

# SRRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル  
第3作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書  
最終版

バイオエネルギー（仮訳）

## バイオエネルギー (仮訳)

---

### 統括執筆責任者:

Helena Chum (USA/Brazil), Andre Faaij (The Netherlands), Jose Moreira (Brazil)

### 執筆責任者:

Goran Berndes (Sweden), Parveen Dhamija (India), Hongmin Dong (China), Benoit Gabrielle (France), Alison Goss Eng (USA), Wolfgang Lucht (Germany), Maxwell Mapako (South Africa/Zimbabwe), Omar Masera Cerutti (Mexico), Terry McIntyre (Canada), Tomoaki Minowa (Japan), Kim Pingoud (Finland)

### 執筆協力者:

Richard Bain (USA), Ranyee Chiang (USA), David Dawe (Thailand, USA), Garvin Heath (USA), Martin Junginger (The Netherlands), Martin Patel (The Netherlands), Joyce Yang (USA), Ethan Warner (USA)

### 査読編集者:

David Pare (Canada) and Suzana Kahn Ribeiro (Brazil)

### 本章の引用時の表記方法:

Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, 2011: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs - Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

### 注意

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書 <http://srren.ipcc-wg3.de/> を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 5 月 9 日リリースの初版に基づいて行っており、その後 IPCC によって行われた修正、追加、削除等の変更には対応しておりませんので、ご注意ください。

本報告書「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」は上記報告書の仮訳であり、IPCC の公式訳ではありません。正本は英文のみで提供されており、本日本語仮訳を引用して問題が生じても責任を負いかねますのでご了承ください。

## 第2章：バイオエネルギー

### 目次

目次	2
要約	4
2.1 序論	5
2.1.1 バイオマスとバイオマス使用に見られる現在のパターンと傾向	5
2.1.2 気候変動評価に関する過去の国際間パネル	10
2.2 資源ポテンシャル	10
2.2.1 はじめに	10
2.2.1.1 方法論評価	11
2.2.1.2 バイオマスの正味の総地上一次生産量	13
2.2.1.3 人間が取得する正味の陸域一次生産量	13
2.2.2 世界及び地域の技術的ポテンシャル	14
2.2.2.1 文献評価	14
2.2.2.2 残渣、家畜ふん尿、加工副産物、及び廃棄物の寄与	16
2.2.2.3 利用されていない森林の成長の寄与	16
2.2.2.4 バイオマス植林地の寄与	16
2.2.3 バイオマス資源評価における経済的考察	20
2.2.4 バイオマス資源ポテンシャルに影響する要因	21
2.2.4.1 農業及び林業における残渣供給	21
2.2.4.2 農業及び林業における専用バイオマス生産	22
2.2.4.3 耕作限界地の利用	23
2.2.4.4 生物多様性保護	24
2.2.5 資源ポテンシャルに対する気候変動の潜在的な影響	24
2.2.6 合成	25
2.3 技術及び用途	26
2.3.1 原材料	26
2.3.1.1 原材料の生産及び収穫	26
2.3.1.2 農業、食料、及び森林部門との相乗効果	28
2.3.2 近代的バイオマスからのエネルギーキャリアのロジスティクス及びサプライチェーン	29
2.3.2.1 固体バイオマスの供給及び利用のための市場開発	29
2.3.2.2 開発途上国における固体バイオマス及び木炭供給	30
2.3.2.3 木材ペレットのロジスティクス及び供給	31
2.3.3 電力、熱、液体及び気体燃料への変換技術	31
2.3.3.1 変換技術の開発段階	32
2.3.3.2 熱化学プロセス	32
2.3.3.3 化学プロセス	33
2.3.3.4 生化学プロセス	34
2.3.4 バイオエネルギーシステム・チェーン：既存の最先端システム	34
2.3.4.1 電力、コジェネレーション、及び熱のためのバイオエネルギー・チェーン	34
2.3.4.2 液体輸送燃料のバイオエネルギー・チェーン	35
2.3.5 合成	37
2.4 市場及び産業の発展の世界的及び地域的状況	44
2.4.1 現在のバイオエネルギー生産及び展望	44
2.4.2 伝統的バイオマス、改良された技術と手法、及び障壁	46
2.4.2.1 改良型のバイオマス調理ストーブ	46
2.4.2.2 バイオガス・システム	47
2.4.3 近代的バイオマス：大規模システム、改良された技術と手法、及び障壁	48
2.4.4 バイオマス及びバイオエネルギーの国際貿易	49
2.4.5 バイオマス及びバイオエネルギーの支援政策の概要	52
2.4.5.1 バイオエネルギー政策及び標準化に関する交流のための政府間プラットフォーム	53
2.4.5.2 持続性枠組み及び標準	53
2.4.6 バイオエネルギーの市場への浸透と国際貿易の主な機会及び障壁	54
2.4.6.1 機会	54
2.4.6.2 障壁	55

2.4.7 統合.....	56
2.5 環境的・社会的影響.....	57
2.5.1 環境的影響.....	58
2.5.2 近代的バイオマス: 土地利用変化の影響を除いた気候変動.....	59
2.5.3 近代的バイオエネルギー: 土地利用変化による影響などの気候変動.....	63
2.5.4 伝統的バイオマス: 気候変動の影響.....	69
2.5.5 温室効果ガス排出以外の環境的影響.....	70
2.5.5.1 大気質及び水資源への影響.....	70
2.5.5.2 生物多様性及び生息地の喪失.....	71
2.5.5.3 土壌資源における影響.....	71
2.5.6 環境衛生と安全性の示唆.....	72
2.5.6.1 原材料の課題.....	72
2.5.6.2 バイオ燃料生産の課題.....	72
2.5.7 社会経済的な側面.....	73
2.5.7.1 社会経済的な影響の研究とバイオエネルギー・システムの持続可能性の基準.....	73
2.5.7.2 小規模システムの社会経済的な影響.....	73
2.5.7.3 大規模なバイオエネルギー・システムの社会経済的な側面.....	74
2.5.7.4 食料安全保障のリスク.....	75
2.5.7.5 地方の開発と社会的発展への影響.....	76
2.5.7.6 社会的な側面と環境的な側面のトレードオフ.....	76
2.5.8 統合.....	77
2.6 技術改良とイノベーションの見通し.....	78
2.6.1 原材料の改良.....	78
2.6.1.1 収量の増加.....	78
2.6.1.2 水生バイオマス.....	80
2.6.2 バイオマスの物流とサプライチェーンの改善.....	81
2.6.3 近代的バイオマスから二次エネルギーキャリアへ転換する技術の向上.....	82
2.6.3.1 液体燃料.....	84
2.6.3.2 ガス化燃料.....	94
2.6.3.3 二酸化炭素回収・貯留とバイオマスの併用。大気からの温室効果ガスの長期的な除去.....	94
2.6.3.4 バイオリファイナリー.....	95
2.6.3.5 バイオベースの製品.....	95
2.6.4 統合.....	95
2.7 コストの傾向.....	96
2.7.1 決定要因.....	96
2.7.1.1 特定の商用システムに関する電力、熱、燃料の最近の均等化原価.....	98
2.7.2 バイオエネルギー・システムの技術的学習.....	101
2.7.3 コスト削減ポテンシャルの将来的なシナリオ.....	103
2.7.3.1 商用バイオエネルギー・システムの将来的なコスト傾向.....	103
2.7.3.2 商用前のバイオエネルギー・システムの将来のコスト傾向.....	105
2.7.4 統合.....	106
2.8 潜在的な普及段階.....	107
2.8.1 バイオエネルギーの現在の普及.....	107
2.8.2 短期的な予想.....	107
2.8.3 炭素緩和における長期的な普及.....	108
2.8.4 条件及び政策: バイオエネルギーの資源ポテンシャル、技術と経済、環境上の影響と社会的影響の統合.....	111
2.8.4.1 資源ポテンシャル.....	111
2.8.4.2 バイオエネルギー技術、サプライチェーン、及び経済性.....	114
2.8.4.3 社会的及び環境的影響.....	116
2.8.5 普及に関する結論: バイオエネルギーに関する重要な示唆.....	118
REFERENCES.....	121

**地図に関する免責条項:** 本技術要約の地図上に表示された国境と名称、及び使用された記号は、国連から公式に承認または承諾を得たものではない。SRREN用に作成された地図において、ジャンムー及びカシミールにある点線はインド及びパキスタンが合意したおおまかな停戦ラインを示す。ジャンムーとカシミールの最終的な状況に関しては、いまだ両国による合意に至っていない。

## 要約

バイオエネルギーは、持続的に開発可能な資源である点、効率的なバイオエネルギーシステムが使用される点を考えると、その温室効果ガス (GHG) の緩和ポテンシャルは大きい。一定の現在のシステムと鍵となる将来の選択肢 (多年生作物の栽培システム、バイオマス残渣や廃棄物の使用、新型の転換システムなど) では、化石エネルギーのベースラインに比べ、80~90%の排出削減が可能である。ただし、間接的土地利用変化 (d+iLUC) の影響に加え、炭素ストック (直接) のロスにつながる土地利用の転換と森林管理で、温室効果ガス緩和の正味の影響を低下させる可能性があり、一部のケースでは無効にする可能性もある。気温上昇、降雨パターンの変化、極端な出来事の発生頻度の増加による気候変動の影響は、バイオマス資源のポテンシャルに影響を与えたり相互に作用したりする。この相互作用は今もあまり理解されていないが、地域差が大きい可能性が高い。気候変動がバイオマス資源の生産に与える影響は存在するが、世界的な気温上昇が産業革命以前に比べて 2°C 以下の上昇に限定される場合、制約はほぼないだろう。バイオマス資源の生産と適応措置を組み合わせることで、バイオエネルギーと多年生の栽培システムには、より持続可能な機会が生じる。

バイオマスは、**食料、飼料、繊維が主要な源であり、再生可能エネルギー (RE) 資源として、2008 年に世界の一次エネルギー供給総量 (TPES) の約 10.2% (50.3EJ) を供給した。**主に開発途上国の貧困層が木材、藁、木炭、家畜ふん尿、その他の動物ふん尿などを調理、暖房、及び照明に、伝統的に使用している。この割合は約 30.7EJ で、インフォーマル部門による未計上の使用 (木炭の生産と分配など) がさらに 20~40%ある。電力、熱、コジェネレーション (CHP)、輸送燃料用のバイオマスによる一次エネルギー供給総量は、2005 年に 9.6EJ だったが、2008 年には 11.3EJ になった。近代的バイオエネルギーの割合は 2005 年の 20.6% に対し、22% だった。

専門家による利用可能な科学的文献のレビューでは、**バイオマス由来のエネルギーの潜在的な普及レベルは 2050 年までに 100~300EJ になり得る。**しかしながら、このポテンシャルには、市況、政策の条件といった大きな不確実性が伴う。また、食料や水、木製品やパルプ製品の生産改善率にも大きく左右される。

バイオマスエネルギーの技術ポテンシャルの上限は、**2050 年までに最大で 500EJ/年になるだろう。**技術ポテンシャルがかなりの割合に達すると、洗練された土地管理と水管理、大規模で世界的なプラントの生産性向上、土地の最適化やその他の措置が必要になる。このポテンシャルを実現するのはかなり難しいが、2050 年の世界の一次エネルギー供給に大きな貢献を果たし得る。ちなみに、食料、飼料、繊維のために世界で収穫されたバイオマス全量を熱換算すると、現在、約 219EJ/年になる。

第 10 章のシナリオレビューでは、**温室効果ガス安定化レベルは各シナリオで異なるが、バイオエネルギーの貢献は飛躍的に高まると予測出来る。**2050 年までに、中央値のケースでは、バイオエネルギーの貢献は世界の一次エネルギー供給総量の 120~155EJ/年になる。75 パーセント値のケースで 150~190EJ/年、最も高い普及の見込みを示すシナリオでは 265~300EJ/年にまで達する。この範囲は、IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES) で提示された地域規模の A2・B2、世界規模の A1・B1 の条件とストーリーラインにおおむね沿っている。土地利用の良好なガバナンスと森林、農業、家畜の管理を確実に改善する政策の枠組みと持続可能性が実施できれば、高いポテンシャル (B1) と低いポテンシャル (B2) 双方につながり得る。ただし、こうした政策の枠組みや実行メカニズムが導入されない場合や、他の (革新的な将来の) 部門とバイオ資材をめぐる激しい競争が生じた場合、バイオマス供給は 2050 年も 100EJ/年程度に限定されるだろう。こうした環境において、さらにバイオマスが拡大すると、食料供給、水資源、生物多様性と地域的な大きな摩擦につながりかねず、特に、間接的土地利用変化と炭素ストックのロスにより温室効果ガスの排出が増大しかねない。別の普及シナリオでは、バイオエネルギーが市場の代替エネルギーに比べ安価な選択肢である恵まれた世界各地で (ブラジルのサトウキビを原料としたエタノール生産)、バイオマス資源は、残渣や有機廃棄物、耕作限界地、荒廃地、利用しづらい土地で栽培されたエネルギー作物の使用を制約する場合がある。

バイオエネルギーには、**気候変動のフィードバック、バイオマス生産、土地利用など、複雑な社会的、環境的な相互作用がある。**バイオエネルギーが社会的、環境的課題に与える影響 (健康、貧困、生物多様性など) は、地域の状況、特定のプロジェクトの設計と実施によって、プラスにもマイナスにもなる。バイオエネルギー、特にバイオ燃料の政策的な背景は、近年、急速かつ劇的に変化している。食料対燃料の議論、他の紛争に関する懸念の高まりが、持続可能性の基準と枠組みを開発実行する強い推進力となっている。多くの紛争は、発生が避けられない場合、地方開発を進め貧困緩和と安定的なエネルギー供給に貢献する土地利用の良好なガバナンスとしての、天然資源、農業・家畜部門の管理において、相乗効果を推進することで緩和可能である。

コストは、**地域、バイオマスの種類、バイオマスの転換プロセス用の供給コスト、バイオエネルギー年間生産規模と年間生産時間によって異なる。**商用バイオエネルギーの均等化コストの推定例は、液体バイオ燃料とガスバイオ燃料の場合は約 2~48US ドル (2005 年) /GJ、約 2MW を超える電力またはコジェネレーションシステムの場合は約 3.5~25US セント/kWh (10~50US ドル (2005 年) /GJ) である。バイオマス資源のコストは 3US ドル (2005 年) /GJ、蒸気の熱は 5US ドル (2005 年) /GJ、温水は 12US ドル (2005 年) /GJ、国内または地域の暖房システムは

2~77US ドル (2005 年) /GJ で、そのバイオマス資源のコスト (固体廃棄物またはペレット) は 0~20US ドル (2005 年) /GJ である。これらの計算は 2005~2008 年のデータを参照し、US ドル (2005 年) 建て、割引率 7% である。

近年行われたリグノセルロース系バイオ燃料の分析では、二酸化炭素緩和により何も収益がないと想定する場合に、原油価格 60~70US ドル (2005 年) /バレル (0.38~0.44US ドル (2005 年) ) で競合を可能にする改良の可能性が示されている。シナリオ分析では、短期の研究開発 (R&D) と市場の支援があれば、石油価格と炭素価格にもよるが、2020 年頃の商用化が可能であろうとしている。エタノールとバイオディーゼルに加え、多岐にわたる炭化水素や現在の石油系化学物質・資材と類似したものであれば、バイオ燃料は自動車だけでなく、航空、海運にも使用し得る。バイオマスは、エネルギー密度の高い液体燃料を現在提供出来る唯一の再生可能エネルギー源である。また、多様なバイオ系製品をバイオリファイナリーで生産し、転換プロセス全体の経済性を強化出来る。相乗効果をもたらせる短期的な選択肢としては (一部のものはずでに競争力を有する)、混焼、コジェネレーション、熱利用、サトウキビ系エタノール、バイオ電力の共同生産などである。活動するバイオ市場の発展とバイオエネルギーの国際取引がこれらの相乗効果の達成を支える可能性がある。

発電技術、バイオマス供給システム、多年生作物の栽培システムの向上が進めば、バイオエネルギーのコスト低下が実現出来る。多くのバイオマス技術で、他の再生可能エネルギー技術に匹敵する学習率で、技術の学習と関連するコスト削減が発生する。これは栽培システムで実例があり、一年生作物の農業管理、供給システム、物流、エネルギーキャリアを生産する転換技術 (熱、電力、サトウキビまたはトウモロコシ系のエタノールなど) に向上が見られる。また、バイオガスでも大幅なコスト削減が実証されている。

