

第1部 バイオマス利用の利点

1.1 バイオマスの利点

1.1.1 バイオマスとは何か？

バイオマス (Biomass) とは一般に、光合成により直接的あるいは間接的に生産され、エネルギーあるいはマテリアル利用が可能である一定量集積した生物起源の資源を意味する。間接的という意味は、畜産業や食品工業から排出される資源を指す。バイオマスには何十万種という植物、すなわち陸生植物や水生植物、農業系残渣、森林系残渣、産業廃棄物、下水汚泥や動物の排泄物が含まれる。現時点では商業規模では行われていないが、エネルギー作物は大規模なエネルギープラントーションを可能にする有望なバイオマスの一つである。具体的には、スギやカラマツなどの木材、ネピアグラス、菜種、ホテイアオイ、ジャイアントケルプ、クロレラ、オガクズ、木材チップ、イナワラ、モミガラ、野菜クズ、食品加工残渣、下水汚泥、パルプスラッジ、家畜糞尿などがある。プラントーション型バイオマスには、ユーカリやハイブリッドポプラ、パームヤシのような木本系バイオマス、サトウキビやスイッチグラスのような草本系バイオマスなどが該当する。分類については2. (1)で詳述する。

オックスフォード英語大辞典 (Oxford English Dictionary) によれば、バイオマスという言葉が文献に初めて現れたのは1934年である。海洋生物協会誌 (Journal of Marine Biology Association) という論文誌の中で、ボゴロフというロシアの学者が学術用語としてバイオマスという言葉を使った。これによれば、学術用語で *Calanus finmarchicus* という動物性プランクトンの季節毎の成長の変化を調べるために、採取したプランクトンを乾燥して重量を測定した。この動物性プランクトンをバイオマスと呼んだのが最初である。

バイオマスは再生可能資源であり、バイオマスから得られるエネルギーは再生可能エネルギーとされているが、わが国では新エネルギーと称されている。これはわが国独特の解釈で法律用語ともいえる。新エネ促進法は、正式には「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」と呼ばれ1997年4月に施行された。バイオマスはこの段階では新エネルギーとして認知されていなかったが、2002年1月の制令改正に伴いバイオマスが新エネルギーとして認知された。

新エネルギーには太陽光発電、風力発電、燃料電池、廃棄物発電、廃棄物熱利用、バイオマス発電が含まれている。法的には、新エネルギーとは石油代替の製造、発生、利用であること、経済性の面での制約から普及が十分でないもの、促進を図ることが特に必要なものとして法令で定めるものと規定されている。したがって、化石燃料である天然ガスや石油を使った燃料電池も上の規定により新エネルギーであり、バイオマスの熱利用は古くから行われているが新エネルギーとして規定されている。外国では、バイオマスエネルギーはバイオエネルギーと呼ばれるのが普通であり、再生可能エネルギー（Renewable energy）の一員として位置づけられている。

多くの研究によれば、今後数 10 年にわたり化石燃料の価格が高騰していくにつれて、バイオマスエネルギーは全体のエネルギー供給の中で大きな割合を占めていくと予想されている。バイオマスは、エネルギー源としてのバイオマスは大きな魅力がある。なぜならば、CO₂ 排出が正味ゼロであるということから、温室効果ガス排出には寄与しないからである。これをバイオマスのカーボンニュートラル性と称し、2. (1) で改めて解説する。バイオマスを燃焼してエネルギー利用しても CO₂ 排出にはならないが、化石燃料と同様にバイオマスもほとんどの炭素を CO₂ に変換する。バイオマスの場合 CO₂ 排出が正味ゼロであるというのは、バイオマスエネルギー消費の際に排出した CO₂ を新たに植林した樹木や植物が吸収するという仮定に基づいている。このことは適切なバイオマスプランテーションの管理がされている限りは正しいが、多くの発展途上国で見られるように再植林されなかったり、少なくとも伐採された森林が元通りに植林されない森林からバイオマスエネルギーを得ている場合は、その限りではない。

