

洋書紹介：再生可能なエネルギー、燃料、化学物質としてのバイオマス  
(Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals)

ドナルド・L・クラース著  
(Donald L.. Klass)

バイオマスエネルギーに関連したバイオマス資源、バイオマス変換技術のみならず、地球的な気候変動や世界的なエネルギー動向など多くの幅広いトピックスについての要点が書かれており入門的図書として活用できる一方で、また数値的なデータ、参考文献についても多数記述があるので発展的に有益に活用できるように思われる。

著者 クラース博士は、ハーバード大学にて博士号(有機化学)を習得の経歴をもち、エネルギーと環境を扱うコンサルティング会社の研究担当取締役を勤める一方、バイオマスエネルギー研究会の会長も兼務している。過去 40 年に以上にわたってエネルギー、燃料分野の多数の研究開発活動や実用化プログラムに従事してきた。

本書の構成は、以下の通り。

## 序論

- 第一章 エネルギーの消費、埋蔵量、枯渇と環境問題
- 第二章 エネルギー源としてのバイオマス コンセプトと市場
- 第三章 バイオマスの光合成と、転換に関する特徴
- 第四章 植物系バイオマスの生産
- 第五章 廃棄物系バイオマスの量、エネルギーとしての可能性、利用可能量
- 第六章 物理的変換プロセス
- 第七章 熱変換(燃焼)
- 第八章 热変換(熱分解と液化)
- 第九章 热変換(ガス化)
- 第十章 自然の力を利用した生化学的液化
- 第十一章 合成酵素処理液化燃料
- 第十二章 微生物による変換
- 第十三章 バイオマスから生成される有機化学物質変換
- 第十四章 統合バイオマス生産 変換システムと純エネルギー生産
- エピローグ

エネルギー問題と気候変動について詳しく数量的に述べ、バイオマス導入の根拠として1章分を割いて書いている。次に資源的観点でバイオマスを解説した後、熱源用、蒸気源用、電力源用としての再生可能な国内エネルギー源の実現に向け固体、液体、気体燃料として幅広い工学、技術分野について論じている。また、最後に、エネルギーシステム全体の収支についてもシステム的な解説を加えている。

## 第一章 エネルギーの消費、埋蔵量、枯渇と環境問題

はじめに

過去のエネルギー消費パターン

化石燃料の埋蔵と枯渇

環境問題

著者は、化石燃料の消費量の増大と全地球的な気候変動の関係には、明確に立証はされていないが相関する関係があるようだという立場でありながらも、もしこのまま使用量や環境破壊が進行すると、バイオマスエネルギー利用の促されることになるだろうという考えを著者の出発点に本書をとりまとめている。

過去のエネルギー消費パターンとして、産業革命以後、あるいは第三世界諸国においては、石炭が徐々にバイオマスにとって変わることが示されている。また、その後は、原油、天然ガスが代替として多く用いられる傾向を示している。世界全体のエネルギー消費量の 1/4 に相当する米国については、グラフでもってその過程が示されており、19 世紀中ごろまでは、90%強がバイオマスによるエネルギー、燃料供給であった。その後、石炭が普及し、さらに、原油、天然ガスの消費割合が増大する様が 150 年の間の変化として表されている。さらに、エネルギー消費量は、年代とともに変化した人口、経済と興味深い関連を示していた。

世界的な地域別の1人あたりのエネルギー消費量は、経済や技術の発展状況に対しはっきりとした連動をみせる。そのエネルギー源の内訳は、地域による違いをみせ、開発途上国においては、先進国に比べバイオマス・エネルギー消費量が多く、アフリカなどは 3 分の 1 を上回る結果を見せている。また世界全体のエネルギー消費量は、第二次世界大戦後、急激な伸びを示している。