バイオマス転換と二酸化炭素回収・貯蔵 (CCS) の発展を組み合わせることで、温室効果ガスを大気中から長期的にかなり吸収し得る (これは負の排出とも言う)。新型のバイオマテリアルは、経済的な観点からも温室効果ガス削減の観点からも有望であるが、その緩和ポテンシャルの相対的規模はあまり理解されていない。水生植物 (藻類) の潜在的な役割はかなり不確かであるが、土地利用をめぐる争いを緩和し得る。これらの選択肢については、さらなる経験、研究開発及び実証 (RD&D)、詳細な分析が必要である。

バイオエネルギーシステムの複数の駆動要因と持続可能な方向でのその発展が、明らかになりつつある。この例として、急速に変化する政策の背景、近年の市場をベースとした活動、新型バイオリファイナリーとリグノセルロース系バイオ燃料への支援拡大、特に持続可能性の基準と枠組みの発展が挙げられる。バイオマス生産と転換における主要技術の継続的なコスト低下、供給インフラの開発、統合システムの調査が、持続可能な土地利用と水使用の促進、市民や政治の受容につながる可能性がある。

## 2.1 序論

バイオエネルギーは、食料、飼料、繊維の生産、及び林産物の世界的なバイオマス生産システムに加え、廃棄物・残渣管理に複雑な形で組み込まれている。バイオエネルギーは、様々な部門の用途に対し、様々な技術を組み合わせて用いられる。

### 2.1.1 バイオマスとバイオマス使用に見られる現在のパターンと傾向

2008 年、バイオマスは世界の一次エネルギー年間供給総量の 10.2% (50.3EJ/年) を占めた。社会の非常に広範な部門から幅広いバイオマス資源が供給され (表 2.1 参照; IEA, 2010a)、エネルギーに使用されるバイオマス資源を図 2.1 (a) に示す。その 80% 以上は木材 (木、枝、残渣) や低木であり、その他のバイオマス資源は農業部門 (エネルギー作物、残渣、副産物)、様々な商業廃棄物、使用済み廃棄物、副生成物の流れ (バイオマス製品のリサイクル・加工、一般廃棄物 (MSW) の有機性の生物由来の部分) である。

<sup>1</sup> 本章で使用される一般廃棄物 (MSW) は、EUROSTAT が定義する都市廃棄物と同一の意味を有する。

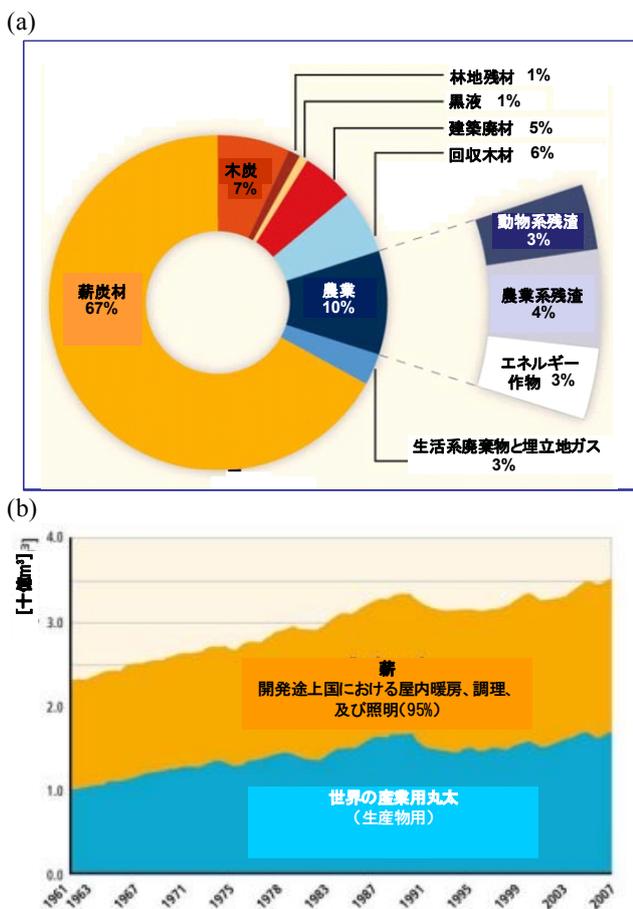


図 2.1: (a) 世界のエネルギー用の一次バイオマス資源 (IPCC, 2007a,d; IEA Bioenergy, 2009)、及び (b) 世界の産業用丸太<sup>2</sup>の生産水準に平行している開発途上国で使用される薪の割合 (UNECE/FAO Timber Database, 2011)。

バイオマスは、様々な部門で様々なエネルギー効率化に使用される (表 2.1 参照)。

- ・ 材、藁、家畜ふん尿、その他の動物ふん尿などの低効率な伝統的バイオマス<sup>3</sup>は、主に開発途上国における貧困層によって調理、照明、及び暖房に使用されている。このバイオマスの大部分は燃焼されるため、健康・生活状態に重大な悪影響を及ぼす。農村地域では、木炭が二次エネルギーキャリアになりつつある。伝統的バイオマスの使用規模の指標として、図 TS.2.1 (b) は、伝統的バイオマスからの世界的な一次エネルギー供給が世界の産業用木材生産と平行していることを示している。

国際エネルギー機関 (IEA) の World Energy Statistics (IEA, 2010a) と World Energy Outlook (WEO: IEA, 2010b) では、国家的データベースに基づく伝統的バイオマスの一次エネルギー供給総量は 30.7EJ/年であるが、これらのデータベースは系統的に薪の消費量を低く見積もる傾向がある。森林とエネルギーの国際的データ (FAO, 2005) が政策分析の主な参照源であるが、エネルギーのバイオマス消費の推定値となると、逆に高く見積もるケースが多い。これは、固体バイオマス燃料は非公式<sup>4</sup>に生産、取引される場合が多いためである。表 2.1 に示した世界の一次エネルギー供給総量の 20~40%の補足は、20か国以上で行われた、詳細かつマルチスケールで、空間的に明白な (spatially explicit) 分析に基づく (たとえば Masera et al., 2005, 2006; Drigo et al., 2007, 2009 など)。伝統的バイオマスについてはこの後、バイオマス資源の物流と供給 (2.3.2.2 節)、改良型の技術、慣行、障壁 (2.4.2.1 及び 2.4.2.2 節)、気候変動の影響 (2.5.4 節)、社会経済的な側面 (2.5.7 節) を論じた各節で取り上げ

<sup>2</sup> 丸太生産物とは、林産物産業の挽材と化粧板用丸太、及び紙、新聞印刷用紙、クラフト紙に使用されるパルプ材の生産に使用される木材チップのことである。2009年には、経済の後退を反映して、32.5 (合計)・12.5 (産業用) 億 m<sup>3</sup> 減少している。データは、Global Forest Resources and Market Developments のプレゼンテーションから取得可能である。 [timber.unece.org/fileadmin/DAM/other/GlobalResMkts300311.pdf](http://timber.unece.org/fileadmin/DAM/other/GlobalResMkts300311.pdf)

<sup>3</sup> 伝統的バイオマスは、開発途上国の住宅部門におけるバイオマスの消費と定義され、ほとんどの場合調理及び暖房目的の木材、木炭、農業残渣、及び動物のふん尿の持続不可能な使用のことを指している (IEA, 2010b 及び Annex I)。その他のバイオマスの使用はすべて近代的バイオマスと定義される。本報告書ではさらに、効率性の異なる高効率な近代的バイオエネルギーと産業用バイオエネルギーの利用を区別している (Annex I)。バイオマスの使用の再生可能性及び持続可能性は主に、2.5.4 及び 2.5.5 節でそれぞれ検討している (1.2.1 節及び Annex I も参照のこと)。

<sup>4</sup> インフォーマル部門・経済の定義については、Annex I の用語集を参照

る。

- ・ 高効率な近代的バイオエネルギーの場合、様々な部門において熱、電力、コジェネレーション (CHP)、及び輸送燃料のための二次エネルギーキャリアとして便利な固体、液体、及びガスが使用されている (図 2.2)。加工産業の多くの事業体、自治体、地区、協同組合がこれらのエネルギー製品を製造しているが、その目的は、自己使用の場合もあれば、増加する国際取引を背景とした国家的、国際的な市場への売却の場合もある。エタノールやバイオディーゼルなどの液体バイオ燃料は、世界的に陸上輸送及びいくつかの産業用途で使用される。農業残渣の嫌気性消化及び一般廃棄物処理によるバイオマス由来ガス (主にメタン) は、発電や熱、またはその両方に使用される。しかしながら、これらのエネルギーのサービスへの最も重要な貢献は、チップ、ペレット、回収された使用済み木材など固体物に基づく。暖房には、地域暖房システムなどにおける暖房・温水暖房が含まれる。近代的バイオエネルギーへの一次バイオマス供給総量 (推定) は 11.3EJ/年で、最終用途消費者に配給される二次エネルギーは約 6.6EJ/年である (IEA, 2010a,b)。短期輪作型の樹木 (ポプラやヤナギ)、草本植物 (ススキ属 やスイッチグラス) などの近代的バイオエネルギー源は、2.3.1 と 2.6.1 節で論じる。近代的バイオマスの場合、その議論の対象として、バイオマスの物流とサプライチェーン (2.3.2 及び 2.6.2 節)、既存技術 (2.3.3 節) または開発中の技術 (2.6.3 節) を通じた二次エネルギーキャリアまたはエネルギーへのバイオマスの転換、バイオエネルギーやサプライチェーンへの統合 (2.3.4 節)、市場と産業の発展 (2.4 節) などがある。
- ・ エネルギー効率の高いバイオマス転換は一般に産業部門で行われる。年間消費量は約 7.7EJ/年以下で、紙パルプ、林産物、食品、化学薬品といった部門が関連する。繊維製品 (紙など)、エネルギー、木製品、鉄鋼製造用の木炭などが、その例として挙げられる。産業部門の熱生産は主に、産業プロセス用の蒸気発生であり、これは発電と連動することが多い。産業部門によるバイオマスの最終消費は、明確に割り当てることが出来ないため、表 2.1 には示されていない。バイオマス産業部門について論じた 8.3.4 節も参照。

**表 2.1:** IEA (2010 a,b) に従う 2008 年における伝統的及び優良な近代的バイオマス・エネルギー・フローの例。Maserata et al., 2005, 2006; Drigo et al., 2007, 2009) による補足あり。

種類	概算の一次エネルギー (EJ/年)	概算の平均効率 (%)	概算の二次エネルギー (EJ/年)
<b>伝統的バイオマス</b>			
IEA のエネルギー・バランス統計における計上	30.7	10-20	3-6
インフォーマル部門の推定 (木炭など) [2.1]	6-12		0.6-2.4
<b>伝統的バイオマスの合計</b>	<b>37-43</b>		<b>3.6-8.4</b>
<b>近代的バイオエネルギー</b>			
バイオマス、一般廃棄物、バイオガスからの電力及び熱電供給	4.0	32	1.3
固体バイオマス及びバイオガスからの住宅用・公的・商業用建築物における熱供給	4.2	80	3.4
陸上輸送燃料 (エタノール及びバイオディーゼル)	3.1	60	1.9
<b>近代的バイオエネルギーの合計</b>	<b>11.3</b>	<b>58</b>	<b>6.6</b>

注:

IEA (2010 a,b) によると、2008 年におけるバイオマスによる一次エネルギー供給総量 (50.3EJ) の供給源は主に、固体バイオマス (46.9EJ)、熱及びコジェネレーションに使用される生物由来の一般廃棄物 (0.58EJ)、発電、コジェネレーション、熱に使用されるバイオガス (二次エネルギー) (発電とコジェネレーション 0.41EJ、熱 0.33EJ) である。輸送部門で使用されるエタノール、バイオディーゼル、他のバイオ燃料 (エーテルなど) の貢献量は、二次エネルギー換算値で 1.9EJ だった。特定の流量の例としては、バイオマスの生産量電力が 0.82EJ (パルプ・紙産業の余剰分を含むバイオマス発電所、バイオガス、一般廃棄物)、コジェネレーションからの生産量電力が 0.44EJ だった。近代的な住宅部門の熱消費は、住宅部門の熱総消費量 (33.7EJ) から IEA のバイオマスの伝統的使用の推定値 (30.7EJ) を差し引き、算出した。

表の数字の一部は、IEA の世界的なエネルギー統計から直接引用した。二次バイオ燃料の 1.9EJ (生産した一次エネルギーは、想定効率 60% に基づくため、低めな可能性がある)、全バイオマス資源を対象とした生産電力及び熱の 1.3EJ などが、これに該当する。一般廃棄物の一次インプット、バイオガス (二次) とこれに対応する生産量が利用可能だったため、効率が計算されている。固体バイオマスの一次インプットは、一般廃棄物の平均効率に基づき計算された。上記に含まれない数字は、熱 (0.88EJ、伝統的に大半を占める)、鉄鋼業 (0.22EJ、大半はブラジル) で木炭製造に使用される固体バイオマス (3.4EJ) などである。木炭製造用の熱量は図 1.18 に示され、電力用のバイオマス由来の 5.2EJ に含まれる。表 2.1 に含まれていないのは、7.7EJ を消費する産業部門だが、パルプ・紙産業の発電は含まれている。

国によって状況は大きく異なるが、過去 40 年、バイオエネルギー使用は絶対的には、世界で確実に増加している。2006 年は、中国が世界各国を牽引し、9EJ のバイオマスをエネルギーに使用し、インド (6EJ)、アメリカ (2.3EJ)、ブラジル (2EJ) が続いた (GBEP, 2008)。バイオエネルギーは、一次エネルギー供給総量に占める割合は比較的小さいが、最大の先進国 (G8 諸国: アメリカ、カナダ、ドイツ、フランス、日本、イタリア、イギリス、ロシア) で割合が増加している (2006 年で 1~4%)。発電における固体バイオマス使用は、パルプ・紙プラントや砂糖精製工場で特に重要である。エネルギー全消費量に占めるバイオエネルギーの割合は、G8 諸国で概して増加しており、特にドイツ、イタリア、イギリスで、近代的バイオマスの形態の使用 (発電用の混焼、ペレット暖房) を通じた増加が示される (図 2.8; GBEP, 2008)。

対照的に、最大の開発途上国 (中国、インド、メキシコ、ブラジル、南アフリカ) では 2006 年、一次エネルギー供給総量の 5~27% が主に伝統的バイオマスの使用により供給され、最貧国では 80% を超えた。インド、中国、メキシコでは、主に、大都市内で伝統的バイオマスが灯油、液化石油ガスで代替されたことにより、バイオエネルギーの割合は減少しつつある。しかしながら、絶対的な消費量は引き続き増加している。大半のアフリカ諸国でもこの傾向が見られる。これらの国々では、薪や、特に急成長中の都市部で木炭使用が徐々に増加していることから、需要が高まっている (GBEP, 2008)。

バイオエネルギーの技術的見地から環境的、社会的側面に視点を転じ、本章の文献評価では、バイオエネルギーの正負の両側面を明らかにする。バイオエネルギーは持続可能な生産、維持を行えば、生物圏 (荒廃地など) の炭素ストック増加、持続可能不可能な森林使用による炭素排出の削減、熱、発電、近代的燃料生産における化石燃料システムの代替を通じ、気候変動の緩和に大きな貢献を果たせる。さらに、バイオエネルギーは、地域の経済発展の機会を創出するだろう (9.3.1 及び 2.5.4 節)。新型のバイオエネルギーシステムと最終消費技術も、伝統的なたき火やキルンのバイオマス燃焼に関連するブラックカーボンやその他の短寿命な温室効果ガス (メタン、一酸化炭素 (CO) など) の大幅な削減を実現し得る。バイオエネルギーシステムの設計や実施が不適切な場合、その大規模な普及が気候や持続可能性にとって負の結果をもたらす可能性が高い。とりわけ、表面アルベド変化や、土壌や植物由来の炭素排出につながり得る直接・間接的土地利用変化 (d+iLUC) の誘導、生物多様性の低下、土地保有の観点における地域の人口への負の影響、食料安全保障の後退で、負の結果が生じる可能性が高い。

バイオマスの資源ポテンシャルに関する文献は 2.2 節で対象にする。同節では、様々な世界的なモデリング研究と評価に影響を与える要因を論じる。また、国や特定の地域の資源アセスメントの例も提示し、これらの資源のコスト的な面を説明する。図 2.2 の技術ポートフォリオ全体には、近代的バイオマスの商用エネルギーキャリアと開発段階のエネルギーキャリアが含まれる。商用可能なエネルギー製品と (転換) 技術については 2.3 節で論じる。これらは、砂糖作物 (多年生のサトウキビやビート)、でんぷん作物 (トウモロコシ、小麦、キャッサバなど)、油糧作物 (ダイズ、セイヨウアブラナ) をバイオマス資源とし、食料、飼料加工からバイオエネルギー生産に拡大している。バイオエネルギー生産は現在、林産物の残渣、従来から熱と電力を自力生産しているパルプ業、乾燥・湿潤した都市廃棄物、下水汚泥、多様な部門から排出される有機性汚泥で、倍増している。これらの廃棄物と残渣が未処理のままになると、メタン排出により気候に大きな影響を与える恐れがある。バイオエネルギー市場は、バイオエネルギーの国際取引と持続可能性の枠組みの成長を背景に、伝統的・近代的な形態とも 2.4 節で論じる。バイオマス生産やエネルギー製品への転換を行う新型の技術については、2.6 節で取り上げる。