また、バイオマスエネルギー利用が拡大すれば、土地利用に重大な懸念が生じる。すなわち、食糧生産や木材生産のような商業的な森林利用と競合することになる。最近の報告によれば、バイオマスエネルギーのポテンシャルは 2100 年段階 42 EJ から 50 EJ まで大きな幅があり、この見積もりの違いは利用可能な土地の確保とバイオマスの生産性による。食糧確保や環境保全と調和したバイオマスエネルギー利用が望まれる。

バイオマスの種類は多様であり、化学的性質、物理的性質、含水率、機械的強度がそれぞれことなる。これに対応してマテリアルやエネルギー変換技術もまた多様である。変換技術については後段で詳しく解説する。現在、化石燃料への依存度を低下させ、CO₂ を削減させ、かつ地域の経済を活性化するために、コストが低く、環境に負荷の低い、バイオマス変換技術の開発が進められている。

1.2 バイオマス特性

1.2.1 総論

バイオマス資源は物質的に炭素循環と光合成のプロセスを経て、基本的に何度でも利用できる。一方、化石資源は一過性の利用に局限される。化石燃焼が引き起こす不可逆的な CO₂ 放出は、大気中 CO₂ 蓄積により地球環境へ重大な影響をもたらす (Fig. 1.2.1.)。

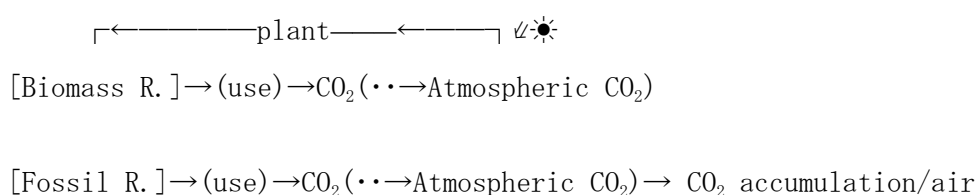


Fig. 1.2.1. Comparison of biomass and fossil system on Carbon cycling.

だが「再生可能」は「持続可能」と必ずしも同義ではない。植物による再生は、極めて脆弱な生態学的基盤の上に成立つ。その成立条件は：成長量と採取量のバランスを維持し、農林地の環境を保全することである。でなければ、長期的な持続可能性は失われる。

1.2.2 再生可能性

エネルギー資源は(1)枯渇性資源（ストック型＝化石資源）と、(2)再生可能資源（フロー型＝バイオマス、太陽、風力、水力）と二種がある。フロー資源は原理的に無限だが、一定期間中には利用可能量に制限がある。森林破壊を起こすような過剰な利用では、再生可能生産ではなくなる。バイオマス資源は両方のタイプを持っている。

(A) フロー型バイオマス資源。純生産量として 1700 億 t/年（世界年エネルギー需要の 7 倍）

(B) ストック型バイオマス資源。森林などに 1800 億 t（世界エネルギー需要/年の 80 倍）

バイオマス消費 (C) には、腐朽あるいは利用消費の二つの道がある。天然林では生産量と等しい量が腐朽し、(A) = (C) の平衡に達した状態にある。

(A) Flow-biomass	→ (B) Stock-biomass	→ (C) Putrefaction or useful consumption
170 Gt/y	1800 Gt	(variable)

しばしば炭素中立な持続可能性を失う。農業における穀類や芋類生産では 1.5~5 となる。一方、野菜の多くは 0.5 以下で赤字生産になる。この点、林業は栽培における投入 E が小さいため一般に農業より優れている。

(a) 人力投入. もし人力投入増を増大させると化石燃料・電力消費を削減できるため、みかけのエネルギー収支比を改善する。しかし人力と化石燃料投入は相補性がある。人力のエネルギー原単位は、生物評価：0.073 toe/年・人と全生活消費エネルギー：1 toe/年・人の間にあると推定される。労働集約的の生産は偽の省エネルギー型になる。

(b) N, P, K 肥料の循環. N(窒素)、P(リン)、K(カリウム)は肥料の主成分であり、収奪的な生産によってよく失われるので、N、P、K を土壌中に保つリサイクルシステムが必要である。P と K 持続のためには灰返還は木質火力発電において必須である。N は燃焼によって失われるので、他の N 供給路が回復のために不可欠である。例外的に伝統的な林業では雨水硝酸 N 補給で十分であって N 肥料を必要としない。しかし未来のエネルギー林には、N 収支が崩壊するので、N 肥料が要求されるであろう。

(c) 生物多様性の保全. 生物多様性は、バイオマス生産増強が、均一性、大規模性、および高密度プロセスを伴うことにより傷つき易い。だが農地林業のように混合植栽では持続的な土壌保全を行うことが期待される。

参考文献

Sano, H. in "Biomass Handbook", Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.311-323. (in Japanese)

UN Energy "Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Maker", 2007.