化石燃料の枯渇の問題に触れ、確認埋蔵量のという概念及びその正確性について解説をしている。石油、石炭、天然ガスについて、地域ごとに確認埋蔵量のデータを示し、解説している。枯渇について、現在差し迫った問題はないが、資源が有限であることと、その消費量が増加傾向であることから、いずれにしても、消費は増大することはあっても減少する見込みが少ないとから、21 世紀中ごろ以降には枯渇するだろうとの結論で、やはり問題は深刻であると結論づけている。今後は、タールオイルなどのより低質な資源を活用するであろうと予測し、同じく枯済時期(最長で 2100 年ごろ)について算出した例を紹介している。

温室効果ガス、及びその発生源について、そしてそれらが及ぼすであろう地球温暖化と海面の上昇などの科学界の見識、議論、豊富なデータについて幅広く、かつ要点をかいづまんで記している。これらの推算された数値やその動的シミュレーションには不確実性が多い点についても適正に捉え、例えば文中に次のように表現している。「化石燃料の消費こそ大気中の CO<sub>2</sub> 蓄積の主因であると認める識者は多い(ただし、概ね意見が一致しているというレベルではない)」、

## 第二章 エネルギー源としてのバイオマス コンセプトと市場

はじめに

基本的なコンセプト

再生可能な炭素資源の分布状況とバイオマスの存在量

バイオマスのエネルギーとしての可能性

市場における普及度

この章では、バイオマス資源及び技術の特徴について触れ、エネルギーや燃料の代替的供給源としての植物系バイオマスと廃棄物系バイオマスのコンセプトを検討するとともに、エネルギーとしてのバイオマスの可能性と普及状況を評価している。また、バイオマス資源利用と技術に関して、生産、収穫、複数用途への利用、廃棄、変換などの複数の経路が存在する特徴について述べている。はじめに、著者は「再生可能な炭素資源」という誤った用語について指摘をした。炭素の消費とは今後一切使用できなくなることであり、地球上にある炭素の実際は、絶えず循環状態になり、数多くの可逆的、不可逆的な化学反応を介して再生可能なエネルギーに変換していることを強調した。

その次の項( )においては、その具体的な炭素の大気圏、地圏、水圏、及び生物相(バイオマス)における、大規模な CO<sub>2</sub> の吸収、放出及び炭素交換量、の動的推計や蓄積量について解説している。各々細目については、いくつかの表にまとめられており、例えば、植物の光合成、呼吸、化石燃料類の消費、セメントの生産、動物(及び人間)の呼吸量や、地圏、水圏の炭素蓄積量など多数の項目が挙げられる。

バイオマス・エネルギーの可能性について、植物系バイオマスについては、面積あたりの生産量について述べ、また、米国の実際の土地の利用区分に適応した場合のバイオマスの潜在エネルギー量を天然ガスの代替量として評価した結果を掲載している。また、エネルギー・プランテーションや海洋バイオマスの将来的な可能性について付け加えている。廃棄物系バイオマスについては、都市固形廃棄物、下水汚泥、し尿、農業残渣などの項目について、換算値を用いて、米国の潜在的エネルギー量を試算している。また、それら農業系、廃棄物系の両方を査定した例として、ウェスコンシン州を対象とした調査を紹介し、再生エネルギー源にシフトした際の、そこエネルギー代替効果や経済効果の試算の結果を簡単にまとめている。

市場に対する普及度については、主に米国市場について書かれ、現在のように減税政策が継続的に行われるなら、今後も高いバイオマスの利用状態を維持・発展するだろうとして、具体的に利用用途木質、燃料用アルコールなどの現状、普及度、課題などについて概説している。

### 第三章 バイオマスの光合成と転換に関する特徴

#### はじめに 光合成 バイオマスの組成とエネルギー含有量

前半部分は、植物の光合成のメカニズムを中心に化学的に分子レベルの記述がなされている。また、光合成の結果、植物内で生産される様々な主要物質についての特徴や変換過程が書かれている。後半は、各バイオマス種についての成長量について記述され、それらの組成や一日あたりの産出量(t/ha-day)などのデータが表としてまとめられている。

