラムスクリーンで分級(3つの分画:0-10mm, 10-20mm, 20mm以上)。0-10mmはコンポストとして再度農家に販売し利用。10-20mmはもう一度好気性処理を行う。20mm以上は廃棄。

5. 3 次世代技術

平成 18 年 3 月のバイオマス・ニッポン総合戦略の見直し¹⁾において、その行動計画に革新的な変換技術の開発、他分野技術との連携を進めるとの戦略が示されているが、具体的行動計画²⁾に挙げられた技術開発施策の中には、以下のようにマテリアル利用技術（製品利活用）に関するものが多い。

- ・ 化学、生物学、物理学、工学等の融合によりバイオマスを有用物質・材料に変換するための技術開発
- ・ 木質系廃材・未利用材を有効活用し、糖化・発酵、液体燃料や工業製品等へ変換する技術の実用化
- ・ 海洋バイオマスのリファイナリー技術、機能性食品素材、生理機能性物質等のマテリアルの技術開発
- ・ 植物機能を活用した工業原料や高機能タンパク質等の高付加価値物質生産等、高度モノ作り技術の基盤技術開発
- ・ バイオマスを原料とし微生物機能を活用した高機能化学品等生産プロセス技術開発
- ・ 廃棄物系バイオマスのエネルギーや原材料・製品への変換技術の開発に対する支援

木質バイオマスの利活用の中では、輸送用燃料の代替燃料製造技術に代表されるエネルギー利活用の技術開発が地球温暖化対策として特に重要視されているが、高付加価値を有する工業原料等への変換技術のようなマテリアル利用技術についてもバイオマス・リファイナリーの構築やバイオマスのカスケード的利用という観点から単に脱化石資源（地球温暖化対策）というだけでなく、高い経済性も期待されて注目されているものと考えられる。そこで、本稿では木質バイオマス利活用の次世代技術としてマテリアル利用技術に関するものを中心に述べることにする。

従来のマテリアル利用技術としては、先に述べた飼料化、堆肥化に加えて、バイオプラスチック等がある。バイオマスを原料に含むプラスチックは、その製造プロセスの違いから、下表 5-3 に示す天然系、化学合成系、微生物産生系の 3 つに区分することができる³⁾。

表5-3 バイオマスを原料に含むプラスチックの種類

種類	概要	プラスチックの種類
天然物系	バイオマス自体をポリマーとするもの	澱粉樹脂、酢酸セルロース 等
化学合成系	バイオマス由来モノマーを化学的に重合するもの	PLA(ポリ乳酸)、PTT(ポリトリメチレンテレフタレート)、PBS(ポリブチレンサクシネート) 等
微生物産生系	微生物が体内で、バイオマスを重合するもの	PHB(ポリヒドロキシ酪酸)等のPHA(ポリヒドロキシアルカノエート) 等

(注)ここでのPBSは、でんぶん、セルロースから、コハク酸、1, 4ブタンジオールを合成した場合のものを指す。

(出所)大島一史「バイオ技術を基盤としたポリマー製造技術」『PETROTECH』Vol.26, NO.8, 2003年

木材の主要成分はセルロース、ヘミセルロースとリグニンであり、これらを分解することにより生成される成分を総合的に利用し、液体燃料や工業原料とする製造技術が開発・実用化されれば、脱化石資源化に資することが期待される。これらの成分のうちセルロース、ヘミセルロースについては加水分解・糖化・発酵によるバイオエタノール製造技術の開発が盛んに行われている。一方、リグニン成分からはフェノール類を生産することが可

能であり、フェノール樹脂などへの利用が検討されている。この他、フラーレン、グラファイト、カーボンナノファイバーなどは機能性原料として注目される炭素系材料であるが、木質系バイオマスの炭素分をうまくこれらの形で取り出すことができれば、付加価値の高い原料生産が可能となる⁴⁾。

前述の技術開発施策の中で木質バイオマスに関するものとして、林野庁の森林資源活用型ニュービジネス創造対策事業がある⁵⁾。これは再生可能でカーボンニュートラルな新資源による新産業の創出を目指し、木質バイオマスを原料とした石油代替の輸送用燃料や化学製品などの新たな製造システムを構築することを目的としているものである。事業イメージを下図 5-4 に示す。新しい木材の利用法として、木質由来のセルロース・ヘミセルロースやリグニン成分（リグノフェノール）等を分子素材等として活用し、輸送用燃料や、化学製品原料等の石油代替製品へ利用を拡大することを想定している。