1.3 バイオマスの利用法

1.3.1 総論

バイオマスの利用にあたっては、まず利用目的と需要、原料の入手可能性を考慮し、多種のバイオマスの中から選択し、次いで適切な変換技術を用いてこれを利用目的に合った物質やエネルギーに変換する。

生物資源としてのバイオマスは、植物を中心として、動物、微生物などの生物やその有機物であ

る。植物資源としてとくに有用視されているものだけでも、膨大な数の種類がある。陸上の陸生バイオマスだけでなく海洋や湖沼・河川の水生バイオマスもあり、陸生バイオマスでは農作物のような草本系バイオマスと森林の樹木の木質系バイオマスが中心である。これらは、利用目的に沿って栽培され、あるいは自然の生態系の中から採取され、利用目的に合うように変換され利用される。利用目的にしたがってエネルギーや原料として使われるものは原バイオマスと呼ばれ、それに対し、生産・変換などの過程で本来の利用目的に合わないものは廃棄バイオマスと呼ばれる。廃棄バイオマスは、また別の目的で有効利用される。たとえば、サトウキビの絞りかすであるバガスは、砂糖やエタノールを造る過程での廃棄バイオマスであるが、エタノールの蒸留などに欠かせないエネルギー源である。廃棄バイオマスの利用は、食料との競合を避ける主要な手段でもあり、バガスは第2世代のエタノール原料としての期待もある。

バイオマスは一般に嵩張り、水分の多い状態では腐敗しやすいなど、運搬、貯蔵は容易でない。そのため生産された土地の近くで利用されるのが自然といえよう。したがって、地域で得られるバイオマス資源と近くの関連する地域での需要を考えてバイオマス利用を進めることが多い。しかしペレットなどのように高密度化したり、液体燃料のように、高いエネルギー密度で輸送に便利な形に変換されたときには遠隔地での利用も行われる可能性がある。

バイオマスの利用には物質としての利用（マテリアル利用）とエネルギー利用とがある。マテリアル利用は食料(food)、飼料(feed)、繊維(fiber)、工業原料(feedstock)、林産物(forest products)、肥料(fertilizer)、薬品類(fine chemicals)など多様である。エネルギー利用は燃料(fuel)としてバイオマスからエネルギーを得て二酸化炭素として大気に排出するもので、最終の利用形態である。これら様々な利用形態の英語の頭文字をとって8F利用と呼ぶこともある。

バイオマスを物質として利用するとき、その質の変化にともなって階段状の滝（カスケード）のように多段階の利用が可能である。例えば Fig. 1.3.1のように、バイオマスを先ず食料として利用し、食品廃棄物の一部を飼料や肥料にするとか、建築木材がそ

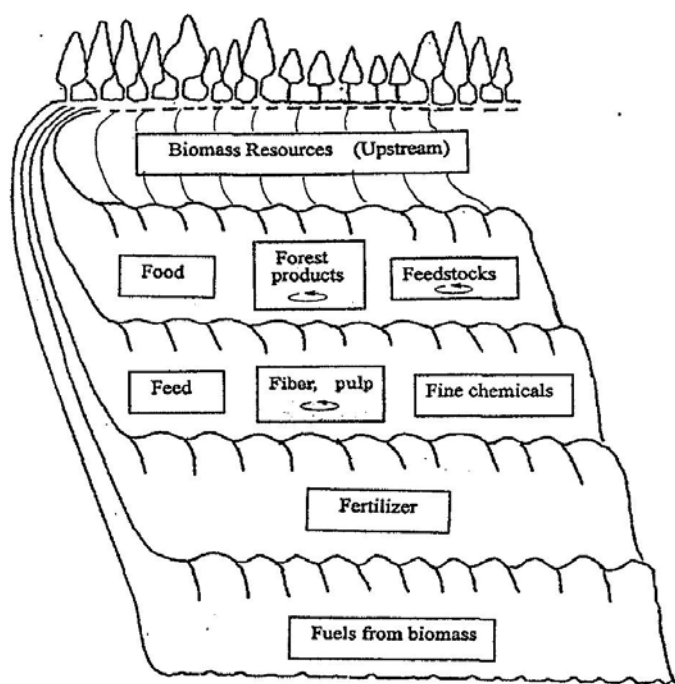


Fig. 1.3.1. Cascade use and recycling of biomass.