バイオマスの成長に必須な光合成のプロセスは、太陽光が植物の色素で吸収することで取り込まれたエネルギーを用いて、二酸化炭素が還元され水が酸化されて単糖類が産みだされる。この光のエネルギーが化学エネルギーに転換される際の、多くの物質が関与するやや複雑な過程について、光化学的・生化学的な記述で解説している。また、光合成によって生産された糖が、エネルギーとして利用され、その派生としてセルロース、ヘミセルロースなどの多糖類、リグニン、タンパク質、トリグリセリド、テルペンといった物質に変換される生化学的経路及び各々物質的特長について説明されている。

代表的なバイオマスの産出量についての有機成分(や灰分)、含水率、高位発熱量についてが、海洋、淡水、草本、木質といった属性ごとにまとめられている。また、主要な有機成分については、その炭素やエネルギー含有量についてまとめられている。これらの詳しい組成についてのまとめは、バイオマスの変換に関する基礎的な研究・実験を行うにあたっての有益な資料となりうるようと思われる。また、システムやプロセス設計においてもより詳細な変換量を推測する際の有益な根拠となるデータとなるであろう。

## 第四章 植物系バイオマスの生産

はじめに

気候要因と環境要因

バイオマス生産に利用できる土地と水域

エネルギーとして利用する植物系バイオマスの選定

植物系バイオマス生産の経済的側面

植物系バイオマス生産に関する研究

植物系バイオマスから合成燃料やエネルギー製品を生産するには、エネルギー作物として、選択されたバイオマスを適切な量だけ栽培、収穫した上で、最終消費者や転換プラントに輸送しなければならない。世界には、植物種は 25 万種存在しているが、換金可能な作物は 300 種程度しかない。その中から、さらにエネルギー等の生産に適した種を選定することになるが、実際は、その生育土地に適した多産かつ安価で生育が早い理想的なバイオマスを選ぶことになるとしている。バイオマスの生産(つまり植物の生育)が効率的に行われるには、多くの要素がある。大きく分類して、日射量、降水量、温度、周囲の二酸化炭素濃度、栄養素の気候要因、環境要因について考慮する必要があり、米国内であるが具体的な資料を参照している。

陸上のバイオマスの生産に適した土地の面積は現状の土地利用区分から試算することができ、米国におけるデータを交え解説している。また、和書にはあまり記述例の少ない水生バイオマスについても触れあり、米国内において、淡水水域は多いがその多くは北部の温暖でない地域に多くあることからまた、海洋バイオマスの大規模生産(カリフォルニア沖合の 320 ~ 540km までの正方形の海域で水生バイオマスを生産できれば、全米のガス需要をすべて満たせるだけの簡単に転換できることを示す論文を紹介している。一方、海域の海運利用との競合による問題点から、小規模の海洋バイオマス生産システムに実現可能性があるとも結論づけている。

エネルギー用に適した陸上バイオマス種は、短期間で集約的に栽培できる、森林バイオマスとしてユーカリやポプラなどを、また、草本バイオマスとして、サトウキビのようにエネルギー用途だけでなく、食品など多用途に利用されている例として紹介している他、栽培性バイオマスなどについて多くのバイオマス種を幅広く紹介している。

エネルギー作物を商品化して経済的利潤を得られるようにするには、原料コストがマイナスであること(廃棄物)、副産物に対して多額の補助金が交付されること、自家消費などの利用法が存在すること、環境関連の補助金が交付されていること、税制上の優遇措置が設けられているなどの条件が整っていなければならぬとしている。

## 第五章 廃棄物系バイオマスの量、エネルギーとしての可能性、利用可能量

はじめに

都市廃棄物

農業固体廃棄物

森林残渣

産業廃棄物

エネルギー源として廃棄物系バイオマスが担うべき今後の役割

廃棄物系バイオマスとは、元々は植物系バイオマスを起源とするバイオマスであるが、植物系バイオマスに比べて安価で、価格がマイナスになっていることが多い。この章では廃棄物の生成量、エネルギーとしての利用可能量を取り扱い、モデルとしては米国が用いられている。その内容に関しては、概ね他の先進国にもそのまま妥当するものと思われる。