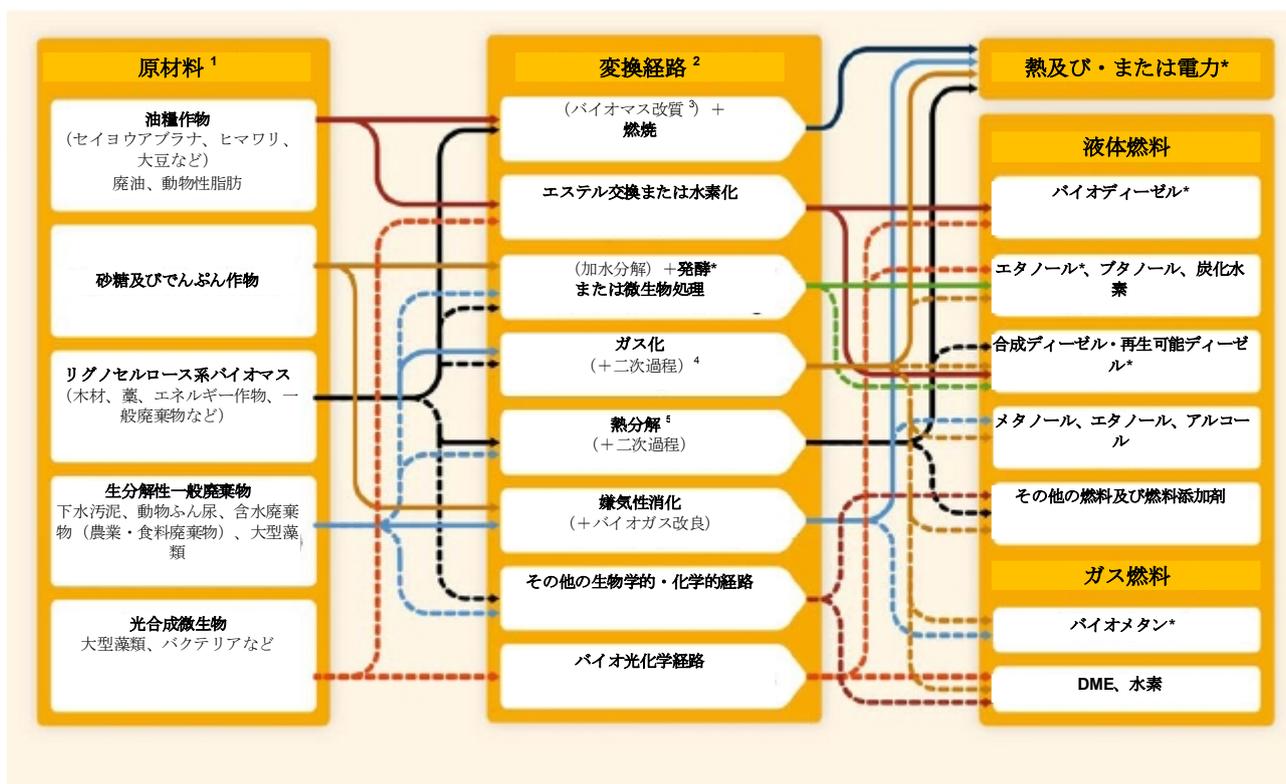


図 2.2: バイオマス原材料から、熱、電力、コジェネレーション、及び液体・ガス燃料への熱化学的・化学的・生物学的変換経路による商業用（実線、図 2.6 参照）及び発展途上（点線）のバイオエネルギー経路の種類を示した概略図。商業化された製品には星印を付けている。

注:

<sup>1</sup>各原材料の一部は他の経路でも使用可能である。<sup>2</sup>各経路は副産物も発生させる。<sup>3</sup>バイオマスの品質向上には、高密度化変換（ペレット化、熱分解、乾燥など）が含まれる。<sup>4</sup>バイオメタン、特に天然ガスの主要な成分であるメタンに品質向上出来る様々なガスへの嫌気性消化。<sup>5</sup>水熱、液化などのその他の熱変換経路の可能性はある。DME＝ジメチルエーテル。

2.5 節では、バイオエネルギーが気候変動に与える影響に着目しながら、バイオマス使用による環境及び社会への影響を取り上げる。温室効果ガスの影響とバイオエネルギー・チェーンは複雑なため、土地利用変化がある場合とない場合の影響を個別に分析する。これらの影響は、マイクロ、メソ、マクロの各スケールにまたがり、とりわけ特定の地域における土地被覆の転換と水利用可能性に左右される。直接的土地利用変化の影響は、耕作使用やバイオエネルギー専用の作物栽培の変化により、局所的に生ずる。間接的土地利用変化は、一次生産が拡大する地域の外で市場を介して土地管理活動（直接的土地利用変化）がシフトする結果、生ずる。これらはいずれも 2.5 節で説明される。近代的・伝統的バイオマス使用による社会的影響は、バイオエネルギーが食料生産や持続可能性に与える影響といった重要な課題に関連し、2.5.7 節で扱われる（9.3 及び 9.4 節も参照）。

高いレベルのバイオエネルギー生産の実現と環境及び社会への影響の最小化を両立させるためには、様々なリグノセルロース系バイオマスや、電力、熱、ガス化燃料、液体燃料の転換経路のポートフォリオを開発し、エネルギーの既存・将来のニーズを満たす必要がある（図 2.2）。技術の改良、イノベーション、統合が見込まれるなか、バイオマス由来の主要な中間製品（conversion intermediate）は、様々な製品（バイオ燃料、電力、プロセス熱、2.6 節で論じた他の製品など）を製造可能なバイオ燃料転換施設で改良出来る。この中間製品は、砂糖、合成ガス、熱分解油（または他の熱処理によるオイル）、バイオガス、植物油（脂質）などから生じる。2.7 節では、既存の商用技術のコストとそのコスト傾向について、過去 25 年に特定の国々の様々なバイオエネルギーで得られた技術的学習（technological learning）に注目して論じていく。最後の 2.8 節では、バイオマスエネルギーの普及ポテンシャルについて説明する。また、同節では、環境、社会への影響の論点について触れた 2.2 節のバイオマス資源の評価と、第 10 章のシナリオ文献レビューで示された普及レベルを比較している。バイオマスとその多様なエネルギー製品（食料、飼料、繊維、林産物）の役割は、IPCC のシナリオ・ストーリーライン（IPCC, 2000a,d）を通じて検討された結果、持続可能な開発と気候変動緩和の道筋を考慮した場合、しない場合のいずれも大幅な普及レベルに達することが分かっている。気候変動緩和と持続可能な開発に関しては、戦略の有無に関係なく、普及水準は高くも低くもなる可能性がある。バイオエネルギー技術の発展と統合的なシステムへの洞察の多くは、これらの概要から収集可能であり、気候変動を緩和しつつバイオエネルギーを持続的にさらに発展させるうえで、有益である。

## 2.1.2 気候変動評価に関する過去の国際間パネル

バイオエネルギーは、IPCCの過去の報告では詳細に検討されていない。直近の報告書である第4次評価報告書(AR4)では、バイオエネルギーによる温室効果ガス緩和は7つの章で分析されているが、分散的に取り上げられたために、バイオマス資源とその緩和ポテンシャル、課題、機会を統合的かつ包括的に捉えることが難しい。第4次評価報告書の主要な結論(IPCC, 2007b,d)は、以下のとおりである。

- **バイオマスエネルギーの需要。**輸送燃料生産に関するバイオマスの基本的要件は、その大部分がWEO(IEA, 2006)の世界的な予測に基づく。2030年におけるその範囲は、一次バイオマスが約14~40EJ/年、バイオ燃料が8~25EJ/年と、比較的幅広い。しかし、2030年の一次バイオマス(約30~50EJ/年のバイオ燃料)の需要予測のなかには、45~85EJ/年という高い数字も含まれていた。ちなみに、第10章のシナリオレビューでは、温室効果ガス緩和シナリオの2つのカテゴリが分析され、バイオ燃料の生産はそれぞれ、2030年に0~14EJ/年、2050年に2~50EJ/年、その中央値はそれぞれ5~12EJ/年、18~20EJ/年である。バイオマスによる熱と発電への需要は、二酸化炭素回収・貯留、原子力、風力エネルギー、太陽熱など競合技術の使用可能性と導入に強く影響されることが示された。AR4のデータによると、2030年のバイオマス需要の見込みは約28~43EJ/年である。これらの推定値は発電に重点を置いている。AR4の基礎をなすWEO(IEA, 2006)では、熱は明示的にモデル化されていないか、推定されていない。このため、バイオマスの総需要は低く推定されている。

産業における将来の潜在的なバイオマス需要(特にバイオケミカルなどの新規使用、鉄鋼生産における木炭の使用拡大)や建築環境(暖房、建築資材としてのバイオマス使用の増加)が重要とされたが、中・長期におけるバイオマスの潜在的な需要に量的な推定は含まれていなかった。

- **バイオマス源のポテンシャル(供給)。**AR4によると、農業の効率改善が森林や自然地域への負荷を増やさずに食料需要の伸びを上回ると想定する場合、技術ポテンシャルに最大の貢献を果たすと考えられるのは、耕地のエネルギー作物だろう。2050年の範囲は20~400EJ/年で、最適の推測は250EJ/年である。バイオマス生産に荒廃地を使用すれば(たとえば森林再生の枠組みで8~110EJ/年)、大きな貢献が見込まれる。バイオマス生産がこのように低迷しているのは、バイオマス供給が割高であることもあるが、食料生産との競合がほぼないこと、土壌再生(及び炭素貯蔵)、水保持力の向上、(さらなる)腐食防止といった様々な相乗便益も定着コストの一部を相殺するだろう。バイオマス生産の枠組みについては、耕作限界地でのジャトロファ作物(油糧種子)の定着化が現在の事例として挙げられる。

技術ポテンシャルは、森林残渣が12~74EJ/年、農業残渣が15~70EJ/年、廃棄物残渣が13EJ/年である。これらのバイオマス資源のカテゴリは、その大部分が2030年前に使用可能であるが、部分的に不確かな面もある。この不確実性の原因は、競合使用の可能性(森林残渣を用いた繊維板製造バイオ材料の使用拡大、飼料や肥料としての農業残渣使用など)、森林管理と農業集約度関連で導入される持続可能性の基準に関して様々な想定が存在することにある。廃棄物、埋立地ガス、消化ガスに由来するバイオガス燃料の技術ポテンシャルは非常に小さい。

- **炭素緩和ポテンシャル。**バイオマス発電の緩和ポテンシャルは2030年に1,220Mt CO<sub>2</sub>eqに達する。そのかなりの部分がコストで19.5USドル(2005年)/tCO<sub>2</sub>を下回る。トップダウン型の評価によると、農業が供給するバイオマスエネルギーの経済的な緩和ポテンシャルは、70~1,260Mt CO<sub>2</sub>eq/年の場合はコストが最大で19.5USドル(2005年)/tCO<sub>2</sub>、560~2,320Mt CO<sub>2</sub>eq/年の場合はコストが最大で48.5USドル(2005年)/tCO<sub>2</sub>eqと推測される。森林部門が供給するバイオマスエネルギーの場合、2030年までに緩和ポテンシャルは全体で400Mt CO<sub>2</sub>/年に達すると推測される。

## 2.2 資源ポテンシャル

### 2.2.1 はじめに

バイオエネルギー生産は、食料、飼料、及び繊維の生産に加え、従来型の林産物とも複雑に影響し合っている。バイオエネルギー需要は、以前は産業廃棄物と考えられていたバイオマス・フローの新たな市場を作り出し、農業及び林業における従来型の植物生産に便益となっている。また、それによって、全体的な資源管理を改善するための新しい種類の作物栽培、食料及び林産物生産とのバイオエネルギー生産の統合の機会も生まれる。しかし、エネルギー生産用のバイオマスは、土地、水、及びその他の生産要素の競合を強め、資源の乱開発及び劣化につながる可能性がある。たとえば、土地からの過剰なバイオマスの産出は土壌劣化につながり、エネルギー植林地への引水は下流と地域の生態学的機能及び経済サービスに影響する可能性がある。

そのため、バイオマス資源ポテンシャルの規模は、土地から得られるバイオエネルギー生産物とその他の生産物(特に食料、飼料、繊維、及び丸太や紙などの従来型の林産物)に対する優先度及び農業と林業に利用可能な総バイオ

マス量に依存している。そして、これは自然条件（気候、土壌、地形）、農業及び林業活動、自然保護と土壌、水、及び生物多様性の保護に対する社会の理解と優先度の付け方、及びこれらの優先度を反映するための生産システムの形成方法に依存している（図 2.3）。

本節では、長期的バイオマス資源ポテンシャル、及びそれが地球の生物物理学的資源（究極的には正味の一次生産量: NPP）と土壌の質の維持及び改善や生物多様性保護などの非産出的需要を含む競合需要から生じるエネルギー利用の制限を考慮した上でどのように推定されてきたかについて焦点を当てている。さらに、バイオマス資源ポテンシャル評価のアプローチ（及び選ばれた研究の結果）を、主要な決定要因の説明とともに提示している。これらの要因は、その利用の制約を含め明確に扱われている。本節は、不確実性を含むバイオマス資源の評価についての結論をまとめて締めくくっている。

### 2.2.1.1 方法論評価

バイオマス資源ポテンシャルを定量化する研究によって、様々な方法で資源基盤が評価されてきた。それらは、自然条件の影響（及びそれが将来的にどのように変化するか）に加え、社会経済問題、農業と林業の性質と発展、自然保護と土壌、水、生物多様性の保護などの重要な追加要因の種類及び詳細の考慮の度合いによって異なっている（Berndes et al., 2003）。様々な資源ポテンシャルが評価されているが、以下のものが一般的に参照されている（Annex I の用語集を参照）。

- ・ 理論的ポテンシャルは、生物物理学的条件によってのみ限定されるバイオマス供給を指す（本小節の以下の解説を参照）。
- ・ 技術的ポテンシャルでは、利用が想定されるバイオマス生産活動の限定に加え、食料、飼料、繊維、林産物、及び人的インフラの地域要求量の同時に生じる需要が考慮される。自然保護と土壌、水、及び生物多様性の保護に関連した制限も考慮することが出来る。その場合、持続可能ポテンシャル という用語が使用される場合がある（2.2.2 節を参照）。
- ・ 市場ポテンシャルは、生産における経済的利益水準の指定された要件の下で生産可能な技術的ポテンシャルの一部を指す。これは、生産のコストのみでなく、バイオマス変換技術の特徴、競合するエネルギー技術の価格、支配的な政策体制などの幅広い要因によって決定されているバイオマス原料の価格にも依存している（2.2.3 節を参照）。