- 1) セルロース等 → バイオエタノール、プラスチック等
- 2) リグニン → 炭素繊維、プラスチック等
- 3) 木質バイオマス → バイオメタノール等



図 5-4 新産業の企業イメージ

(林野庁HP http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/new_Business/image_1.pdf より引用)

本事業は平成 20 年度からスタートし、以下の 4 件の事業提案が採択されている。

① 亜臨界水処理による木質バイオマス連続分解システムの確立（山陽空調工業）

亜臨界水を用いた連続運転の可能なシステムを構築し、木質バイオマスの全ての成分を短時間で分子レベルにまで分解し、ろ過膜に通すことにより、グルコース、キシロオリゴ糖、リグニンペレットを製造するもので、製造装置の小型化が可能のため車両に積載し装置ごと山の中の原料のある所に移動し、木質バイオマスを一次加工することにより、運搬コストの低減を図り、林地残材等の未利用木質資源を有効活用することを目指している。

② 木質バイオマスからの新たなエタノール製造システムの確立（（独）森林総合研究所）

アルカリ蒸解によって木質からセルロース等を取り出し、反応の制御が容易で糖の回収率が高い酵素法により、木質バイオエタノールの新たな製造システムを確立することを目指している。特に、この方法は酸を使わないため環境への負荷や設備への負荷が小さい等の利点がある。本事業におけるバイオエタノール製造システムのブロックフローシートを右図 5-5 に示す⁶⁾。

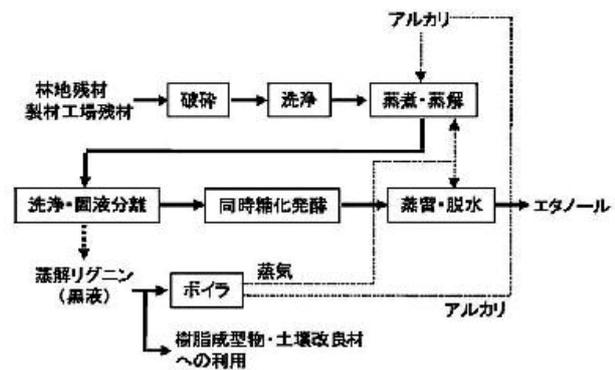


図5-5 バイオエタノール製造システム

③ 木質バイオマスからのナノカーボン製造システムの確立（東芝）

木質バイオマスから化石資源由来のものに匹敵した高品質なナノカーボンを製造するもので、このシステムではチップ化した木質を熱分解によりガス化した後、生成した炭化水素ガスから、触媒を用いてナノカーボンを析出させる気相成長法という技術を利用している。このバイオマスカーボンTM製造システムの概要を右図 5-6 に示す⁷⁾。

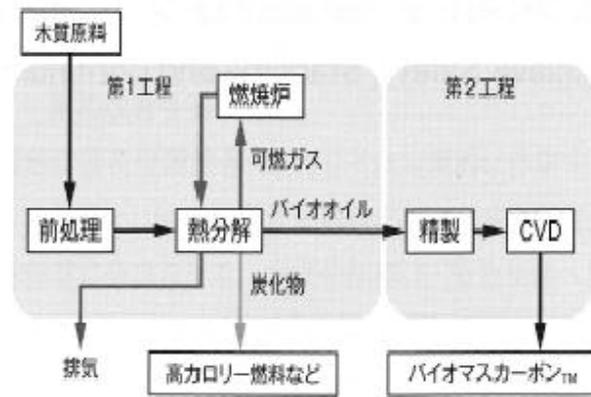


図5-6 バイオマスカーボンTM製造システム

木質由来のナノカーボンを添加した樹脂を利用することで、ノートパソコンの外装部分を軽量で強度の高いものとして携帯化を容易にしたり、燃費低減のため軽量化が必要な自動車の部品や、導電性を持つ I C トレーの製造など、多種多様な高機能製品に応用したりすることが可能となる。