都市における、廃棄物処理とエネルギー回収を同時に実施できる都市廃棄物は2種類あり、具体的には都市固体廃棄物(MSW、都市ゴミ、生ゴミ)とバイオソリッド(下水、汚泥)である。各々の存在量、利用可能量、エネルギーとしての可能性の観点で述べている。

以下同様に、農業固体廃棄物、森林残渣、産業廃棄物について、存在量、利用可能量、エネルギー利用可能性を述べている。農業固体廃棄物は、家畜類の糞尿などの排泄物や農作物残渣を利用可能量の試算には、収集可能な排泄物の割合や農作物の残渣係数を用いている。森林残渣についても係数を用いて試算する点は同様でありその結果が示されている。産業廃棄物については、製紙産業について試算されている。

廃棄物系バイオマスから得られるエネルギーが普及するか否かは、政府の政策、化石燃料の枯渇速度、外国・国内の経済的要因、人為的に制御された場所で特定の残渣を利用できるかといった要因によって左右される。環境規制が導入された場合、その処理方法が影響を及ぼすことにも注意が必要となる。経済的な要因については、エネルギー源の価格、既存の処理方法の対価、所要の処理方法のコスト、リサイクル市場の存在などが挙げられるとしている。

## 第六章 物理的変換プロセス

はじめに

脱水と乾燥

サイズリダクション

緻密化

分離

変換プロセスの燃料として、または供給原料として使用するバイオマスを準備するために行う、物理的プロセスを説明する。検討するプロセスは脱水と乾燥、粉碎、緻密化および分離であり、物理プロセスを 2,3 の個別例を挙げて説明し、さらにその後転換で使われる熱化学プロセスまたは微生物プロセスとの関係ともに説明している。

原料とするバイオマスから、熱エネルギーを回収するような時には、変換前に生の供給材料を部分的に乾燥させることが必要となる。でなければ、エネルギーまたは燃料を生み出すはずの変換プロセスで、消費されるエネルギーの方が多くなってしまうこともしばしばあるからである。最もコストのかからないのは天日乾燥であり、早く乾燥されるためには、噴霧乾燥器、ドラム乾燥器、対流式オープンなどがあり、大規模には、強制空気炉や高温煙道ガスなどある。水生、陸上バイオマスなど、様々な含水率を有する資源種に対して、プロセスに応じた適切な脱水、乾燥の基準について記している。

燃料として利用したり、ペレットやブリケットに加工、転換したりするためには物理的にサイズの縮小に迫られることが多い。さらに細かく粒子状ないし片状にすれば、貯蔵容積を減少し、ハンドリング、移送などによる影響を及ぼすことになる。サイズリダクション向けのいくつかの粉碎機械による用途に応じた利用について細かく記述が行われている。

高密度に加工したバイオマスは、運送の取り扱いや貯蔵を簡単にし、バイオマスの安定性をまし、炉などへの投入を容易にし、エネルギー密度を高め、場合によっては石炭の発熱量に相当するクリーンな固体燃料として、その経済価値を高めることになると説明している。具体的な圧縮法とそのハードウェアについて詳しく解説し、また、ペレット燃料の規格や圧縮に伴うコストの増加についても付け加えている。

## 第七章 熱変換(燃焼)

はじめに

基本事項

設備と応用分野

環境問題

バイオマスをエネルギーまたは燃料に変換するすべてのプロセスの中で、燃焼が依然として多く用いられている技術であり、現在利用されている95%超が直接燃焼によるバイオマスエネルギーである。