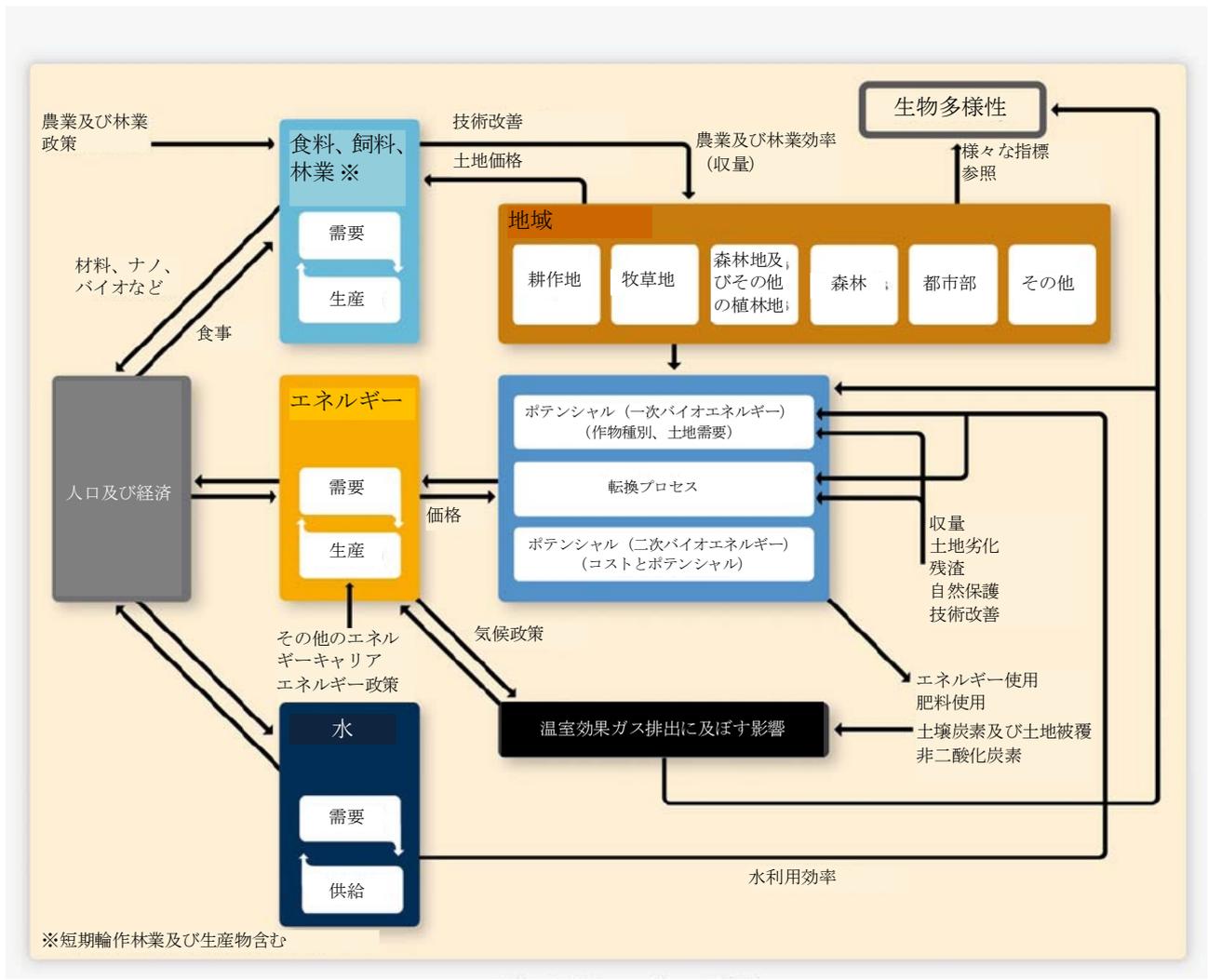


図 2.3: バイオマス資源ポテンシャルの評価に関連する主要な関係の概要 (Dornburg et al., 2010 のものを修正)。間接的な土地利用及び社会的問題は示されていない。英国王立科学協会の許可により複製。

3 つの主要な分類は、バイオマス資源ポテンシャルの評価において (多かれ少なかれ包括的に) 考慮されている (2.3.1.1 節も参照)。

- ・ 穀物のわらや伐採残渣など、農業及び林業における従来型の食料及び繊維生産からの一次残渣
- ・ 有機食料副産物、林業副産物、小売廃棄物、及び消費財廃棄物の形での二次及び三次残渣
- ・ 従来型の食料作物、飼料作物、工芸作物、余剰丸太林産物、及び新しい農作物、林業植物、または水生植物を含む、エネルギー供給のために生産される植物

資源ポテンシャル評価が食料及び森林部門における残渣フローの利用可能性を定量化していることを考えれば、これらの部門の発展の定義はその結果において最も重要である。以下で述べるように、基本的に様々な環境及び社会経済要因を考慮することによって、評価される資源ポテンシャルは低い水準に下がる。

本節で考慮されるバイオマス資源ポテンシャルの評価のほとんどは、食料及び丸太、紙などの従来型の林産物の世界的需要が優先的に満たされるという条件下で、バイオマス資源ポテンシャルの定量化を目的として提供される「食料及び繊維第一原理」を使用した技術的及び市場ポテンシャルの亜型である (WBGU, 2009; Smeets and Faaij, 2007 などを参照)。

そのような原則を出発点とする研究は、一定水準のバイオマスが食料または繊維の生産と競合せずにエネルギー目的で供給可能であるという保証を与えるものとして理解するべきではない。それらは、世界または地域における特定の開発を考えた上で、食料及び繊維需要を満たすために必要とされない資源の使用に基づき、将来の特定の年次においてどの程度のバイオエネルギーが生産可能であるかを定量化するものである。しかし、それらにおいて、そのような生産の将来的水準へ向けたバイオエネルギーの拡大がどのように食料及び繊維生産と関係するか (または

関係すべきか) は分析されていない。

総合的なエネルギー・産業・土地利用被覆モデルを使用した研究 (Leemans et al., 1996; Strengers et al., 2004; Johansson and Azar, 2007; van Vuuren et al., 2007; Fischer et al., 2009; Lotze-Campben, 2009; Melillo et al., 2009; Wise et al., 2009; 図 2.4 などを参照) は、バイオエネルギー部門の拡大と土地利用及び生活圏の炭素ストックの管理を含む社会における部門間の相互的な影響の与え方について洞察を提供することが出来る。部門に焦点を当てた研究は、その他のバイオマス利用との相互作用に関するより詳細な情報を含んでいる可能性がある。範囲の制限 (一部のバイオ燃料・土地の利用や領域しか含まれていない) または十分に詳細な経験データの不足によって、特に前向きな研究の場合、結果の信頼性が限定される可能性がある。これは、2.5 及び 2.8 節でもさらに解説している。

世界規模の農業の理論的ポテンシャルを想定して持続可能な生物圏の保護を完全に考慮しながら、より高い水準の地上バイオマス植林地の生産性を考慮し、Smeets et al. (2007) による世界モデリング研究では、1,548EJ/年のエネルギーに相当するバイオマスの最大世界ポテンシャルが導き出された<sup>5</sup>。本章では、この数値を理論的ポテンシャルの推定値と考えている。

### 2.2.1.2 バイオマスの正味の総地上一次生産量

バイオマスの技術的ポテンシャルの初めの質的理解は、地球表面の正味の総年間地上一次生産量 (NPP: 植生によって一定期間内に吸収される正味の炭素量) を検討することで得ることが出来る。これは、平均炭素含有量を 50%、平均発熱量を 18GJ/t と想定すると、約 35Gt (炭素) または 1,260EJ/年であると推定されている (Haberl et al., 2007)。これは、現在の世界の一次エネルギー供給である約 500EJ/年 (IEA, 2010a) と比較することが出来る。この比較では正味の総地球地上一次生産量は、社会のエネルギー需要を満たすために必要な量よりも大きいことを示しているが、増減の規模は約 3 倍に過ぎない。主な将来の一次エネルギー源としてバイオエネルギーを確立するには、世界の正味の陸域一次生産量のかなりの部分が (生態系の栄養連鎖からの正味の一次生産量を除き) バイオエネルギーの原料を供給する生産システム内で発生することが必要となる。さらに、食料、飼料、繊維、林産物、バイオエネルギー用に管理されている土地における施肥、灌漑、及びその他のインプットによって、正味の総陸地一次生産量を増加させなければならない可能性がある。

### 2.2.1.3 人間が取得する正味の陸域一次生産量

農業及び林業におけるバイオマス生産との比較によって、現在収穫されているものに関しては潜在的なバイオエネルギー供給に関する見通しを得ることが出来る。現在の世界の産業用丸太生産量は 15~20EJ/年に相当し、世界の主要作物 (穀物、油糧作物、糖作物、根、塊茎、及び豆類) の収穫量は約 60EJ/年に相当する (FAOSTAT, 2011)。この比較からすぐに得られる結論は、将来のエネルギー供給に大きく寄与するために、十分な規模のバイオエネルギー部門に原料を供給する必要があることから、農業及び林業によるバイオマス産出が大幅に増加するであろうということである。

人間によるバイオマスの使用すべてにわたる全体的な人間が取得する正味の陸域一次生産量 (HANPP (収穫と逆流を含む人間の活動によって得られる、及び失われるすべての正味の一次生産量が考慮されている)) を推定した研究は、社会はすでに世界の正味の陸域一次生産量のうち大きな割合を取得していることを示唆している。これによって、見込まれている将来的なバイオエネルギー用バイオマス産出の文脈が形成されている。人間が取得する正味の陸域一次生産量の推定値は、その定義に加え、計算に使用されたモデル及びデータによって異なっている。Haberl et al. (2007) による空間的に明確な計算では、2000 年に地上の人間が取得する正味の陸域一次生産量はモデル化された世界の正味の地上一次生産量の約 29% に達したと推定されている。人間による総バイオマス収穫量のみでも、約 20% (利用されている残渣及び牧草を含む) に対すると推定されており、人間が使用する、収穫されたバイオマスには計 219EJ/年のエネルギーが含まれている (Krausmann et al., 2008)。

他の、人間が取得する正味の陸域一次生産量推定値の幅は、同様の水準からその水準の約半分までとなっている (D. Wright, 1990; Imhoff et al., 2004)。人間が取得する正味の陸域一次生産量の概念は、「安全」または「持続可能」といったバイオマス利用の特定の水準の定義に直接使用することは出来ないが、人間の土地利用の影響は農業及び林業システムの形成方法に依存する (Bai et al., 2008)。しかし、これは、人間による生物圏の支配の尺度として使用し、見込まれている追加的なバイオマス資源ポテンシャルの相対的な大きさの評価において参考に出ることが出来る。

<sup>5</sup> Smeets et al. (2007) は、地球規模で飼料転換効率の高い完全に土地を利用しない動物生産システムを想定し、加えてこれまで達成されたものよりも大幅に速い速度での技術の進歩及び普及によって 2050 年までに世界農業生産性が 4.6 倍 (ヨーロッパで 1.9 倍増、サハラ以南のアフリカで 7.7 倍増) になると想定したシナリオをモデル化した。この場合、現在の農業地域の 72% が 2050 年にはバイオエネルギー生産に利用され、1,548 EJ/年の理論的ポテンシャルを供給する可能性がある。これは、世界の自然地上純一次生産の総エネルギー量と同じ大きさである。

生物物理学的要因に加えて、社会経済的条件も、バイオマスがどのように（どの程度）許容不可能と考えられる可能性がある社会経済的影響を発生させることなく生産出来るかを定義し、バイオマス資源ポテンシャルに影響する。社会経済的制限は世界各地で異なり、社会の発展に伴って変化している。また、それは社会がどのようにバイオエネルギーをその他の社会経済的目的との関係において優先するかに依存している（2.5 及び 2.8 節も参照）。

## 2.2.2 世界及び地域の技術的ポテンシャル

### 2.2.2.1 文献評価

2007 年において入手可能な文献の分析及び追加的なモデリング研究に基づく技術的ポテンシャルの評価によると Dornburg et al. (2008, 2010) は、2050 年における技術的ポテンシャルの上限は約 500EJ に達する可能性があるとして結論付けている。この研究では、土地利用の良好なガバナンス及び農業管理の大幅な改善を保証する政策枠組みを想定し、水の制限、生物多様性保護、土壌劣化、及び食料との競合を考慮している。林業、農業及び有機性廃棄物（一般廃棄物、家畜ふん尿、プロセス残渣などの有機成分）から発生する残渣は、40～170EJ/年に達すると推定されており、平均推定値は約 100EJ/年となっている。技術的ポテンシャルの、この部分は比較的確実性が高いが、競合する用途によって、エネルギー利用用途の本質的な利用可能性を、この幅の下限に押し下げられる可能性がある。林業残渣によるもの以外の余剰林業については、60～100EJ/年の追加的な技術的ポテンシャルを持っている。

作付けシステムを通して生産したバイオマスの Dornburg et al. (2008, 2010) による検討の所見では、余剰が出る可能性のある良質な農地・牧草地におけるエネルギー作物生産の低めの推定は 120EJ/年である。水不足の土地、耕作限界地、及び荒廃地の潜在的な貢献により、これに、最大で 70EJ/年追加する可能性がある。これには、水不足による制約があり、土壌劣化がより厳しい大きな地域を含んでいる。農業・家畜類管理を改善するための農業技術における十分な研究を想定すれば、さらに 140EJ/年が追加されるだろう。3つの分類を合わせると、この分析による技術的ポテンシャルは最大約 500EJ/年になる (Dornburg et al., 2008, 2010)。たとえば、Hoogwijk et al. (2005, 2009) は、バイオマスの技術的ポテンシャルは 2020 年における 290～320EJ/年から 2030 年における 330～400EJ/年まで拡大する可能性があるとして推定している。この技術的ポテンシャルの開発には大規模な政策的努力が必要となるだろう。そのため、実際の展開はより低くなる可能性が高く、バイオマス資源の基盤は、バイオマス残渣及び有機性廃棄物の割合、耕作限界地及び荒廃地におけるバイオエネルギー作物の栽培、バイオマスが他の主な参照されるオプション（サトウキビベースのエタノール生産など）に比べてより安価なエネルギー供給のオプションである地域に大きな制約を受け、最低で約 50EJ/年になる (Dornburg et al., 2008, 2010)。

表 2.2 は、様々なバイオマス・カテゴリーに対して明確に 2050 年の評価された世界の技術的ポテンシャルにおける幅を示している。ここで示されている幅が広がっているのは、それ自体が不確実性を持っている、重要な要因を考慮する研究のアプローチが異なっているためである。その要因とは、想定または算出されている人口、経済、及び技術の発展は異なり、地域によって様々な速さで進む可能性があること、生物多様性、自然保護、及びその他の環境条件は評価が難しく、多くの要因及び社会的選好に依存していること、気候変動と土地利用の規模及びパターンは環境の生物物理学的容量に大きく影響する可能性があることである。さらに、技術的ポテンシャルを正確に判定することはできず、環境への影響と食料及び繊維生産の増強が進むことによる影響におけるトレードオフに関する社会的選好、及び様々な土地利用の形態間の潜在的な相乗効果については、不確実性が残る。

**表 2.2:** エネルギー生産向けの地上バイオマス供給の様々なカテゴリにおける世界の技術的ポテンシャルの概要（一次エネルギーの数値は概数）。評価された技術的ポテンシャルの合計は、土地利用における生産性の発達が遅く、同時に将来的な食料及び繊維需要が高い場合、エネルギー目的のバイオマス利用可能性の大きな減少につながり、現在のバイオマス利用（約 50EJ/年）を下回る可能性がある。

バイオマス・カテゴリ	コメント	2050年 技術的ポテンシャル (EJ/年)
カテゴリ1 農業からの残渣	食料と飼料の生産及び加工に伴う副産物、一次残渣（収穫によって発生する穀物のわらなど）と二次残渣（精米によって発生するもみ殻など）の両方	15～70
カテゴリ2 余剰農業用地における専用バイオマス生産	油糧作物、リグノセルロース系の牧草、短期輪作雑木林、植林地などの従来型の農業作物及び専用バイオマス植物が含まれる。食料、飼料、またはその他の農産物の生産に必要とされない土地のみが、バイオエネルギー用に利用可能であると想定している。しかし、余剰耕地（または放棄された土地）は、必ずしもその開発の程度によって総合的に農業に必要となる土地がより少なくなるということを示唆するわけではない。これらの土地は、土地劣化プロセスまたは気候変動のためにモデリングの実行において農業利用から除外される可能性がある（以下の「耕作限界地」も参照）。大きな技術的ポテンシャルの実現には、農業生産の収穫量の増加及び放牧地の需要の低下に向けた地球規模の開発が必要となる。食料部門の開発によって利用可能な余剰農業用地が無くなるという報告をしている研究があることを反映すれば、技術的ポテンシャルはゼロとなる。	0～700
カテゴリ3 耕作限界地における専用バイオマス生産	従来型の農業に適さないと判断されるが何かしらのバイオエネルギー計画（森林再生によるものなど）には適した、森林伐採地、荒廃地、または耕作限界地におけるバイオマス生産を指す。世界的に確立された荒廃地及び耕作限界地の定義はなく、すべての研究がそのような土地とバイオエネルギーに適すると判断されるその他の土地を区別しているわけではない。そのため、複数の研究から数値を得ている場合、カテゴリ2及び3を追加することで二重に計上してしまう可能性がある。カテゴリ2及び3の高い技術的ポテンシャルの数値は、現在の世界の耕地面積を上回る面積（約 15 億 ha または 1500 万 km <sup>2</sup> ）におけるバイオマス生産を想定している。バイオエネルギーに耕作限界の土地を利用した場合、大規模な牧草地管理や自給自足農業などの土地需要、または経済的成果の不良によって低くなったこのカテゴリのポテンシャルを反映した際の技術的ポテンシャルはゼロになる。	0～110
カテゴリ4 森林バイオマス	森林間伐及び伐採から発生する一次残渣と木材加工から発生するおがくずや樹皮などの二次残渣を含む森林部門の副産物。火事や昆虫の大量発生などの自然かく乱による死木は、2つ目のカテゴリになる。予測されるバイオ材料需要（丸太、紙、板材など）を満たすための、産業用丸太生産に必要なとされない自然林及び半自然林におけるバイオマス栽培は、3つ目のカテゴリになる。副産物による供給は最大約 20EJ/年に達し、これは、高い森林バイオマスの技術的ポテンシャルは現在の産業用丸太生産によるものよりもかなり大きいエネルギー目的の森林バイオマス産出に相当することを意味している。エネルギー部門以外の部門による需要が推定される森林供給能力よりも大きくなる可能性があるとして研究が報告している場合、技術的ポテンシャルはゼロになる。	0～110
カテゴリ5 家畜ふん尿	動物性肥料。人口の推移、食事、及び動物生産システムの特徴が、主要な決定因子となる。	5～50
カテゴリ6 有機性廃棄物	家庭及び飲食店からの有機性廃棄物、紙を含む廃棄された木製品、建設廃木材などの材料使用に伴うバイオマス。利用可能性は、競合する利用法と収集システムの施行に依存している。	5～50 未満
合計		50 未満～1000 超