④ バイオオイル化による森林資源トータル利用システムの確立（栃木県森林組合連合会）

マイクロ波を木質バイオマスに照射し、木材成分を分解・低分子化し、液体状のバイオオイルを生成するシステムであり、小型化が可能のため森林に近い林業現場に設置することができる。また、葉から枝、幹、根まで樹木の全てが原料となるうえ、液化することにより二次加工工場への運搬が容易となるという利点がある。

生成したバイオオイルは、石油系燃料に直接混合して既存ボイラーの燃料として利用することができ、一部をオイル化し、残った成分をガス化する場合には生成したガスからジメチルエーテル等が製造でき、化石資源由来の各種化学品や燃料の代替として利用でき、安全性が高いクリーンな燃料として期待されるとしている。

以上のような実用化事業の他にも木質バイオマスの利活用技術に関する数多くの研究事例がある。それらの技術を分類すると以下の通りになる⁸⁾。

(1) 段階的分離－利用型

- ① リグニン分解－セルロース等抽出型 . . . アルカリ法、オゾン法、水熱法、白

色腐朽菌等

②リグニンとセルロース等同時分解型

②-1 化学的方法 . . . 硫酸法、有機溶媒法、相分離法

②-2 物理的方法 . . . 超・亜臨界法

(2) 完全分解-合成型 . . . ガス化(ガス化、高温高压ガス化、
ガス化炉形式)

木質バイオマス利活用の成果品として、セルロース成分やヘミセルロース成分からはエタノール、水素ガス、糖アルコール等、リグニン成分からは熱エネルギー、高機能カーボン、機能性ポリエステル等、完全分解によるガス化成分からは水素ガス、メタノール、ディーゼル燃料、及び熱、電気エネルギーがある。

なお、リグニン成分はベンゼン環を持っていることから合成樹脂等の様々な石油起源材料を代替できる可能性を秘めており、機能性材料(マテリアル原料)を生成しようという基礎的な研究も種々行われている。その中には廃棄物系バイオマスのリグニン由来の機能・性質等を利用して、廃棄物等のリサイクル技術分野に応用しようとする基礎研究⁹⁾、¹⁰⁾なども行われており注目される。

以上述べたような木質バイオマスのマテリアル利用技術が次世代技術として今後益々進展して脱化石資源化、地球温暖化防止に資することが期待されている。

(参考文献)

- 1) 農林水産省バイオマス・ニッポン
HP : http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf
- 2) 同上 : http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_keikaku.pdf
- 3) 同上 : http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_material/pdf/plastic01.pdf
- 4) (社)日本エネルギー学会、バイオマス・ニッポン総合戦略策定緊急調査報告書(平成14年度)、バイオマス情報ヘッドクォーター
HP : <http://www.biomass-hq.jp/tech/3/2.pdf>
- 5) 林野庁 HP : http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/new_Business/
- 6) 森林総合研究所 HP :
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kouho/Press-release/2008/bioethanol20080829.html#2>
- 7) 東芝レビューVOL.63 NO.5 (2008年5月):
http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2008/05/63_05pdf/a07.pdf
- 8) 林野庁、木質バイオマスの新利用技術アドバイザリーグループ第1回会合資料5「木質バイオマス技術分類と利用事例」(2008年5月22日):
http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kaihatu/080522_1.html
- 9) 井上、「バイオマス廃棄物を利用したe-wasteからの貴金属の回収」、第16回環境資源工学会シンポジウム(2008年2月21日)
- 10) 加茂ら、「有機系廃棄物由来溶媒を用いた電子基板の可溶化と金属の回収」、第18回廃棄物学会(2007年11月21日)

6. 木質バイオマスの収集、運搬

—木はどのようにして山から伐り出されてくるのか—

6. 1 日本の森林と林業の現状⁽¹⁾

日本は約 2,500 万 ha の森林をもち、国土の 67%を森林が占める世界的に見ても森林率の高い国である。特に、人工林は約 1,000 万 ha あり、森林面積全体の約 4 割を占め、人工林率が高く、また、森林の蓄積量は毎年約 7,000 万 m³の割合で増加しており、そのうち 6,000 万 m³は人工林によるもので、人工林の成長が著しいことを示している。人工林の樹種別面積比率は、戦後の拡大造林期に栽培された針葉樹が 98%を占めている。その樹齢構成には偏りがあり、林齢 30 年から 50 年の伐採適齢期を迎えた森林が多く、これらの人工林を手入れし健全な状態に保つことは、森林を持続的に維持・管理するために必要不可欠である。しかし、林業界の状況は、1960 年にはじまった木材の輸入自由化による国産材利用率の低下や木材価格の下落、林業労働者の高齢化・就業人口の減少など、危機的な状況にある。