の寿命を終えたあとは、チップボードやパルプにされ、最終的には固体燃料としてエネルギー利用される。また、紙や繊維のように同じ利用目的でリサイクル利用される場合もある (Fig. 1.3.1 のひとまわり矢印)。

物質としてリサイクルやカスケード利用をしている間は、炭素は物質にとじこめられたままであるので、それだけ温室効果ガスの排出を遅らせ温暖化防止に役立つことになる。

1.3.2 変換と利用

バイオマスの変換には、利用目的に合うようバイオマスの質を変えるための数多くの技術が用意されている。変換技術には、物理的変換、化学的変換、生物学的変換がある。Fig. 1.3.2 に典型的な変換技術の例を挙げる。物理的変換は、粉碎、磨砕、蒸気爆砕などのバイオマスの表面積を増やしたり、組織を破壊して反応を促進するもの、分離、抽出、蒸留など必要な成分等を取り出すもの、嵩張るバイオマスを圧縮する高密度化、乾燥や水分調整で水分の多いバイオマスを利用に適した状態にすることなど前処理的に用いられるものが多い。

化学的変換は、加水分解、部分酸化、燃焼、炭化、熱分解、水熱反応等バイオマスを分解する反応、合成、高分子化、水素添加等バイオマスを合成または改質するもの、燃料電池のように酸化反応過程で電子をとり出し発電する技術など実に多様な形で使われている。

生物学的変換は、エタノール発酵、メタン発酵、アセトン・ブタノール発酵、水素発酵などの発酵技術とセルロースの糖化等様々な過程で用いられる酵素処理が主要なものである。しかし光合成や光分解もバイオマスの基本過程だけにその高効率化や応用が重視されている。

なお、バイオマスの燃焼熱を機械的動力に変換する熱サイクルには、オットーサイクル (ガソリン機関)、ディ

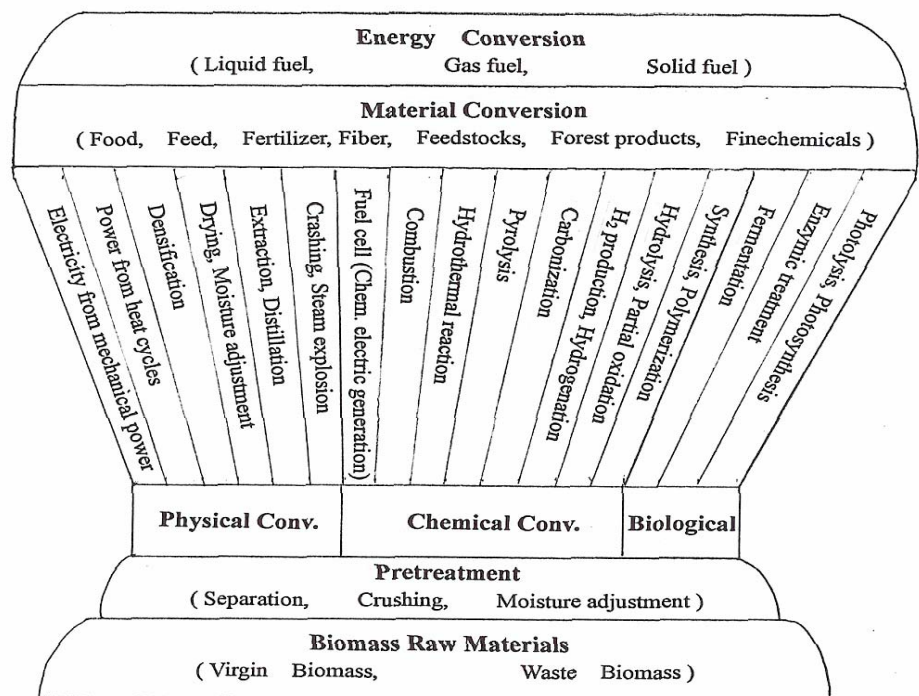


Fig. 1.3.2. Various conversion and pretreatment technologies.