注:

Fischer and Schratzenholzer (2001)、Hoogwijk et al. (2003, 2005, 2009)、Smeets and Faaij (2007)、Dornburg et al. (2008, 2010)、Field et al. (2008)、Hakala et al. (2009)、IEA Bioenergy (2009)、Metzger and Huttermann (2009)、van Vuuren et al. (2009)、Haberl et al. (2010)、Wirsenius et al. (2010)、Beringer et al. (2011) に基づいている。

改善されたデータ及びモデリング能力を利用した評価は、バイオマスの技術的ポテンシャルの絞り込まれた明確な推定値を与えることはできていないが、それによってこの技術的ポテンシャルに影響するものの中で最も影響力の大きい要因が示されている。これについては、以下でさらに詳細に解説しており、この評価に使用されたアプローチをより詳細に扱っている。

#### 2.2.2.2 残渣、家畜ふん尿、加工副産物、及び廃棄物の寄与

表 2.2 に見られるように、バイオマス資源の評価は、農業及び林業部門の小売り廃棄物、消費財廃棄物、家畜ふん尿、一次残渣、及び加工副産物は長期的な世界の総バイオマス供給の大きな割合を供給する見込みがあることを示している。しかし、これらのバイオマス資源の大きさは、最終的には従来型の農産物と林産物の需要及び土地資源の持続可能性によって決定される。

将来のバイオマス供給へのこれらの発生源からの潜在的な寄与の評価では、食料及び森林部門のシナリオから得られる農産物と林産物の将来的な生産、荒廃地の利用の可能性、及び生産された一次製品の単位ごとの発生する残渣の量を説明する残渣要素に関するデータを組み合わせている。たとえば、農作物栽培における収穫残渣の発生は、収穫指数データ(総地上バイオマスに対する収穫産物の割合)に基づいて推定されている(Wirsenius, 2003; Lal, 2005; Krausmann et al., 2008; Hakala et al., 2009)など)。林業における伐採残渣及び間伐材やプロセス副産物などの追加的なバイオマス・フローの発生も、同様の手法を用いて推定されている(Ericsson and Nilsson, 2006; Smeets and Faaij, 2007 を参照)。

そして、エネルギー向けに利用可能なバイオマス・フローの割合(回復可能性の割合)は他の産出利用及び需要(土壌保全、農業における家畜の飼養または敷料、森林部門における繊維板生産など)を考慮して推定されている。

#### 2.2.2.3 利用されていない森林の成長の寄与

従来型の林産物への産業用丸太生産及び加工に関連した残渣フローに加えて、現在収穫不可能な森林の成長が考慮されている研究もある。このバイオマス資源は、木材供給目的で利用可能であると評価される森林の一部におけるバイオマス増加の推定値に基づいて定量化される。この増加は、利用されていない森林の成長を得るため、従来型の産業用丸太生産(場合によっては伝統的バイオマス(特に暖房と調理))向けの森林バイオマス産出の推定水準と比較される。Smeets and Faaij (2007) は、どのようにこのバイオマスの技術的ポテンシャルが、競合する需要及び経済的・生態的問題によって、主要なバイオエネルギー源となる水準から実質上ゼロの水準まで推移するかを示し、説明に役立つ定量化を行っている。現在の産業用丸太生産(約 15~20EJ/年)との比較によって、表 2.2 の森林バイオマス・カテゴリーで評価された技術的ポテンシャルの上限に達するには、森林バイオマス生産の急激な増加が必要となることが示されている。これに影響を与える特殊なケースとしては、昆虫の大量発生または火事による大規模な森林消滅の後に利用可能になる森林成長がある(Dymond et al., 2010)。

#### 2.2.2.4 バイオマス植林地の寄与

表 2.2 は、技術的ポテンシャルの幅の上限に達するにはバイオマス植林地からの大規模な供給が必要であることを示している。専用バイオマス植林地を目的とした土地の利用可能性(及びその適性)及び利用可能な土地で得ることが出来るバイオマス収穫量が、技術的ポテンシャルの2つの主要な決定因子である。余剰農業用地は一般的に植林地向けの主な土地資源であることを考えれば、食料部門の発展が重要である。土地の利用可能性及び適性を判定する方法には、生態系の経済的、生態的、及び社会的価値の維持の需要が考慮されていなければならない。以下で挙げる研究で示されているように、この需要の検討には様々なアプローチがある。

バイオマス資源ポテンシャルの初期の評価はほとんど、バイオマス植林地の技術的ポテンシャルの推定にどちらかというと単純なアプローチを使用しているが(Berndes et al., 2003)、関連する作物と農業システムの解析的表現及び経済的・全体生物地球化学的植生モデルの使用と、生物物理学的情報(土壌、地形、気候)を含むデータベースを組み合わせたモデリング・ツールの継続的な開発によって、徐々に改善がなされてきた(van Vuuren et al., 2007; Fischer et al., 2008; Lotze-Campen et al., 2009; Melillo et al., 2009; WBGU, 2009; Wise et al., 2009; Beringer et al., 2011 などを参照)。重要な結論は、a) バイオエネルギーの拡大に伴う土地利用変化の影響は、バイオエネルギーの気候の便益に大きな影響を与える可能性がある(2.5 節参照)及び b) 作物からのバイオ燃料収穫量は生産性の空間的変動を無視することによって過大評価されることが多かった(Johnston et al., 2009)ということである。

1つの例(Fischer et al., 2009)を示している図 2.4 は、任意の第一世代バイオ燃料原料及びリグノセルロース系の植物(含まれる植物の情報については図 2.4 の説明文を参照)に対するモデル化された世界の土地の適性を示している。統計情報及び保護地域のデータと組み合わせた最良の利用可能なリモート・センシング・データから得た世界の土地被覆に関する空間データを重ねることで、様々な土地被覆の種類に適した土地を定量化することが出来る。

収穫ポテンシャル<sup>6</sup>と適性の両方を示すため、適性指標が使用されている（図 2.4 の説明文を参照）。たとえば、現在の保護されていない草原及び森林の約 20%に当たる約 700Mha (7,000km<sup>2</sup>) が、ダイズに適していると評価されている一方、アブラヤシに適していると評価されているのは 50Mha (500km<sup>2</sup>) 以下となっている（地域に重複があるため、これらの土地適性の数値を合計することは出来ない点に注意）。非保護森林地を考慮すれば、アブラヤシの栽培に適した土地の面積は約 10 倍の大きさ（約 500Mha または 5,000km<sup>2</sup>）になる（Fischer et al., 2009、その Annex 5 及び 6）。しかし、大規模な森林のバイオマス植林地への転換は生物多様性に悪影響を与え、転換された森林の炭素密度によっては、そのような植林地から生産するバイオエネルギーで化石燃料を置き換えることによる年間の累積した気候便益を大幅に減らす可能性がある大量の初期二酸化炭素排出につながる場合もある。土壌炭素含有量の高い牧草地、及び森林を集約的に栽培する一年生作物に転換した場合も、同様に大量の二酸化炭素排出につながる可能性があるが、荒廃した及び炭素が枯渇した牧草地で草本及び木質リグノセルロース系植物を栽培した場合、むしろ土壌炭素が蓄積され、気候の便益を高める可能性がある。この点については、2.5 節でより詳細に解説している。

<sup>6</sup> 収穫ポテンシャルは、適応した栽培品種（栽培する植物の種類）が、最良の管理活動によって達成可能な最小の潜在的ストレスの下で成長した場合に得られる収穫量のことであり、これは Cassman (1999) による機能定義である。

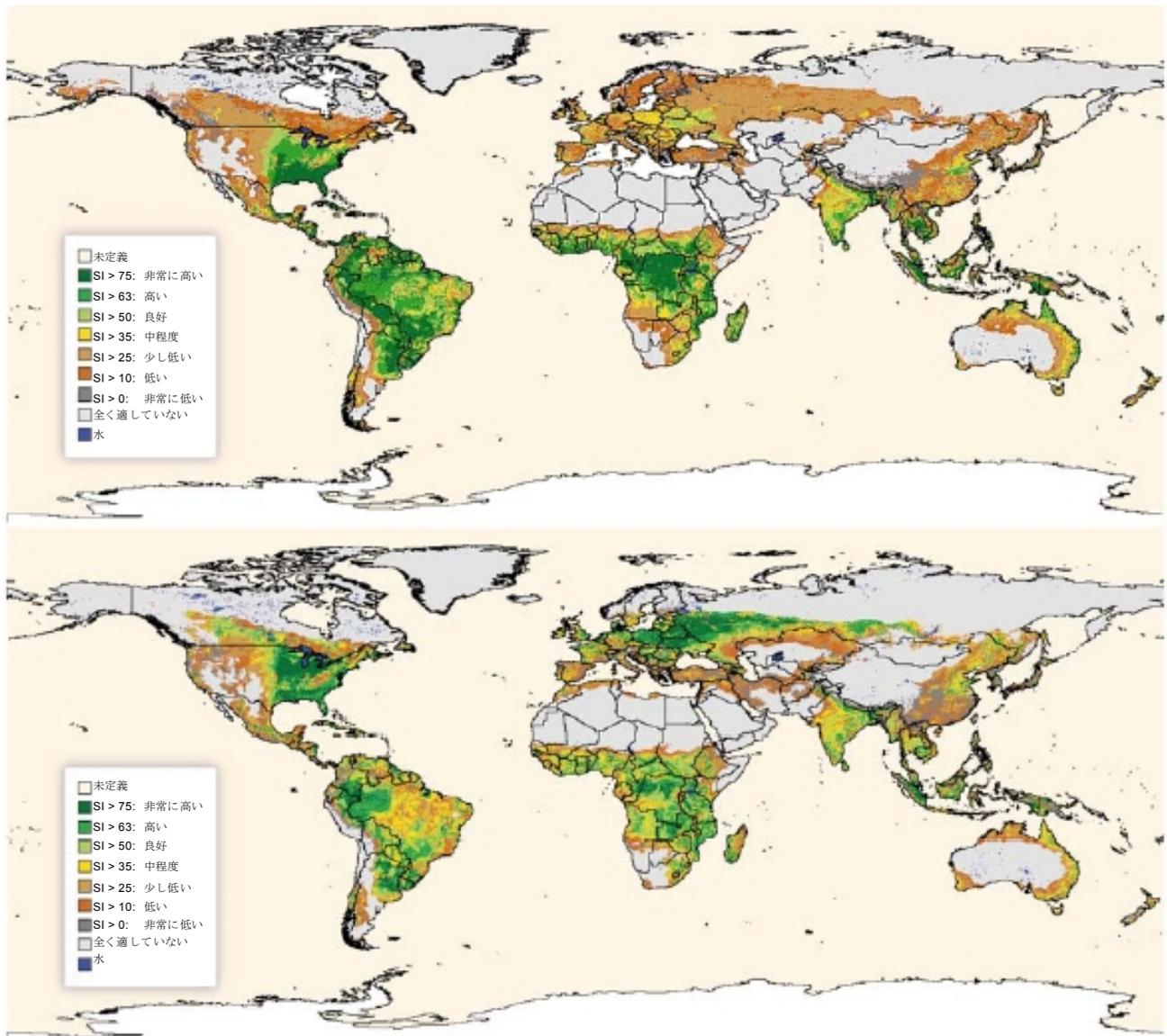


図 2.4: バイオエネルギー植林地に対する世界の土地適性。上の地図は、草本及び木質リグノセルロース系植物（スキ、スイッチグラス、クサヨシ、ポプラ、ヤナギ、ユーカリ）に対する適性を示しており、下の地図は第一世代バイオ燃料原料（サトウキビ、トウモロコシ、アブラナ、ダイズ、アブラヤシ、ジャトロファ）に対する適性を示している。適性指数（SI）<sup>7</sup>は、各ピクセルの空間的適正を記述しており、作物需要と支配的な気候、土壌、及び地形条件の適合を反映している。この地図は、十分な栄養の利用可能性、適切な害虫駆除と機械化、その他の活動を想定した天水栽培及び先進的管理システム下における適正を示している。灌漑条件または低生産管理システムにおける成果によって、様々な図が形成される（Fischer et al., 2009）国際応用システム分析研究所（IIASA）の許可の下で複製）。

そのため、バイオマス植林地の技術的ポテンシャルは、評価された土地利用可能性及び対応する収穫量水準に基づいて計算出来る。図 2.4 で示す結果に基づき、Fischer et al. (2009) は、食料と飼料生産に現在利用されている森林及び土地を除いた「食料及び環境優先」パラダイムの下、天水によるリグノセルロース系バイオ燃料原料生産に潜在的に利用可能な保護されていない草原及び森林の地域的な土地のバランスを推定した。後者は、反すう家畜の給餌に現在必要とされる、保護されていない草原及び森林の推定値を含んでいる。計算は、作物の飼料利用、国別の家畜数、国別の家畜の推定される飼料エネルギー需要、及び草原と牧草地で満たされる、発生した飼料ギャップに関する FAOSTAT データに基づいている。生産性が低いまたは勾配が急な草原及び森林は、リグノセルロース系原料の生産には適していないと考えられている。表 2.3 で示す結果は、一連の、達成可能な収穫量水準を決定する自然保護要件、バイオ燃料原料作物の選択、農業活動、及び牧草需要を決定する家畜類生産システムを想定した地域のバイオマスの技術的ポテンシャル推定値の一例を示している。さらに、この結果は、現在の農業活動及び生産性、

<sup>7</sup> SI: 適性指数。使用された適性指数は、各ピクセルの空間的適正を反映しており、適性指数=  $VS*0.9+S*0.7+MS*0.5+mS*0.3$  として計算している。VS、S、MS、及びmSは、それぞれモデル化された最大値の 80~100%、60~80%、40~60%、20~40%の収穫量水準に対応している（Fischer et al., 2009）。

人口、食事、気候などを示している。将来のバイオマス資源の技術的ポテンシャルの定量化においては、そのようなパラメータが時間とともにどのように変化するかを考慮する必要がある。

**表 2.3:** 保護されていない草原及び森林（つまり森林地は除かれているということ）における天水によるリグノセルロース系植物の技術的ポテンシャルの例（牧草を含む食料生産のための土地の需要は 2000 年の水準で考えられている）。計算は Fischer et al. (2009)（国際応用システム分析研究所 (IIASA) の許可の下で複製）に基づく。

地域	総牧草地及び森林地域 (Mha) [100 万 km <sup>2</sup> ]	保護地域 (Mha) [100 万 km <sup>2</sup> ]	非保護または生産性の非常に低い地域 (Mha) [100 万 km <sup>2</sup> ]	放牧地を除いたバイオエネルギー生産地域 (Mha) [100 万 km <sup>2</sup> ]	技術的ポテンシャル (平均収穫量 <sup>2</sup> , GJ/ha/年) [GJ/km <sup>2</sup> /年]	技術的ポテンシャル <sup>1</sup> (総 EJ/年)
北アメリカ	659 [6.59]	103 [1.03]	391 [3.91]	111 [1.11]	165 [16,500]	19
ヨーロッパ及びロシア	902 [9.02]	76 [0.76]	618 [6.18]	122 [1.22]	140 [14,000]	17
太平洋 OECD	515 [5.15]	7 [0.07]	332 [3.32]	97 [0.97]	175 [17,500]	17
アフリカ	1,086 [10.68]	146 [1.46]	386 [3.86]	275 [2.75]	250 [2,500]	69
南・東南アジア	556 [5.56]	92 [0.92]	335 [3.35]	14 [0.14]	285 [28,500]	4
ラテンアメリカ	765 [7.65]	54 [0.54]	211 [2.11]	160 [1.6]	280 [28,000]	45
中東及び北アフリカ	107 [1.07]	2 [0.04]	93 [0.93]	1 [0.01]	125 [12,500]	0.2
<b>世界</b>	<b>4,605 [46.05]</b>	<b>481 [4.81]</b>	<b>2,371 [23.71]</b>	<b>780 [7.80]</b>	<b>220 [22,000]</b>	<b>171</b>

注:

<sup>1</sup> 農業活動及び牧草利用の強化によって家畜用牧草地の需要を減らすことができれば、これらの地域は追加的なバイオエネルギー生産に利用することが出来る。その場合、技術的ポテンシャルは 171~最大 288EJ/年まで増加する可能性がある。

<sup>2</sup> 計算は、Fischer et al. (2009, p.174) による牧草地及び森林地域における天水によるリグノセルロース系原料の平均収穫量に基づいており、乾物で 18GJ/t (概数) のエネルギー含有量を想定している。

同様の分析には、食料及び繊維生産向けの、現在と近い将来の農業用地を残し、管理されていない土地がバイオマス植林地への転換によって、大気中への大量な正味の二酸化炭素排出につながる場合、その土地が荒廃している、湿地である、環境的に保護されている、生物多様性に富んでいる場合は、バイオエネルギー生産からその土地を除いているものもある (WBGU, 2009; Beringer et al., 2011)。利用可能な土地において専用バイオマス植林地が確立されれば、26~116EJ/年の生産が可能となると推定されている (灌漑も行った場合は 52~174EJ)。技術的ポテンシャルの空間的変動は、生物地球化学的条件 (光合成、蒸散、土壌の質、及び気候) から計算された。Haberl et al. (2010) は、見込まれている将来の食料・飼料、自然保護目標を満たした後に、利用可能な土地、及びバイオエネルギー植林地の予測される将来的な生産性の空間的変動を検討し、2050 年における技術ポテンシャルは 160~270EJ/年になるとしている。平均技術ポテンシャルの 210EJ/年のうち、81EJ/年は専用植林地、27EJ/年は林業の残渣、100EJ/年は作物残渣、家畜ふん尿、及び有機性廃棄物による供給であり、プロセスの最適化と段階的なバイオマスの利用の重要性が強調されている。

農業に関する文献 (UN-Water, 2007) 及びバイオエネルギーに関する文献 (Berndes, 2002; Molden, 2007; De Fraiture et al., 2008; 9.3.4.4, 9.3.4.4 及び 2.5.5.1 節) では、水の制約が強調されている。多くの地域において、技術的ポテンシャルは、明確な地質及び水文学的モデリングを含まないアプローチに基づいて評価されたものよりも低い水準に下がる可能性がある (Rost et al., 2009)。そのようなモデリングは、バイオエネルギー・ポテンシャルの評価の質の向上につながる可能性がある。樹木及びその他の多年生植物の植林によって、浸食性の水流出を減少させ、地下水を補給出来るが、それは下流域の水利用性の大幅な減少につながる可能性もある (Calder et al., 2004; Farley et al., 2005)。

これを説明している Zomer et al. (2006) は、クリーン開発メカニズム (CDM) において植林に適しているとされる広い地域は、植林された場合に蒸発散量の増加や表面流出の減少を示す、つまりオフサイトで他の用途に潜在的に利用可能な水が減少すると報告している。これは、特に乾燥した地域 (半乾燥熱帯) 及び草原からの転換や自給自足農業において顕著となる。同様に、504 の年間貯水池観察の地球規模の分析に基づき、Jackson et al. (2005) は、植林地は植え付けから数年以内に急激に流量を減少させたと報告している。そのデータベースにおけるすべての植え付け年度にわたって、草原、灌木地、または耕地の流量は平均 38%減少している。10~20 年経過した植林

地の平均損失はさらに大きく、それは流量の 52%に達している。

Hoogwijk et al. (2003)、Wolf et al. (2003)、Smeets et al. (2007)、及び van Minnen et al. (2008) による研究では、世界の技術的ポテンシャルのより高い達成におけるバイオマス植林地の重要性、及びどのように様々な決定要因となるパラメータが技術的ポテンシャルに大きな影響を与えるかを説明している。たとえば、農業生産性が現在の水準から増加せず、わずかなバイオマスしか取引されないが、人口増加が速く、技術の進歩が遅いシナリオの場合、Smeets et al. (2007) はバイオエネルギー植林地に利用可能となる土地は存在しないとしている。すべての主要なパラメータが非常に好ましい状態に設定された対照的なシナリオでは、最大で 35 億ヘクタール (3500 万 km<sup>2</sup>) に及ぶかつての農業用地 (主に牧草地で、広い地域はラテンアメリカ及びサハラ以南のアフリカにある) は、2050 年には食料目的では必要とされないと評価されている。この地域のかなりの部分が、バイオエネルギー植林地に技術的に適していると評価されている。

### 2.2.3 バイオマス資源評価における経済的考察

いくつかの研究では、達成可能な収穫量が特定の最低水準を下回る地域は除外されている。他には、特定のバイオマス価格レベルの下、価格が高すぎて実用化不可能と判断されたバイオマス資源が除外されている研究もある。これらの評価は、バイオマス資源の利用可能性及び生産の任意水準のコストを扱っており、それによって近代的バイオマスから二次エネルギーを生産する設備の所有者は、年間を通してバイオマスの供給が保証された費用対効果の高い事業用の設備の位置及び規模を評価することが出来る。コスト・モデルは、植物及び地域に固有のコスト供給曲線を得るために組み合わせられた土地利用可能性、収穫量水準、及び生産コストに基づいている (Walsh, 2008)。これらは、土地の機会費用を含むコスト要因の開発のための予測またはシナリオに基づいており、個別のバイオエネルギー植物の供給の実行可能性研究から将来的な世界のコスト供給曲線の推定などの様々な文脈及び規模に合わせて作成可能である。異なる規模でこのアプローチを用いた研究としては、Dornburg et al. (2007)、Hoogwijk et al. (2009)、de Wit et al. (2010)、及び van Vuuren et al. (2009) などがある。P. Gallagher et al. (2003) と Gerasimov and Karjalainen (2009) は、それぞれ作物収穫残渣と森林木材の場合のコスト供給曲線の作成の良い例である。

バイオマス生産コストは、関連する輸送システムと変換技術の技術的及び経済的データと組み合わせ、輸送用のバイオ電気やバイオ燃料などの二次エネルギーキャリアの水準における市場ポテンシャルを導出することが出来る (Gan, 2007; Hoogwijk et al., 2009; van Dam et al., 2009c など)。シナリオ・ベース・エネルギーシステム・モデリングにおける外部で定義された投入パラメータとしてバイオマスのコスト及び利用可能性のデータを使用することで、特定のエネルギーシステムの文脈と潜在的な気候及びエネルギー政策目標に関係した実施の水準に関する情報を与えることが出来る。コスト傾向は、2.7 節でさらに詳細に解説している。

図 2.5 (a) は、自然保護要件及びインフラ開発も考慮し、2030 年の食料部門シナリオに基づいて推定されたヨーロッパの市場ポテンシャルの予測を示している (Fischer et al., 2010)。図 2.5 (b) で示す推定生産コスト供給曲線は、それに続いてバイオマス植林地と森林及び農業残渣を含めて作成された (de Wit and Faaij, 2010)。市場ポテンシャルの規模を決定する主な要因は、動物生産を含む農業用地の生産性の開発である。

アメリカに関する図 2.5 (c) のデータは、国ごとに行われたリグノセルロース系原料供給コスト曲線の最近の評価に基づいている (Walsh, 2008; Perlack et al., 2005; US DOE, 2011)。図 2.5 (d) は、リグノセルロース系原料の様々な生産水準のベースライン条件下における変換設備へのバイオマスの納入価格を示している<sup>8</sup>。作物ベース・エタノール及びバイオディーゼルの総市場ポテンシャルは、環境保護庁 (2010) の予測から得たものである。加えて、図 2.5 (c) は、複数の作物、残渣、及び多年生バイオマス作物を考慮し、国家及び地方行政区画レベルでの過去の生産傾向及び平均生産コストに基づくアメリカ、中国、及びインドの市場ポテンシャルの高成長シナリオの暫定推定値を含んでいる (Kline et al., 2007)。市場ポテンシャルは、バイオエネルギー植物向けに耕作可能な土地の利用可能性とある程度の環境保護及びインフラに基づいて推定されている。2012 年、2017 年、及び 2027 年における高成長市場ポテンシャルが示されている (Kline et al., 2007)。最大の供給国であるブラジルは、AgroEcological Zoning (EMBRAPA, 2010) を使用して、適した土壌及び気候で用水量がゼロまたは低く、収穫の機械化を妨げない勾配の低さを持つ、規制されていない地域への拡大を制限している。同様の区画化はアブラヤシにも利用可能である<sup>9</sup>。これらのステップは、持続可能性基準を開発しているいくつかの組織が推薦している (van Dam et al., 2010、2.4.5 節を参照)。

<sup>8</sup> SI: たとえば、変換設備に納入されるバイオマス原料価格が 3 US ドル/GJ (2005 年) の場合、図 2.5 (d) で示す 3 種の原料は 5.5EJ を供給する。価格がより高い場合、ある程度原料が増える (たとえば、図内の森林残渣の 1.5EJ など)。

<sup>9</sup> DECRETO N. 7172, DE 07 DE MAIO DE 2010, Brazil.

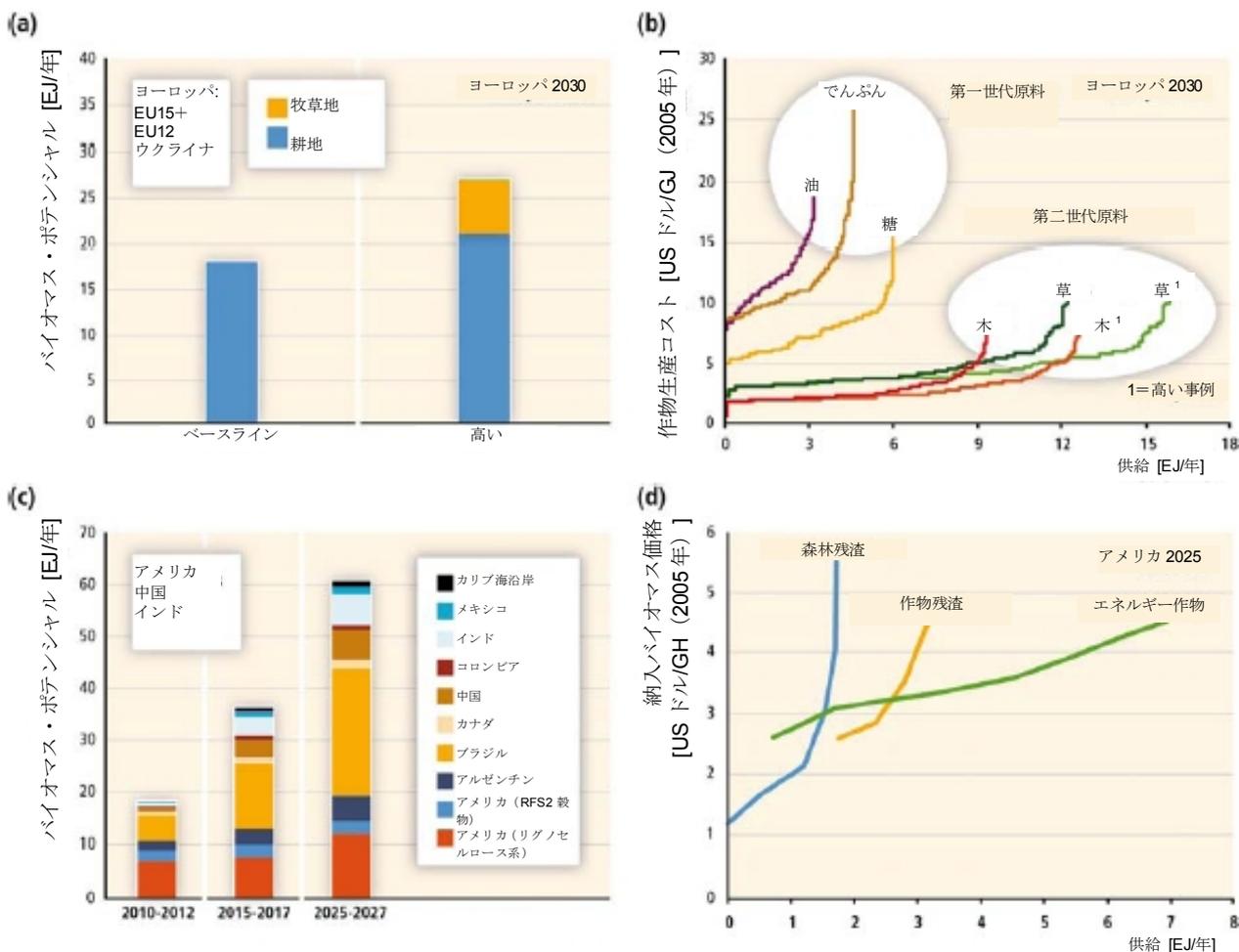


図 2.5: ヨーロッパ諸国及びアメリカに関して、それぞれ (b) と (d) に示す原料コスト供給曲線に基づく暫定市場ポテンシャルの例。これらの評価の原料コスト供給曲線は、国家及び地方行政区画に基づき (a) 地域・(c) 国レベルで行われた最近の研究から得たものである (国レベルで研究を行ったアメリカを除く)。(c) では、アメリカのデータはベースラインケースであり、他の国のケースは 2025 年までの高成長シナリオである (合計 45EJ/年で、ベースケースの場合 25EJ/年、低いケースの場合は約 8EJ/年に下がる)。詳細については本文を参照のこと。  
 出典: (a) Fischer et al. (2010) ; (b) de Wit and Faaij (2010) ; (c) Kline et al. (2007) ; Walsh (2008) ; EPA (2010) ; (d) Walsh (2008) , US DOE (2011)

### 2.2.4 バイオマス資源ポテンシャルに影響する要因

すでに簡潔に述べたように、バイオマス資源ポテンシャルを定量化する多くの研究で、含まれていない場合よりもポテンシャルを低い水準に下げる要因が幅広く検討されている。これらの要因は、バイオマス資源の利用から発生する影響にも関係している。この点については、2.5 節でより詳細に解説している。これらがどのように将来のバイオマス資源ポテンシャルに影響するかという点に関して、最も重要な要因を以下で解説する。

#### 2.2.4.1 農業及び林業における残渣供給

土壌保全及び生物多様性要件は、農業残渣と林業残渣の両方において技術的ポテンシャルに影響する。林業の場合、残渣収穫と栄養 (木灰を含む) の流入の組み合わせによって、栄養枯渇及び酸性化を避けることができ、地域によっては森林から浸出する栄養の減少によって環境条件を改善することも出来る (Börjesson, 2000; Eisenbies et al., 2009)。それでも、様々な腐敗段階にある有機化合物は、土壌の質の保全に加えて土壌及び地上における生物多様性に対して、重要な生態的役割を果たす (Grove and Hanula, 2006)。林分における死木の望ましい量の閾値を設定することは難しく、最も需要の高い種は管理された森林において供給することが難しい量の死木を必要とする (Ranius and Fahrig, 2006)。Dymond et al. (2010) は、オンサイトの持続可能性の必要性を考慮した研究からの推定値は、それを考慮していないものよりも数倍低い可能性があると報告している。Gronowska et al. (2009) も大きな差異があることを報告している。Titus et al. (2009) は、大規模な伐採残渣インベントリーの認められた残渣回収率において幅広い値 (0~100%) を報告し、保持比率 50%を適切な水準として提示している。また、土壌持続可能性に加えてその他の側面 (生物多様性、水質など) も考慮する必要があることが指摘されている。

伐木後の切り株収穫の技術開発によって、伐採中の残渣の利用可能性が増加する (Näslund-Eriksson and Gustavsson, 2008)。切り株収穫によっても、再植林のための整地のコストを減らすことが出来る (Saarinen, 2006)。それによって昆虫及び根腐れ菌の拡散による被害を減らすことが出来るが、森林土壌炭素と栄養ストックの減少、土壌浸食の増加、及び土壌凝縮などの悪影響にもつながる可能性がある (Zabowski et al., 2008; Walmsley and Godbold, 2010)。

農業では、世界の多くの地域において収穫残渣の乱開発が土壌の劣化の重要な原因の1つとなっている (Wilhelm et al., 2004; Ball et al., 2005; Blanco-Canqui et al., 2006; Lal, 2008)。肥料の使用によって、収穫及び残渣産出に伴う栄養損失を補うことが出来るが、土壌肥沃度、構造安定性、及び保水能力の維持または改善には、土壌への有機化合物の再循環が必要となる (Lal and Pimentel, 2007; Wilhelm et al., 2007; Blanco-Canqui and Lal, 2009)。土壌と死滅したバイオマスの栄養枯渇及び炭素貯蔵につながる残渣再循環は、大気からの炭素の除去のみではなく、土壌の劣化の緩和及び土壌の生産性の向上によっても気候変動緩和に確実に寄与する。これによって、収穫量が上がり、結果として将来的な食料、繊維、及びバイオエネルギー需要を満たすために土地を耕地に転換する必要性が下がる (つまり、植生の喪失及び土壌の耕作によって発生する温室効果ガス排出が少なくなる)。その他の条件が同じであれば、ヘクタール当たりの総バイオマス生産が大きくなった際、及びリグニンなどの耐火性化合物に富む作物残渣の加工によって発生する「廃棄物」が耕地に戻された場合に、残渣の産出は増加する可能性がある (J. Johnson et al., 2004; Reijnders, 2008; Lal, 2008)。