これらの問題を打開し、木材生産活動の活性化を図ることを目的に、1980 年代後半より、当時海外で高い生産性を生み出していた高性能林業機械が国内に紹介され、これら機械の導入推進が国策として進められてきた。以来十数年が経過し、我が国の森林・林業に適合した機械や作業システムへの開発・改良が進められ、現在に至っている。

6. 2 調達コスト —収集・運搬には総コストの 50%以上かかる⁽²⁾—

地球温暖化や原油価格の高騰を受け、未利用のまま放置されている林地残材がバイオマス資源として注目されている。木材生産において枝葉や端材などは不要なものであり、これらを有効利用できればバイオマス産業のみならず、林業界においてもメリットは大きい。しかし、未利用間伐材など林地残材を利用する場合には、伐採、集材、運搬など調達段階で発生するコストが大きな問題となる。

林地残材の調達にかかる総コストは、トンあたり約 1 万 5 千円～3 万円に達し、建設廃材や製材残材を大きく上回る（図 6-1）。その内訳をみると、集材・運搬にかかるコストが半分以上を占める。また、チップ化やペレット化といった前処理にも設備投資、人件費、エネルギー費など多額のコストがかかっている。このように、林地残材の調達を増やすほどコスト負担が増えるのが現実であり、搬出をあきらめて伐採後そのまま林地に放置してしまうケースも少なくない。

こうした状況において、林地残材の利用を推進していくためには、まずもって伐採、集材、運搬の効率化が必要であり、林道網の充実や機械化を進めることの必要性が指摘されている⁽³⁾。伐採コストについては、日本ではトンあたり 4 千円～1 万 5 千円であるのに対し、林道網の整備や高性能林業機械の普及が進んだオーストリアの山間地では 2 千円～3 千 5 百円ともいわれている⁽³⁾。また、日本の林野は所有規模が小さいため大規模需要に結び付けにくいことや、流通経路が複雑で中間コストが大きくなりがちなため、流通経路の見直しが必要という指摘もある⁽³⁾。

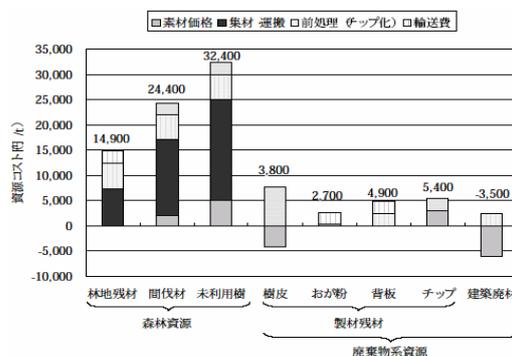


図 6-1. 木質バイオマスの調達コスト例⁽⁶⁾

他方、市場では大量の建設発生木材が逆有償で流通しており、有償の林地残材は事実上コスト競争力を持たないことが指摘されている⁽⁴⁾。このため、風力、バイオマス等を変換して得られる新エネルギー等電気や新エネルギー等電気相当量の取引価格を、例えば林地残材と建設発生木材とで差別化することにより、林地残材の構造的なコスト高を吸収すべきという意見がある⁽⁵⁾。

6. 3 木材の搬出方法⁽¹⁾

急峻な山岳地形の多い我が国の森林では、諸外国のような車両系の大型機械を導入できる現場は非常に限られている。現場に合わせ、各種林業機械を組み合わせ、林内から林道・作業道まで木材を収集し、運搬する方法が一般的である。伐出作業（立木を伐採し収集する作業）の方法には、全木集材、全幹集材、短幹集材の3つの方法がある（図6-2）。

- 1) 全木集材は伐出した立木を枝や葉がついたそのままの形状で林道・作業道（土場）まで集め、丸太とそれ以外（林地残材）に分けて収集する方法、
- 2) 全幹集材は、林内で枝葉を切り落とし幹だけ集める方法、
- 3) 短幹集材は、林内で枝葉を落とし、丸太の形状に玉切りして集める方法である。