原始的な利用を歴史的に行ってきたが、近代的な燃焼システムとバイオマス燃料と化石燃料を両方用いる複合燃焼システムにおいて、植物系バイオマスと複合廃棄物系バイオマスの原料を熱、蒸気、電気に変換するために改良された燃焼プロセスを利用している。小型の触媒型薪ストーブが開発され、全体として熱効率を高める一方で排出物の減少を達成した。大中規模の焼却炉は、排気のクリーンさを最大化して効率的な燃焼と都市固形廃棄物に配慮した熱回収機能を備えるよう設計されている。さらに、近代的なボイラーシステムは、木材、都市固形廃棄物、RDFなどのゴミ固形燃料、その他のバイオマス燃料が自治体や公共サービスのために利用できるものであると記述されている。

本章では、さらに、直接的なバイオマス燃焼の基本的な化学を解説し、運用効率と環境への改善を可能にしてきた開発、商業化されてきたシステム、今後商業化が期待される最新システムについて検証している。運用に関わる問題を解決するのに必要な改良と、現在進められている研究に期待する進歩にも論じられている。

燃焼とは、バイオマスと酸素の高速化学反応(酸化)であり、(熱)エネルギーが放出され、最終的酸化生成物として二酸化炭素と水が理想的には同時生成される。それらのプロセスのステップや、放射するエネルギー、化学量論的モデル、物理的パラメーターなど燃焼の研究の基本的な化学、理論的内容について詳細に書かれている。

住居用など小規模な商用システムから先端的な燃焼システムまでハードウェアを概説し運用上の注意について述べている。また米国を中心に電力の生産の多くの事例が紹介されている。

小規模な木材燃焼が及ぼす環境への影響について、特に触れ、現在は、進歩改善された装置の出現により燃焼効率と排出物は随分改善されていることを説明した。その後、米国内のバイオマスの燃焼に関わる規制とそれを満たすための排出制御技術について記述されている。

## 第八章 热変換(热分解と液化)

はじめに

基本事項

プロセス

その他の液化方法

热分解溶液と非热分解溶液の比較

バイオマス熱分解は、酸素が存在しない状態において、液体、固体の派生物および燃焼ガスといった有用な生成物を生成するバイオマスの有機構成要素の直接熱分解であると説明できる。熱分解プロセスは、現在も改善・発展中のテクノロジーであるが、バイオマス原料の広範囲な燃料、溶媒、化学薬品その他の商業生産に利用されるようになった。

この章では、バイオマスの直接熱分解の基礎的化学作用及び以前から商業化が期待されている最先端のシステムについて論じられている。また、水素(水素熱分解)たメタン(メタン熱分解)が存在する場合の熱分解についても言及されている。液体燃料と木炭の形でのエネルギー回収に重点が置かれているが、液体媒体を用いて液体燃料にバイオマスを転換するもうひとつのプロセスについても説明を行っている。

バイオマスの原料の種類と組成、反応の温度と圧力、残留時間、反応率での触媒、製品の選択可能性、製品の生産高といった様々な独立のパラメーターの効果についての知識を紹介している。これらは、熱分解のメカニズム、動力学、熱力学などの知見は、熱分解プロセス発展の基礎であり、実験に基づいた多数のデータの蓄積により以前進歩をもたらしている。

20世紀初頭では、木炭回収、木酢液精製、副産物回収、着たい会衆と利用のための設備のため、バイオマスの熱分解炉には様々なオープンと水平、垂直のスチール・レトルトが使われ、事実上すべてがバッチ・モードで使用されていた。現代的な熱分解炉の構成には、固定床、移動床、浮遊床、流動床、噴流投入固形物炉、定置垂直シャフト炉、傾斜回転式キルン、水平シャフト・キルン、ガス・プランケット・ウォールを持つ高温電熱炉、单一・多重炉床炉、その他多くの設計があり、それらの多様な熱分解システムを説明し、基本的なバイオマス熱分解方法と運用上の問題点の要約をおこなっている。