生態的持続可能性を保証するために、原理、基準、及び指標が開発されているが (van Dam et al., 2010; Lattimore et al., 2009; 2.4.3 節など)、これらを持続可能な残渣産出率を導くために安易に使用することは出来ない。残渣発生率を決定するいくつかの要因の潜在的な将来の発展にも大きな不確実性が伴う。人口増加、経済発展、及び食事の変化は、農業及び林業の生産物の需要に影響し、材料管理戦略 (材料の再利用及び段階的利用を含む) はこの需要の基本的な食料製品及び産業用丸太の需要への転換のあり方に影響を与える。さらに、食料及び林業部門の変化は、生産高当たりの残渣及び廃棄物の発生を押し上げるまたは押し下げる影響を与える。作物の育種は、残渣発生率を減らし収穫指数の向上につながる。無耕及び保全型農業の実施には、覆土を維持するために収穫残渣を現地に残し、土壌中の有機性化合物を増加させる必要がある (Lal, 2004)。家畜類生産におけるより閉じた集約的なシステムへの転換によって家畜ふん尿の回収可能性は増すが、家畜類生産高の任意の水準における全体的な家畜ふん尿生産は減少する。立ち木成長を改善するための早期間伐などの育林処理の増加は、エネルギー使用に適した小型の丸太の利用可能性の増加につながる。

結果として、より包括的な評価アプローチが使用されたとしても、残渣及び廃棄物フローに関連した長期的な技術的ポテンシャルの不確実性は残る。これは必ずしも決定要因の評価がより包括的になれば残渣の技術的ポテンシャルが下がるということの意味するわけではないという点に注意しなければならない。初期の研究では、不確実性を考慮して、念のために保守的な残渣回収率を使用していた可能性がある (S. Kim and Dale, 2004)。しかし、モデリング研究では、土壌生産性損失のコストによって残渣除去強度は林業で物理的に利用可能なバイオマスの量よりかなり低い水準に抑えられる可能性があるとされている (Gan and Smith, 2010)。

#### 2.2.4.2 農業及び林業における専用バイオマス生産

研究によって、優良な林分の施肥及び伐期の短縮などによる、森林成長及び総バイオマス生産を増加させるための従来型の長伐期林業の集約化には大きなポテンシャルがあることが示されている (Nohrstedt, 2001; Saarsalmi and Mälkönen, 2001)。これは、特に現在大規模な森林管理が行われている広い森林地域を持つ世界の地域において当てはまる。しかし、森林成長を増加させるための従来型の長伐期林業の強化の見通しは、バイオマス資源ポテンシャルの評価された研究において徹底して検討されてはいない。代わりに、森林バイオマス生産の主な供給源は早生樹の植林地であると想定されている。植林地に加えて、ヤナギ、及びスイッチグラス、ススキを含む多年生牧草などの短伐期定期伐採植物が、これらの土地において確立されるバイオエネルギー植物の候補と考えられている。

一般的に、バイオマス植林地は余剰農業用地において確立されると想定される。そのため、農業における集約化は、すべての評価された研究において本質的に主要な側面である。というのも、集約化はバイオマス植林地の土地利用性 (食料部門における土地需要を決定することによって間接的に) と得られるバイオマス収穫量水準の両方に影響を与えるからである。エネルギー植林地の高く評価された技術的ポテンシャルは、地球規模で生産条件が最も好ましい場所においてバイオマス植林地が確立されるという結果につながる多収穫農業システム及び国際的バイオエネルギー取引に依存している。既存の農業用地からの収穫の増加も、農業開発の主要な要素として提案されている (Ausubel, 2000; Fischer et al., 2002; Tilman et al., 2002; Cassman et al., 2003; Evans, 2003; Balmford et al., 2005; Green et al., 2005; D. Lee et al., 2006; Bruinsma, 2009)。研究では、土地需要 (耕地と放牧地の両方) の決定における食事及び食料部門のバイオマスの利用効率の重要性も指摘されている (Gerbens-Leenes and Nonhebel, 2002; Smil, 2002; Carlsson-Kanyama and Shanahan, 2003; de Boer et al., 2006; Elferink and Nonhebel, 2007; Stehfest et al., 2009; Wirsenius et al., 2010)。

農業開発の研究 (Koning, 2008; Alexandratos, 2009; IAASTD, 2009 など) は、非常に高いバイオマス植林地の技術的

ポテンシャルを報告しているバイオマス資源ポテンシャルの研究 (Johnston et al., 2009) よりも低い収穫量増加の予想を示している。それはいくつかの主要な生産国における収穫量増加を維持するための課題となる可能性があり、不適切な土地利用の結果として多くの耕地と放牧地で劣化及び生産性の損失が発生してしまうことを示す観測もある (Cassman, 1999; Pingali and Heisey, 1999; Fischer et al., 2002)。作物収穫量における気候変動の潜在的な帰結は厳密には確立されていないが、それは地球規模の正味の悪影響を示している。その被害は開発途上国に集中しており、農業生産ポテンシャルに損失が発生するが、先進国は利益を得る可能性がある (Fischer et al., 2002; Cline, 2007; Easterling et al., 2007; Schneider et al., 2007; Lobell et al., 2008; Fischer et al., 2009)。水不足によって、集約化の可能性とバイオエネルギー植林地の拡大の見通しの両方が制限される可能性があるが (Berndes, 2008a,b; de Fraiture et al., 2008; de Fraiture and Berndes, 2009; Rost et al., 2009; van Vuuren et al., 2009)、それはオンサイトの水管理を通して部分的に緩和することが出来る (Rost et al., 2009)。生物物理学的データ・セット及びモデリングを用いたバイオマス資源ポテンシャルの研究では、土地の生産性における水の制約を検討することが出来る。しかし、土地利用における生産性の向上に関する想定は、消費者間の地域的な水利用可能性、利用、及び分散における問題につながる可能性がある灌漑開発を暗示的に推定している可能性がある。地形レベルでの様々な土地利用オプションの水文学的効果をより良く理解し、予想するための水文学的プロセスモデルでの使用に経験的データが必要となる (Malmer et al., 2010)。水及び土地利用に関係した側面については、2.5 節でさらに解説している。

逆に、育種から得られる利益率は前回の停滞以降、近年増加してきており、新しい交配種がより広く適用されれば収穫量は再びより速く増加する可能性があるとする観測もある (Edgerton, 2009)。理論的境界も、遺伝学的収穫ポテンシャルのさらなる増加の余地を残していると考えられる (Fischer et al., 2009)。バイオエネルギー植林地の高い技術的ポテンシャルを検討する研究は、基本的に主な貢献者として熱帯の開発途上国を挙げている点に注意しなければならない。これらの国には、まだ利用出来る大きな収穫量ギャップ及び生産性増加の大きな機会がある (但し家畜類生産に関してはない) (Fischer et al., 2002; Edgerton, 2009; Wirsenius et al., 2010)。主要な食用作物として同じ育種取り組みの対象にならない専用バイオエネルギー植物には大きな収穫量増加ポテンシャルもある。特定の土壌型、気候、変換技術に合致した任意の位置に適した植物種と遺伝子型の選択及び開発は可能であるが、いくつかのエネルギー植物に関する理解の初期段階である (Bush and Leach, 2007; Chapple et al., 2007; Lawrence and Walbot, 2007; Carpita and McCann, 2008; Karp and Shield, 2008)。伝統的植物育種、選択、及び交配技術は特に木本植物と草において時間を要するものであるが、遺伝子組み換え (GM) 及び非遺伝子組み換え植物の両方を生産する新しいバイオ技術経路も可能である (Brunner et al., 2007)。遺伝子組み換え植物種は、遺伝子組み換え食用作物よりは一般的に受け入れやすいと思われるが、外来植物種から自生植物種への遺伝子流動を含め、そのような植物の潜在的な環境への影響が懸念される (Chapotin and Wolt, 2007; Firbank, 2008; Warwick et al., 2009; 2.5.6.1 節を参照)。

農場の収穫量増加を目的としたさらなる集約化には制約及びマイナスの側面が存在する可能性がある。たとえば、栄養、淡水、及び農薬の大規模な流入による高い作物収穫量は、周囲の生態系における種構成の変化、地下水汚染、海洋における富栄養化、酸素欠乏、及び無酸素の「酸欠」海域などの生態系に対する悪影響につながる可能性がある (Donner and Kucharik, 2008; Simpson et al., 2009; 2.5.5.1 及び 2.6.1.2 節)。しかし、従来型または有機農業の手法を使用すれば多くの地域及びシステムにおいて農業生産性を増加させることが出来るため、集約化は必ずしも農業の産業化に相当するわけではない (Badgley et al., 2007)。世界の大部分において、土壌及び水の保全の改善 (Lal, 2003; Rockström et al., 2007, 2010)、また肥料の利用及び作物の選択 (Cassman, 1999; Keys and McConnell, 2005) を通じて現在の天水農業の低い生産性を増加させるポテンシャルが存在している。現在、普及、能力育成、資源の利用可能性、及び資本と市場へのアクセスが不十分であるため、多くの世界の地域において利用可能なベストプラクティス<sup>10</sup>は適用されておらず (Godfray et al., 2010)、明確な地域差がある (Neumann et al., 2010)。

保全型農業及び混合生産システム (二毛作、作物と家畜や作物と林業) は、持続可能な形で土地の生産性と水利用効率に加え炭素隔離を増加させるポテンシャル及び食料安全保障とリンなどの限られた資源の利用の効率を改善するポテンシャルを持っている (Kumar, 2006; Heggenstaller et al., 2008; Herrero et al., 2010)。統合は、転換 (一般的にはダイズやトウモロコシなどの栽培されている飼料を置き換えることが出来る動物飼料の生産) と原料生産の統合に基づき (Dale et al., 2009, 2010)、及び牧草需要を減らす可能性もある (Sparovek et al., 2007)。

農業の研究、開発、及び展開への投資は、土地及び水の生産性を大幅に増加させること (Rost et al., 2009; Herrero et al., 2010; Sulser et al., 2010) に加え、植物種の強さの向上が可能になる (Reynolds and Borlaug, 2006; Ahrens et al., 2010)。複数の生態系サービス ((Berndes et al., 2004, 2008a,b; Folke et al., 2004, 2009) を提供する多機能システム (IAASTD, 2009) は、生物多様性の保全に有益な農業システムと景観構造の開発に寄与する可能性がある農業用地における、バイオエネルギー生産の代価オプションを代表するものである (Vandermeer and Perfecto, 2006)。

### 2.2.4.3 耕作限界地の利用

バイオマス資源ポテンシャルの研究は、生産能力が一時的または恒久的に低下した耕作限界地及び荒廃地も、バイ

<sup>10</sup> たとえば、マルチング、耕作量の低下、等高線耕作、bound、段々畑、雨水貯留・補助的灌漑、干ばつ適応作物、輪作、及び休閒時間の短縮。

オマース生産に利用出来る土地として示している。植物育種及び植物の遺伝子組み換えの進歩は遺伝的収穫ポテンシャルを高めるだけでなく、植物をより困難な環境条件に適応させる可能性がある (Fischer et al., 2009)。乾燥耐性の改善によって、散発的な干ばつの影響が緩和し、一般的により乾燥した地域及び天水システムにおける平均収穫量が向上し (Nelson et al., 2007; Castiglioni et al., 2008)、加えて灌漑システムにおける水需要を削減出来る可能性がある。そのため、収穫量の増加による食料及び材料需要を満たすための土地需要の削減に加えて、植物育種及び遺伝子組み換えによって、元々適していないと考えられていた土地を天水または灌漑生産に利用可能な状態に出来る。

耕作限界地及び荒廃地の大きな技術的ポテンシャルを示す研究もあるが、この技術ポテンシャルがどの程度実現出来るかは不確実性が高い。バイオエネルギー目的での耕作限界地及び荒廃地の利用に関連した主な課題として、(1) より荒廃地の開墾及び維持に多大な労力と長い期間が必要であること、(2) 土壌の生産性レベルが低いこと、(3) 生活のために荒廃地を利用する地域住民のニーズを注意深く取り扱わなければならないことが挙げられる。研究では、適切な方法の評価及び選択における地域ステークホルダーの参加の利益が指摘されており (Schwilch et al., 2009)、生物多様性及び気候変動の側面に取り組むことで土地劣化管理における便益を得ることができ、それによって国際的財政支援メカニズム及び大口献金者を通じた資金調達の下地を作ることが出来ると示唆している (Knowler, 2004; Gisladottir and Stocking, 2005)。この文脈において、バイオエネルギー用に適切に選択した植物種の生産は、追加的な便益として土壌と地上バイオマスにおける炭素隔離及び時間に伴う土壌の質の改善を含む1つの機会になり得る。

#### 2.2.4.4 生物多様性保護

生物多様性に配慮することによって、残渣産出に加え、農業用地の集約化及び拡大が制約を受ける。WBGU (2009) は、生物多様性をどのように考えるかによって、灌漑または気候変動よりも技術的ポテンシャルは大きな影響を受ける可能性があるとしている。生物多様性要件を制約として考える一般的な方法は、生物多様性のための土地保全の需要を含めることである。一般的に、バイオマス資源ポテンシャルの評価は、バイオマス生産に利用可能な地域から自然保護地域を除外しているが、概して森林生態系に焦点が当てられており、現在の保護水準を基準としている。他の自然生態系も保護を必要とし (特に草原生態系)、生物多様性のための自然保護の現在の状態は与えられた目標に対して十分ではない可能性がある。多くの生産性が高い土地において自然生物多様性は低いが、耕作限界地のいくつかに関しては逆のことが言え、結果として生物多様性に対する最大の影響は耕作限界地の広範な利用に伴って発生する可能性がある。

従来の農業よりも収穫量が少ないため、食料生産により多くの土地を必要とする代替農業生産の一定の拡大 (生物多様性を促進するための) を想定し、生産性に対する生物多様性による制約を間接的に考慮している研究がある (EEA, 2007; Fischer et al., 2009)。しかし、多毛作システムの場合、代替作付けシステムからのより少ない収穫量の一般仮定は一貫していない。エネルギー作物によって移動した生産性のある土地の利用が、別の場所で自然生態系を耕地または牧草地に転換することで再度確立された場合などに、生物多様性の損失が間接的に発生する可能性もある。エネルギーシステムと土地利用及び植被モデリングの統合によって、これらのリスク分析のより良好な見通しを立てることが出来る。

バイオエネルギー植林地は、特に統一的な農業景観及び現在は恵まれないまたは劣化した地域において複数の種が植えられ、モザイク景観が確立された場合に、生物多様性の促進において役割を果たす可能性がある (Hartley, 2002)。バイオマスと食料生産を組み合わせた農林業システムは、人間が支配する景観における生物多様性の保全を助けることが出来る (Bhagwat et al., 2008)。しかし、バイオマス資源ポテンシャルの評価は、概して単一栽培植林で達成される水準に対応する収穫量水準を想定しているため、そのバイオマス植林地の大部分が生物多様性保護に寄与するように形成された場合のバイオマス生産の規模に関する分析は浅くなる。

#### 2.2.5 資源ポテンシャルに対する気候変動の潜在的な影響

技術的ポテンシャルは気候変動の影響を受ける。大気中の温室効果ガス濃度の上昇は地球温暖化及び水循環の増強につながるという点に関しては科学的に強い確信があるにもかかわらず、気候変動の規模及び空間的パターンには不確実性が残る (IPCC, 2007c)<sup>11</sup>。さらに、農作物の成長に対する気温、放射、及び土壌水分の過去に見られない新しい変化の影響は不確かであり (Lobell and Burke, 2008)、それは農家の適応対策に関しても同様である。結果として、バイオエネルギー植林地を含む、農業生産に対する気候変動の影響の全体的な規模及びパターンには不確実性が残る。植物の成長に対して良い影響が発生する可能性もあるが、現在のところ多くの重要な地域において、生産性に対する好ましくない影響を排除することは出来ない。

<sup>11</sup> 以下の理由により不確実性が発生する。それは、将来的な温室効果ガス排出の軌跡が不明であること (そのため、様々なシナリオを用いて研究されている)、温室効果ガス強制力に対する気候モデルの計算された感度 (つまり、任意の排出シナリオに続く温暖化の大きさ) がそれぞれ異なること、及び降水の変化の空間的パターンと季節性が特に熱帯・亜熱帯地域の場合にモデル間で大きく異なることである (Li et al., 2006)。