全幹集材や短幹集材は、不要な物（枝葉や梢端部、端材など）をできるだけ“持ち運ばない”方法であり、丸太を集めると言う点では非常に合理的である。また、短幹集材では、扱う木材の重量が小さいため、使用する林業機械も小型の機械で対応できる。

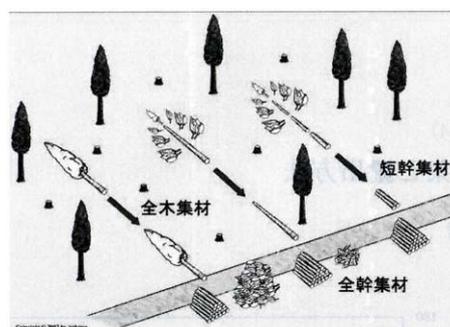


図6-2. 伐出作業の方法

6. 4 林業機械

1) 在来型林業機械⁽⁷⁾

②集材機（図6-3）

集材を行うためのウインチを集材機と呼び、架線系林業機械の代表的存在である。急傾斜地における集材作業の機械化に大きな役割を果たした。架線集材作業は、ワイヤーロープを林内に張り巡らし、面（林地）に散在する集材木を吊り上げ、点（山元土場）に集積する作業で、索張り方式（ワイヤーロープの張り方）作業能率に大きく影響するため、その選択が重要なポイントとなる。



図6-3. 集材機

③自走式搬器（図6-4）

自走式搬器も架線系機械に分類されるが、集材機と大きく異なるのは、動力を搬器内に備えていることである。動力装置、走行装置、吊り上げ装置、および操作装置を装備し、元柱と先柱の間に架設させたスカイラインに懸架し、無線



図6-4. 自走式搬器

操作で集材を行う。集材器を用いた架線集材よりもはるかに少ない機材で架設が可能であり、無線操作で誰でも簡単に運転操作が出来る。

④林内作業車（図 6-5）

林内作業車は集材を目的に製造された車両系林業機械。ほとんどの機種には小型ウインチが取り付けられており、それを用いて伐倒木を木寄せした後、運転席の後や横に設けられた荷台に積み込み集材する。



図 6-5. 林内作業車

⑥グラップル（図 6-6-a, b, c）⁽⁸⁾

材をつかんで、集材や積み込みを行う。ロングリーチグラップルでは車体中心から片側 12m の範囲の集材が可能である。



図 6-6-a. グラップル（右）による積み込み

図 6-6-b. ロングリーチグラップル

2) 高性能林業機械⁽⁹⁾

1980 年代後半より北米や北欧、およびオーストリアで使われているような、新しい林業機械が日本国内でも利用されるようになった。これらは「高性能林業機械」と呼ばれ、省力化や労働安全性の向上、労働力確保の面から、今後林業の中心となる機械として期待されている。「高性能林業機械」以外の機械の性能が低いということではないが、次に該当する物が統計上高性能林業機械とされている。

①プロセッサ（図 6-7）

全木集材された材の枝払い、玉切り、極積みなどの造材作業を行う車両系機械である。土場や林道で行なわれる造材作業を飛躍的に効率化させた。国内で最も普及している高性能林業機械であり、素材生産の主力となっている。我が国で用いられているプロセッサのほとんどは、ベースマシンに油圧ショベルが用いられ、プロセッサヘッドは、材をつかむグラップルと枝払い用の刃、材送り装置、玉切り用のチェーンソーから構成される。

②ハーベスタ（図 6-8）

林内を移動して立木を伐倒し材の枝払い、玉切りまで、一連の工程（伐木造材作業）を 1 台の機械で行うことができる車両系機械である。これまで複数人でおこなっていた伐木作