## 第九章 热変換(ガス化)

はじめに

基本的事項

石炭のガス化

バイオマスのガス化

商用もしくは商用に近いレベルにあるバイオマスのガス化の方法

バイオマスの熱分解によるガス化とは、解重合と脱水反応による炭化水素高分子の分解と、それに続く蒸気と炭素および蒸気・炭素分裂反応が関与するプロセスと解釈されている。したがって石炭と非常に似た反応であり、ある段階以降は実質的に同じと考えられている。一方、一般には、バイオマスの方が反応性が高い。バイオマスのガス化プロセスには、熱分解、部分酸化および改質の三種類のタイプがあり、これらの定義および化学量論と熱力学的解説を述べた後、ガス化装置の設計について説明している。

バイオマスのガス化プロセスは一般的に低または中程度のエネルギーを発生する燃料ガス製造や化学薬品や水素製造を目的とする合成ガス製造を目的として設計されている。第二次世界大戦以前は、車両用やガス、蒸気、電気の発生のためにガス装置が構築されていた。その後も、様々な国、地域で研究が継続された

バイオマスの加熱ガス化についての豊富な文献から慎重に選別した情報とデータをもとに、バイオマスのガス化の商業化と関連事項の多い石炭のガス化について触れている。大型な石炭ガス化装置が稼動する一方で、バイオマスガス化装置については、まだ商用運転の域に達していない。米国でも 1970 年代初頭からバイオマスのガス化に多大な努力が払われてあり、かなりの数のバイオマスガス化プラントが建設されたが、それらの稼動している例は少ないようである。

ガス化には、望ましくない排出物や副生成物も生じ、それらを含むガスを電力ユニットに供給するにはそのクリーンアップが重要な研究課題である。また、多機能供給操作システム、高圧ガス化装置に対応したバイオマス供給装置など多様なバイオマスに対応したシステムの研究の必要性が認知されており、1990 年代に至り、化石燃料の上昇から再び大きな注目を集めているとし、商用化に近い段階に達するプロセスについて説明している。

## 第十章　自然の力を利用した生化学的液化

はじめに

供給源

変換の化学反応

プロセスと経済

この章では、内燃機関の燃料として適切となり得る、天然の生化学的液体の供給源、その基本特性と変換について、化学反応、プロセスの経済性について詳しく検討する。

何百ものバイオマス種が低分子量の有機液体を生成することも発見されており、その一部は火点・点火または圧縮点火エンジンで駆動する車両の輸送燃料として使用されるか、使用を提案されている。これらの液体とは、具体的には、グリセリドとテルペンである。脂質であるグリセリドは、潤滑油、石鹼、洗剤、化粧品、薬品などの製品原料として長年使われてきたが、低分子のアルコールを用いて、エステル交換反応というよく知られたプロセスを利用することによって適切な燃料に形成される。テルペンという用語は元々、針葉樹、特に松の木から得られるテルペン油を起源とする。 $C_{10}H_{16}$ の異性体炭化水素の混合物を表していた。さらに今日では、 $(C_5H_{10})n$ を有するイソブレン、及びその派生である多数のテルペノイドも指す。

多くの天然グリセリドは車両用のディーゼル燃料として、全くかほとんどと言っていいほど問題なく使用できる。しかし、直接噴射エンジンの燃料として使われる際にはいくつかの問題が生じ、それらは、天然グリセリドの方が粘土が高く、揮発度が低いことから生じる。

大豆油、菜種油、ピーナッツ油、ヤシ油、ヒマワリ油、さらには動物性脂肪などが、様々なバイオマス由来の市販オイルのメタノール及びエタノールとのエステル交換生成物が、エンジンを改良しなくてもディーゼルエンジンの添加剤または純燃料に適することが次第に判明してきている。それに応じて、いわゆる「バイオディーゼル」市場の開発を目指すプログラムが、まずヨーロッパの数カ国で、ついでアメリカで開始された。主に欧州では菜種油を、米国では大豆油と菜種油のメチルエステル化することに強い関心が向けられている。ヨーロッパで最も進んだプログラムを備えているのは、オーストリアであり、試験プラント、小規模な農業共同組合、産業規模プラントが建設され菜種油のバイオディーゼルが基準燃料として採択された。マレーシアではヤシ油によるバイオディーゼルを開発中である。