ーゼルサイクル（ディーゼル機関）、ランキンサイクル（蒸気機関）ブレイトンサイクル（ガスタービン）などが用いられる。機械的動力を電力に変換するには電磁誘導を利用した発電機がつかわれる。

バイオマスの質を変える本格的な変換過程に先立って前処理が行われることも多い。分離、抽出、粉砕、水分調整など本格的な変換の前に必要な前処理が行われる。

Fig. 1.3.2 はバイオマス変換のマジックボックスとでもいうべきもので、箱の底に入れられた原バイオマスや廃棄バイオマスは前処理工程をへて、様々な変換技術を使って質を変え、利用目的に合った物質やエネルギーに変換される。

変換過程の評価は、変換された物質がいかに利用目的にかなっているかの質とともに、変換の収率やエネルギー効率で評価される。これらが高いほど一般に変換の経済性も良くなる。

バイオマスの変換・利用システムを計画するときには、バイオマスの収集量の季節変動、輸送手段と距離、貯蔵方法等を検討し、需要とバランスするか確認する。また輸送、変換、利用システムの運用組織、運用ルール、関連する法規との整合性、可能な助成等も含めて経済性等を確かめる必要がある。

1.4 バイオマス利用の利点

1.4.1 総論

バイオマス由来のエネルギーは、多くの先進国の現在の技術や市場の状況の下では、化石燃料に対して経済的な競争力を有してはいないのが一般である。しかし、マテリアルあるいはエネルギーを目的としたバイオマス生産には、多様なメリットが期待できる。そのメリットはケースバイケースで異なるが、とりわけ注目すべきは、化石燃料の消費に伴う温室効果ガスの削減、新たな産業の誕生や地域内で生産された原材料の利用に伴う雇用の創出と収入の増加、そして輸入依存度の低下によるエネルギーセキュリティの改善である。しかし、これらのメリットの価値は、バイオマスおよびバイオエネルギー生産コストに比べ理解を得られていない。これらのメリットを評価することは、バイオマスとバイオエネルギーの総合的な競争力に関する理解をより具体的なものにするとともに、バイオエネルギー開発や政策形成に有意義な情報を与えるものとなる。

1.4.2 石油資源の枯渇

かつて森林資源や石炭は豊富に存在し、エネルギー需要に応えるのに十分な資源量が存在していた。しかし、人間活動が予想を超えるほどに盛んになるにつれ、石炭、そして石油を燃料とするより効率の高いエネルギー技術の開発が必要とされるようになった。

世界の原油の究極埋蔵量は2兆バレルと推定されている。世界の1日の原油消費量は7,170万バレルである。現在、世界では1兆バレルがすでに消費されてしまい、残り1兆バレルが地下に埋蔵されている(Asifa and Muneer, 2007)。石油を代替するエネルギーへの転換がなければ、原油やその他の燃料が急騰し、経済は破滅的な状況に陥る可能性がある。バイオマス利用を増やすことは、減りつつある原油供給の寿命を伸ばすことにつながる。たとえば、Carpentieri *et al.* (2005)は、天然資源の枯渇を遅らせるという観点において、バイオマス利用の重要な環境面での利点を示している。

1.4.3 地球温暖化

世界的に、温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出量の増加が世界の気候にとって脅威となっている。2000年の推測によれば、毎年2000万トン以上の二酸化炭素が大気中に排出されている(Saxena *et al.*, in press)。この傾向が続けば、大雨や大洪水、干ばつや地域的にアンバランスな天候といった甚大な自然災害が発生することが予想される。バイオマスは、そのライフサイクルにおいてカーボン・ニュートラルな資源であることから、温暖化防止の一番手として期待されている。バイオマスは、石炭、石油、天然ガスに次いで世界で4番目に使用量の多いエネルギー資源であり、世界の一次エネルギーのおよそ14%を供給している(Saxena *et al.*, in press)。バイオマスは、現在も世界中で重要なエネルギー資源と考えられている。