業を飛躍的に効率化することができる。



図 6-7. プロセッサ

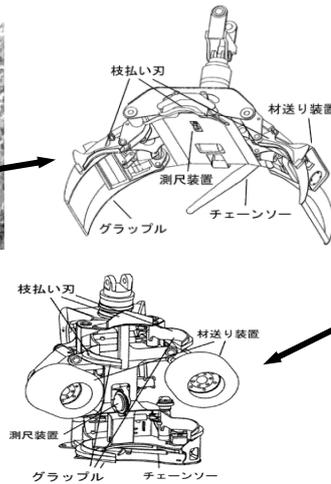


図 6-8. ハーベスタ

③フォワーダー（図 6-9）

造材された材を積み込み運搬する集材用車両で、積み込み用のグラブローダを装備している。国内で最も普及しているのは 2.5 t の積載量を持つ総輪駆動ホイール式の機種であるが、近年はホイール式の機種に変わり、ゴムクローラ式の機種の導入台数が増えてきている。フォワーダーは全木材や全幹材といった長材の運搬には適さないが、玉切りされた丸太を完全に積載して運ぶため泥等の付着が少なく製材時に発生する鋸刃の損傷を減らせる利点があり今後も集材の中心を担っていくものと考えられる。



図 6-9. フォワーダー

④タワーヤーダー（図 6-10）

移動性を高め、架線の架設撤去の時間短縮を目的に開発され、人口支柱（タワー）と専用台車を持った架線系機械である。集材時にワイヤーロープを高く上げる必要から元柱のかわりとなるタワーを装備し、特殊な搬器やウィンチの制御機構を用いることで索張りに必要なワイヤーロープの本数を少なくしている。



図 6-10. タワーヤーダー

⑤スウィングヤーダー（図 6-11）

油圧ショベルをベースマシンとしたタワーヤーダーである。2 胴あるいは 3 胴のドラムを取り付け、簡易な索張りにより地引き集材を行う。機能的にはタワーヤーダーと同様であるが、機体を旋回させることで引き上げてきた伐木の仕分けや機体の横でワイヤーロープをはずすことができ、集めた材が一箇所に固まらないという特徴がある。



図 6-11. スウィングヤーダー

⑥スキッド（図 6-12）

高性能林業機械のスキッドとはグラブを車体後方に

装備したグラップルスキッドであり、本来は全木材もしくは全幹材をけん引集材する林業用トラクタの総称である。スキッドは伐倒木を内装のウインチにより林道や作業道まで引き寄せた後、その片方を持ち上げた状態で引きずり走行する。グラップルスキッドは運転席からの操作で数本の木をつかむことができ、ワイヤロープやチェーンでこれらを束ねる手間を省くことができる。



⑦フェラーバンチャー（図 6-13）

立木を伐採し、集材しやすいように特定の方向に倒し集積する機械である。ハーベスタと同じく多くの機種は傾斜地向きでないため、緩慢傾斜地の多い北海道などでしか導入されていない。しかし、作業機が軽くできるので長いブーム・アームに取り付け作業範囲を広げた機種や、小型軽量で急傾斜地でも作業の可能な機種も開発されるなど、日本の林業に適した工夫や改良も行われている。



図 6-13. フェラーバンチャー

6. 5 林業機械の組み合わせによる作業システムの作業コストと労働生産性⁽⁸⁾

国産資源の充実や外材の価格高騰により国産材に対する期待が高まっているが、今後木材価格が大きく上昇することは期待されず、原木の低コスト搬出作業システムを確立することが急務である。原木の搬出作業は、傾斜などの林分条件を考慮して適切な方法で行う必要があり、一般に傾斜の大小で作業道の密度が決まる。作業道密度が低いところでは架線系の作業システム、密度が高いところでは車両系の作業システムでの搬出が行なわれる。

平成 19 年兵庫県で、低コスト木材搬出システムの調査が行なわれ、複数の重機を組み合わせた作業システムの検討が行われた。そのデータから、前項 4 で紹介した林業機械を使った集材作業コストと労働生産性を比較したものを図 6-14 に示す。林内作業車+プロセッサと架線集材のコストが高く、グラップルを使用した集材作業のコストが低くなっている。また、スイングヤーダのコストが高いことがわかる。兵庫県ではこの調査結果を元に林地傾斜度別の搬出システム（25 度以下、25 度～35 度、急傾斜）を考察している。また、コストの変動に与える影響について、①作業道の延長距離、②出材 1 本当りの材積、③木寄せ距離、④機械トラブルの四つをとりあげ、いずれも各工程での生産性が変動することにより、搬出コストが変動するとしている。基本的に搬出作業は複数の工程から成り立っており、搬出コストを下げるためには工程間のバランスを取ること、つまりボトルネックをなくすことが必要である。各工程が同時に作業をするシステムの場合、搬出システム全体の生産性はボトルネックの工程の生産性と同じになるからである。したがって、搬出システム全体の生産性を上げるにはボトルネック作業の解消が必要である、と指摘している。