## 第十一章 合成酸素処理液化燃料

はじめに

アルコール系モーター燃料開発の歴史

酸素添加物の特性

酸素添加物の生産

経済的要因

エタノールは内燃機関にとって重要な混合剤で、バイオマスの主要な微生物変換生産物でもあり「発酵」により生産される。歴史的に言えば、第一次世界大戦前後、化石資源の代替として多くの国で導入が図られたが、その後エタノール供給の不安定性から、その後衰退し、その後しばらく、復活することはなかった。米国では法律や諸規制が施行された結果、液体バイオ燃料産業は大幅に拡大した。1978 年のイラン・イラク戦争をきっかけとして、10vol%エタノールとガソリンの混合燃料ガソホールとして道路ガソリン税の免税措置がとられ、それ以降、バイオマスベースのアルコール類の商業利用が促進された。さらに、環境特性の向上のため、ガソリンに溶ける酸化有機化合物(酸素添加物)を使用する政府の指令が 1992 年に発行し、バイオ燃料業界に多大な影響を及ぼした。酸素添加物の製造原材料はバイオマスでなくてもよいが、増大する需要の供給として使用され、結果大気中へも有害な物質の排気を大幅に軽減させた。さらに 1992 年エネルギー政策法(EPACT)によって 2010 年までに非化石燃料を 30%浸透させるという目標を設定し、代替燃料の購入割合を暫時増やしていくことを求めた。これらのインセンティブや指令はどれも、バイオマス由来の輸送燃料、特に発酵による新市場を開拓しつつあると説明している。

いくつかの添加物(主にはエタノール)の内燃機関への適用時の特性の検討を紹介している。ガソリンやディーゼルエンジンとの比較によるパフォーマンス、環境上の利点、自動車部品や材料との互換性などを評価するため大小の調査研究プロジェクトの成果をまとめている。

酸素添加物の製造プロセスは既にある程度確定されたバイオマス原料での微生物変換システムに重点をおいており詳しく解説している。が、今後の可能性として熱化学的手法もあり、その可能性についても示している。

## 第十二章 微生物による変換

はじめに

メタン発酵

微生物による水素生成

嫌気性消化法の特徴

商業開発

メタンを生成するプロセスは、メタン発酵あるいは、嫌気性消化と呼ばれている。このプロセスは酸素がない状態で行われ、このプロセスを行う微生物は混合嫌気性細菌群である。メタン発酵は世界中で、一般家庭、都市、農業、産業用廃棄物や廃水などの安定化と処理のために利用されている。

この章ではメタン発酵に関する初期の研究、対象生物の基本生化学と微生物学、メタン発酵プロセスがどのように行われるかというメタンへの生化学経路、メタン菌とそのゲノム配列と遺伝子識別、このプロセスを改善した、新興技術、商業用途拡大の取り組み状況について論じている。

微生物を使った水素の基本的な生成方法は、3つが知られている。まず特定種の従属栄養嫌気生物による発酵があり、中間ピルビン酸が水素や他の生成物に変換される。もうひとつは、光合成生物により水を分解させる方法である。3つ目の方法は、バイオマスから抽出された触媒により同じく水を分解させる方法である。各項目において、水素生成微生物や、水素生成過程として水素発酵とセルフリー系酵素触媒、光合成微生物について詳しく解説している。水素は良好な燃焼状態を示し、有害は汚染物質を生じない特性をもつ優秀な燃料であるが、微生物による水素生成方法今のところ実用化されていない。その商業用途の制約となっていた要因についても論じている。