エネルギー消費に伴う温室効果ガスを削減するために、排出量に対する課税や排出権取引などの政策手段が提案されてきた。これらの気候緩和のための政策は、二酸化炭素を排出する化石燃料を代替できるという点において、バイオエネルギーの化石燃料に対する競争力の向上につながるだろう。しかし、バイオマスのエネルギー変換時における投入エネルギーは、たいていは化石燃料である。化石燃料と比べ、バイオマスのライフサイクルにおけるエネルギー収支はプラスになると考えられる。しかしそれはプロセスで異なり、時には化石エネルギーの総投入量が化石燃料に比べかろうじて少ないか、あるいは多くなってしまうことさえあるかもしれない。バイオエネルギーシステムは、ライフサイクルの視点、さらにはLCAに基づいて化石燃料と比較すべきである。

1.4.4 生活の質の向上

発展途上国経済においては農業が非常に重要な産業であるため、持続可能な農業が農民生活の質や彼らの収入の向上につながることを望ましい。途上国の農村地域では識字率が高くはないと考えられるため、農民に対する教育が重要となる。したがって、技術に関して適切な情報を農民に提供する必要がある。バイオマス利用が農民にとって有効であるために重要なことは、バイオマスプラントや原料を確保できる場所にアクセスしやすいことである。仮に農民がバイオマス原料を所有していたり生産したりしていても、それらを利用できる場所にアクセスする手段がなければ意味がないからである。

1.4.5 農民の収入の増加

農民を支援するには、主に2つの方法があると考えられる(The Japan Institute of Energy, 2007)。1つは便利なエネルギー源へアクセスできるよう、エネルギーを供給することである。タイでは小規模メタン発酵が農民に調理用ガスを供給し、それがプロパンガスの節約につながっている。このサポートは化石燃料の使用量の削減にもつながるため、持続可能な農業のためにも有効である。もう1つのサポートは現金である。農民がエタノールの原料を栽培し、それをより高い価格で販売すれば、電力を購入するための現金を得ることができる。一般にエタノール燃料を使用する層は農民に比べて裕福であると考えられるため、このメカニズムは‘富の再分配’とみなすこともできる。

1.4.6 エネルギーセキュリティ

すべての国、とりわけ先進国の経済は、エネルギーの安定供給に立脚している。エネルギーセキュリティとは、適切な価格で多様な形態のエネルギーを常に十分な量確保できることを意味する。もしエネルギーが持続可能な開発に寄与するものであるとすれば、エネルギーセキュリティが長期間維持されなければならない。しかし、ほとんどの国が依存している化石燃料には、埋蔵量に地域的なバラツキがあるため、エネルギーセキュリティに対する注意が重要となる。国際的に輸入原油に対する依存度が高まっていることを考えると、近い将来エネルギー供給がより脆弱なものとなる可能性がある。その点、自国の資源であるバイオマスには、原油のような国際的な価格変動や供給の不確実性に左右されないというメリットがある。

1.4.7 外貨獲得

発展途上国にとってバイオエネルギーの輸出は、外貨獲得のためのチャンスである。タイのキャッサバを例に挙げると、現時点でキャッサバ生産は、食糧とエタノールの間でバランスしている。しかし、将来的な用途は、注意深く決定する必要がある。今後エタノールのためのキャッサバ生産は増加すると考えられるが、一方でエネルギー利用と食糧生産との競合がしばしば指摘される。つまり、国際的なエタノール需要が国内の食糧の安定供給を脅かす可能性があるということである。

参考文献

- Asifa, M.; Muneer, T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1388-1413 (2007)
- Carpentieri, M.; Corti, A.; Lombardi, L. Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal, *Energy Conservation and Management*, **46**, 1790-1808 (2005)
- Saxena, R.C.; Adhikaria, D.K.; Goyal, H.B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (in press)
- The Japan Institute of Energy. "Report on the Investigation and Technological Exchange Projects Concerning Sustainable Agriculture and Related Environmental Issues," Entrusted by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (Fiscal year of 2006) (2007)