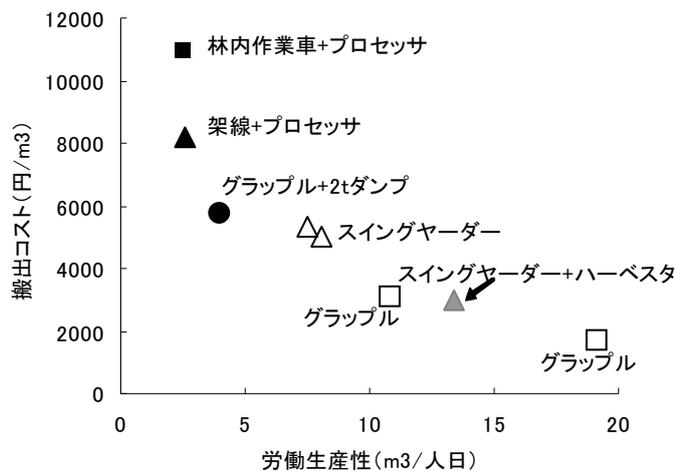


図 6-14. 各作業システムの作業コストと労働生産性

6. 6 木質バイオマスのエネルギー利用に、今必要な事は⁽¹⁾

ー林地残材の収集技術と林業活性化ー

林業機械や作業システムは、“丸太をいかに効率的に集めるか”を目的として開発・改良されてきた。それは前項 5 でも同じである。例えば「3. 木材の搬出方法」で述べた全幹集材や短幹集材など丸太を集めるという点では合理的であるが、林内に残された端材や枝葉は薄く広く散在しており、これを集めようとするると丸太を集める以上のコストと手間が必要となる。作業能率の高い高性能林業機械を使ったとしても、形が不ぞろいでかさ張る林業バイオマスを広い林内から集める作業では、2 割程度の性能しか発揮できない。また、コストも 4~5 倍必要となり、全幹集材や短幹集材の現場で林業バイオマスを収集することは現実的ではない。バイオマス利用を考えると、大量の林地残材が一箇所の土場に発生する全木集材は都合が良い。木質バイオマス資源を有効に利用していくには、機械・作業との組み合わせにより、製品となる用材のみならず、残材も同時に収集できるシステムの開発が大きな課題となる。

かつて、森の資源循環の一端を成していた“エネルギーとしての木質バイオマス”の復活を、林業再起への起爆剤としたい。それは、本流である材としての木材生産のさらなる技術開発と、木質バイオマス収集運搬技術を林業の両輪として推進することによって実現できる。山に人や機械が入らない限り、丸太は生産されないし、木質バイオマスの供給もありえない。林業の活性化なくして木質バイオマス利用はできないのである。

(参考文献)

- (1) 『エネルギー学会誌』 Volume 87 Number 7 July 2008 p. 525~529
- (2) 『木質バイオマスのエネルギー利用』 国立国会図書館 ISSUE BRIEF NUMBER 510 (FEB. 13. 2006)
- (3) 横山伸也「木質系、廃棄物系バイオマスの現状と展望」『エネルギー』 38 巻 10 号, 2005. 10, p. 69.
- (4) 田中淳夫「木質バイオマス・ブーム」を考える。『農林経済』 9657 号、2004, 11, p. 5.

- (5) 『森林バイオマスの利用促進を目指して』（総合資源エネルギー調査会エネルギー部会 RPS 法評価検討小委員会（第 2 回）熊崎実氏提案資料）2005. 11. 29
- (6) 『新エネルギー産業ビジョン』新エネルギー産業ビジョン検討会, 2004. 6, p. 81 (1) の筆者が一部加筆。データの原典は『バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究』経済産省, 2002. 12。
- (7) 森林利用学会ホームページ http://jfes.ac.affrc.go.jp/machine/high_p.html
- (8) 兵庫県農林水産技術総合センター森林林業技術センター 平成 19 年度全県プロジェクトチーム報告『兵庫県における低コスト木材搬出システム構築に向けて』平成 20 年 3 月
- (9) 森林利用学会ホームページ <http://jfes.ac.affrc.go.jp/machine/machine.htm>