## 第十三章 バイオマスから生成される有機化学物質変換

### はじめに

#### 工業用有機化学物質と生成物

#### 合成有機化学物質の原料としてのバイオマス

1800 年代の中期から後期までは、バイオマスは有機化学物質の主要供給源であった。木炭、メタノール、酢酸、アセトン、数種の木精化学物質が、硬材の熱処理によって生産され、テルペン油、テルペン、ロジン、ピッチ、タールは軟材によって生産された。糖やデンプンの発酵により、大量のエタノール、アセトン、ブタノール、その他の有機化学物質が供給された。後期になると化石燃料時代が始まり、大部分の有機商品の原料として次第に化石原材料が好まれるようになり、次々のバイオマス原料に取って代った。石油化学産業は 20 世紀序盤からはじまり、その後急激に発展した。炭化水素原料は合成によって大量に生産されるようになった。

第二次世界大戦後、技術的にはバイオマス原料から製造できるとしても、バイオマスからの商品タイプの有機化学物質の製造を正当化することはできなかった。しかし、石油と天然ガスのコストが上昇するにつれ、化学業界はゆっくりと逆戻りすることが予想される。バイオマスの構造特性が特定のプロセスを促進したり、最終生成物に望ましいことから、バイオマスが優先的に用いられる原料であり続けることも予想される。また食品分野で製造原料として好まれ、必要とされる。

一方で、環境問題に関する規制は、化石原料からの化学物質の製造に影響を与え始めている。年間ベースでは、米国の化学産業は 20 億トンの廃棄物を産出しており、それは有害産業廃棄物の 90%と、全米の有毒産業廃棄物の 40%以上を生み出している。大気汚染防止法条項は、今後も基準の適用を広く厳しくするだろうことから、企業は高効率なバイオマス転換プロセスを開発を選択していく可能性があり、また一部の国では、再生可能なバイオマス原料をベースとする有機化学産業がすでに確立していると紹介した。

米国の経済力の主要部門である、有機化学(石油化学)業界の特徴、米国の有機化学物質生産量、米国のポリマーおよびコポリマー生産量など現況に触れ、商品カテゴリーの有機化学物質と、化石原料に変わってこれらの化学物質を製造するバイオマスの将来性について説明している。少量の特別化学物質の一部とバイオマスから製造されるまたは製造できるはずの新生成物についてもエタノール由来から、ペントース由来、ヘキソース由来、リグニン由来、脂質由来などと系統立てて検討をおこなっている。

## 第十四章 統合バイオマス生産 変換システムと純エネルギー生産

### はじめに 統合システム 純エネルギー生産

市場におけるバイオマスエネルギーの役割を決定する要素は、次のようなものがあげられる。競合する燃料コスト、化石エネルギーとバイオマスエネルギーの入手可能性、地球温暖化、温室効果ガス、空気と水の品質、廃棄物処理と処分などの環境問題、バイオマスエネルギーとバイオ燃料を最終利用者に分配するのに必要なインフラ、政府の方針、エネルギー需要と国家安全保障、新エネルギー技術の開発、新エネルギー資源と備蓄などである。最も大きな障壁のひとつは、予測は誤りを免れないことであり、その例として過去の石油価格に関する研究は全く的外れであったとしている。

化石燃料の代用として大きな役割をもつバイオマスエネルギーにとって、競争力ある価格で生産できる IBPCS は不可欠なシステムであるとし、このようなシステムで開発、工業化がなされないのであればバイオマスエネルギーの利用は永久に小規模システムとニッチ市場に限定されるだろう。IBPCS とは、植物系バイオマス原料の生産に関連するすべての業務と原料変換を統合して、バランスの取れた運転システムを提供するシステムであると定義し、その基礎条件、基礎的条件、IBPCS の特徴を説明し、より具体的に詳しくバイオマスと電力生産量の純エネルギー分析、エタノール生産の純エネルギー分析などで、IBPCS の評価などを行っている。