植物生産性に対する大気中二酸化炭素濃度の上昇の同時生態生理学的影響（二酸化炭素肥沃化効果）についても不確実性が残る。二酸化炭素供給が上昇した場合、水ストレスの上昇または栄養枯渇によって妨げられない限り、 $C_3$  光合成を行う植物の成長は促進される (Oliver et al., 2009)。炭素肥沃化効果の長期的な大きさは議論を醸している。約 25% の正味の年間一次生産量の増加が可能であり、それは大気中二酸化炭素濃度の倍増を想定した現地実験の数例において観測されているが（この影響はより高い二酸化炭素濃度では横ばいになる）、co-limitation 及び結果として生じる適応によって利益をより小さく予想している例もある (Ainsworth and Long, 2005; Knorr et al., 2007)。農業管理及び育種条件下の影響の大きさは異なる可能性があり、まだよく知られていない。

気候温暖化の下では、植生による蒸散水の需要の増加は、大気中二酸化炭素濃度の上昇による水利用効率の向上（気孔閉鎖の増加）によって部分的に相殺される (Gerten et al., 2005)。これには様々な地域パターンがある。降水パターン及び規模の変化によって、植物生産が増加または減少する（変化の方向に依存）可能性がある。一般的に、半乾燥の耕作限界地には、二酸化炭素肥沃化の下における水利用効率によって生産性が高まると予測されるものもある (Lioubimtseva and Adams, 2004)。作物生産は特に熱帯において  $2^{\circ}C$  以上の温暖化の場合に概ね減少すると予測されており (Easterling et al., 2007)、エネルギー生産用のバイオマスも同様の影響を受ける可能性がある。全体として、バイオマスの技術的ポテンシャルに対する気候変動の影響は、管理、育種、及び植えられる地域の影響よりは小さいと考えられているが (WBGU, 2009)、それは特定の地域において強くなる可能性がある。どの地域が強い影響を受けるかは不確かなままであるが、熱帯地域が最大の悪影響を受ける可能性が最も高い。

## 2.2.6 合成

すでに解説したように、バイオマス資源の技術的ポテンシャルを正確な数値に絞り込むことは不可能である。多くの研究が、将来的に年間 50EJ 以下から数百 EJ がエネルギーとして供給可能であることを示している（後者は、望ましい開発に強く依存する）。所見の評価から、以下のような結論を導くことが出来る。

- ・ 将来の技術的ポテンシャルの大きさは、本質的に不確かな多くの要因に依存しており、それによって長期的な技術的ポテンシャルの不確実性は今後も残るだろう。重要な要因として、人口、経済開発、技術開発、食料・家畜ふん尿・繊維需要（食事を含む）、及び農業と林業における開発、につなげる方法である。
- ・ 追加的な重要な要因としては、(1) 適応能力を含む将来の土地利用に対する気候変動の影響、(2) 生物多様性及び自然保護要件によって設定される問題点、(3) 土地劣化及び水不足の帰結が挙げられる。
- ・ 研究では、農業、林業における残渣フロー、及び利用されていない（または大規模に使用されていることにより耕作限界になっている・劣化している）農業用地を、短期的視点と長期的視点の両方においてエネルギー用バイオマス生産の拡大の重要な基礎として挙げている。生物多様性による制限、及び良好な生態系と土壌の劣化の回避を確実にすることにより、農業や林業における残渣抽出には制限が、かかっている (2.5.5 節でさらに解説)。
- ・ 草原及び耕作限界地／荒廃地は、大規模なバイオエネルギー生産を支えるポテンシャルを持っていると考えられているが、生物多様性への配慮及び水不足によってこのポテンシャルは制約を受ける可能性がある。そのような土地のバイオマス植林地への転換が下流域の水利用性を減少させる可能性も考慮する必要がある。
- ・ 最適な植物（多年生の作物・基本種など）の栽培によって、従来型の食用作物にはあまり適さない土地におけるバイオエネルギーの生産を可能にし、技術的ポテンシャルを高めることが出来る。それは、そのような土地における従来型の作物の栽培が、土壌炭素排出につながる可能性があると考えれば、さらに高まる (2.5.2 節でさらに解説)。
- ・ 農業・林業システムに、バイオエネルギー生産を統合した多機能的な土地利用システムは、生物多様性の保護に貢献し、土壌の生産性や良好な生態系の回復及び維持を助ける。
- ・ 水不足を経験した地域では、生産が限定的になる場合がある。バイオマス植林地への土地の転換によって、下流の水利用が減少する可能性を考慮する必要がある。乾燥耐性のある適切なエネルギー作物の利用によって、水不足に適応出来る。バイオマス資源ポテンシャルの評価においては、より注意深く、水利用可能性や競合する利用法についての制約や機会を、検討する必要がある。

利用可能な科学文献における専門家の見解によれば、エネルギー用のバイオマスの展開レベルは 2050 年あたりで 100~300EJ/年に達する可能性がある（詳細については 2.8.4.1 節を参照）。これは、現在のエネルギー目的のバイオマスの利用（約 50EJ/年）と比較することが出来る。使用しているデータ及びモデリング能力が改善した最近の評価は絞り込まれた明確なバイオマス資源ポテンシャルの推定値をいまだ与えることはできていないが、それによって様々な要因の資源ポテンシャルに対する影響の程度についての理解及びエネルギー用のバイオマスの利用の増加によって好ましい効果と好ましくない効果の両方が発生するという理解が進んだ。バイオエネルギーの拡大に伴う土地利用変化の影響はバイオエネルギーの気候便益に大きな影響を与える可能性があるというのは、重要な結論の 1 つである (2.5.5 節)。資源評価からの洞察によって、開発が最も重要で研究が必要とされる地域を指摘し、バイオエネルギーの見通しを改善することが出来る。2.8.4.3 節にて、要約を示している。

## 2.3 技術及び用途

本節では、バイオマス原材料生産の商業技術、固体バイオマスの前処理、及び原材料を直接消費者に運ぶサプライチェーンの輸送を検討する。消費者は、個人（調理または暖房用の薪など）または企業（産業的消費者、加工業者など）である。前処理及び変換されたエネルギーキャリアは、元のバイオマスよりも利便性が高く、より多くの用途に利用可能であり、それは電力や熱、または移動サービスを生産出来る近代的固体（ペレットなど）、液体（エタノールなど）、及び気体（メタンなど）燃料である（図 2.2 を参照）。既存及び発展途上の電力、天然ガス、暖房（住宅用、地域用の商業及び公共サービス）、産業、農業、林業、及び液体化石燃料システムとの近代的バイオマスの統合は、第 8 章で詳細に解説している。

本節は、バイオエネルギーのサプライチェーンに沿って構成されているため、固体バイオマスの前処理、輸送、及びサプライチェーンを考察するより先に原材料生産及び関連する部門との相乗効果について解説している。そして、本節では、関連する文献から直接的に利用出来る、これらの幅広いバイオエネルギー・システム及びサプライチェーンのコストについて解説する前に近代的バイオマスからのエネルギーキャリア用の様々な最先端の変換技術について説明する。2.7 節で世界の多くの地域における生産の均等化コストに関する関連コスト情報を扱う前に、2.6 節では技術の改良、イノベーション、及び統合の見通しについて触れる。

### 2.3.1 原材料

#### 2.3.1.1 原材料の生産及び収穫

世界の各地域にわたる主要なバイオマス生産システム、専用植物、または一次残渣の技術性能の特性は、表 2.4 で要約されている。エネルギー植物の管理には、種または実生の準備、成林と収穫、土壌耕うん、灌漑、及び肥料及び農薬の散布が含まれる。後者は、作物需要、目標収穫量、及び地域の土壌気候条件に依存しており、類似種でも世界の地域によって異なる可能性がある（表 2.4）。統合害虫処理や有機農業などの戦略により、任意のバイオマス生産のための合成物使用の必要性が緩和される可能性がある（Pimentel et al., 2005）。

エネルギー用木材は、薪または残渣として得られる。薪が自然林か人工林、または農地で育つ木及び低木から得られるのに対し、残渣は木くず及び副産物から得られる。自然林はそれ自身が生産のために管理されているわけではないが、薪の採取が森林の再生能力を上回った場合に問題が発生する。これは世界の多くの地域で発生している。人工林の管理には、作付けシステムで使用されるものと同様の育林技術が必要とされ、成林及び木の伐採が含まれる（Nabuurs et al., 2007）。

バイオマスは、干し草やアルファルファなどの飼料型原材料の場合は年に数回、コムギや多年生牧草などの一年生植物の場合は年に 1 回、短伐期雑木林及び従来型の林業の場合はそれぞれ 2～50 年またはそれより長い期間ごとに収穫することが出来る。サトウキビは毎年収穫出来るが、4～7 年ごとに植え付け新芽から育てる必要がある。これは多年生牧草と考えられている。一般的に、収穫されたバイオマスは、バイオエネルギー設備または中間処理施設に運ばれる前に農場の収集場所または路肩に運ばれる。貯蔵、輸送、及び取り扱いを容易にするため、状態を整えたり、圧縮したりする必要がある（2.3.2 節を参照）。

表 2.4 に挙げた種には、様々な潜在的なエネルギー最終用途があり、多様な変換技術を必要とする（図 2.6 を参照）。でんぷん及び油糧作物は、第一世代液体バイオ燃料と呼ばれるもの（エタノール及びバイオディーゼル。2.3.3 節を参照）の原材料として毎年栽培され収穫される。総地上バイオマスの一部のみがバイオ燃料に使用され、残りは動物飼料又はリグノセルロース系残渣用に加工される。サトウキビは、糖及びエタノールの生産の原材料であり、多くの糖とエタノール生産国においてプロセス熱と追加的な電力の供給源となるバガス及び藁としての利用も増えている（Macedo et al., 2008; Dantas et al., 2009; Seabra et al., 2010）。そのため、これらのバイオリファイナリー生産物の環境フットプリントは好ましいものとなっている。多年生牧草又は短伐期雑木林などのリグノセルロース系植物は、完全にエネルギーに変換することができ、他の原材料の種類的大部分と比較して、その収穫量は 2～5 倍大きい。注意深く管理すれば必要とされる合成物の使用はかなり少なくなる（Hill, 2007）。しかし、立木の除去後の土壌有機性物質に対するその影響はよく分かっていない（Wilhelm et al., 2007; Anderson-Teixeira et al., 2009）。時間関数としての場所により異なる除去水準及び残渣除去に対する天候の影響を緩和する戦略を評価するための研究が進行中である（Karlen, 2010; Zhang et al., 2010 など）。現在、商業化されている技術の場合、リグノセルロース系原材料は熱と電力のみを供給しているが、油糧、糖、及びでんぷん作物の収穫物は容易に液体バイオ燃料に変換でき、熱及び電力が伴う場合もある。

専用植物の生産及び収穫コストは、投入の価格、機械、労働、及び土地に関係するコストによって大きく異なる（Ericsson et al., 2009; 表 2.4）。エネルギー植林地が食糧生産専用利用される土地と競合する場合、土地の機会費用（農家が既知の年間作物栽培からエネルギー作物に変換するために受け取る必要がある価格）は極めて大きく、エネルギー原材料の需要に比例して増加する可能性がある（Bureau et al., 2010）。農場から地域レベルへの

コスト供給曲線のスケールリングは、潜在的な大規模展開のシナリオ効果を説明するために必要となる（ヨーロッパ（コスト）及びアメリカ（納入価格）における原材料供給に関して、それぞれ図 2.5 (b) 及び 2.5 (d) の例を原材料生産水準の関数として参照。バイオマスの総需要が増加するにつれ GJ 当たりの単価が数倍になっている）。

**表 2.4:** 専用種及びその一次残渣の生産技術の一般的な特徴。収穫量は、エネルギーへの変換前のバイオマス中のエネルギー含有量の GJ、または糖及びでんぷん作物の場合はエタノール最終生成物のもので表す。コストは、民間生産コストまたはコストが利用不可能な場合は市場価格を参照している（2005～2009 年のデータ）。管理インプットの凡例: +: 低い; ++: 中程度; +++: 要求が高い

原材料の種類	地域	収穫量 GJ/ha/年 [TJ/km <sup>2</sup> /年]	管理			副産物	コスト 例 (2005～2009年) US ドル/GJ	参照
			肥料の使用 a	水の需要	農薬			
油糧作物		油換算						
菜種	ヨーロッパ	60～70 [6.7～7.0]	+++	+	+++	油かす、藁	7.2～16.0	1、2、3、22
ダイズ	北アメリカ	16～19 [1.6～1.9]	++	+	+++	ダイズかす、藁	11.7	3、12
	ブラジル	18～21 [1.8～2.1]	++	+	+++		該当なし	
アブラヤシ	アジア	135～200 [13.5～20.0]	++	+	+++	果房、圧搾繊維	該当なし	
	ブラジル	169 [16.9]	++	+	+++		12.6 <sup>b</sup>	3
ジャトロファ	世界	17～88 [1.7～8.8]	+ / ++	+	+	種子しぼりかす(有毒)、木材、外皮	3.2	3、4、5、10、11
でんぷん作物		エタノール換算						
コムギ	ヨーロッパ	54～58 [5.4～5.8]	+++	++	+++	藁、DDGSc	5.2	3
トウモロコシ	北アメリカ	72～79 [7.2～7.9]	+++	+++	+++	トウモロコシ茎葉、DDGS	10.9	3
キャッサバ	世界	43 [4.3]	++	+	++	DDGS	3.3～4	3
糖料作物		エタノール換算						
サトウキビ	ブラジル	116～149 [11.6～14.9]	++	+	+++	バガス、藁	1.0～2.0 <sup>b</sup>	3、17
	インド	95～112 [9.5～11.2]					該当なし	3
テンサイ	ヨーロッパ	116～158 [11.6～15.8]	++	++	+++	糖蜜、パルプ	5.2～9.6	3、13、22
ソルガム (サトウ)	中国	105～160 [10.5～16.0]	+++	+	++	バガス	4.4	2、21
リグノセルロース系作物		エタノール換算						
ススキ	ヨーロッパ	190～280 [19.0～28.0]	+ / ++	++	+		4.8～16	6、8
スイッチグラス	ヨーロッパ	120～225 [12.0～	++	+	+		2.4～3.2	10、14

		22.5]						
	北アメリカ	103~150 [10.3~15.0]	++	+	+		4.4	
短伐期 (SR)	南ヨーロッパ	90~225 [9.0~22.5]	+	++	+	樹皮	2.9~4	10、14
ユーカリ	南アメリカ	150~415 [15.0~41.5]	+ / ++	+	+		2.7	16、19
短伐期ヤナギ	ヨーロッパ	140 [14.0]					4.4	2、7
燃料用木材 (薪)	ヨーロッパ	110 [11.0]					3.4~13.6	15
燃料用木材 (再生可能自然林)	中央アメリカ	80~150 [8.0~15.0]				森林残渣	1.8~2.0	23
一次残渣								
麦藁	ヨーロッパ	60 [6.0]	+			該当なし	1.9	2
	アメリカ	7~75 [0.7~7.5]					該当なし	14、20
サトウキビ藁	ブラジル	90~126 [9.0~12.6]	+				該当なし	17
トウモロコシ茎葉	北アメリカ	15~155 [1.5~15.5]	+				該当なし	9、14
	インド	22~30 [2.2~3.0]	+				0.9	18
ソルガム茎葉	世界	85 [8.5]	+				該当なし	9
森林残渣	ヨーロッパ	2~15 [0.2~1.5]					1~7.7	15

注: <sup>a</sup>窒素、リン、及びカリウム。 <sup>b</sup>市場価格。 DDGS: 乾燥蒸留かす

注: これらは文献から得た事例的成本数値または市場価格である。1年間における特定の商業用原材料の成本の幅については Annex II を参照のこと。

参考: 1: EEA (2006) ; 2: Edwards et al. (2007) ; 3: Bessou et al. (2010) ; 4: Jongschaap et al. (2007) ; 5: Openshaw (2000) ; 6: Clifton-Brown et al. (2004) ; 7: Ericsson et al. (2009) ; 8: Fagnäs et al. (2006) ; 9: Lal (2005) ; 10: WWI, (2006) ; 11: Maes et al. (2009) ; 12: Gerbens-Leenes et al. (2009) ; 13: Berndes (2008a,b) ; 14: Perlack et al. (2005) ; 15: Asikainen et al. (2008) ; 16: Scolforo (2008) ; 17: Folha (2005) ; 18: Guille (2007) ; 19: Diaz-Balteiro and Rodriguez (2006) ; 20: Lal (2005) ; 21: Grassi et al. (2006) ; 22: Faaij (2006) ; 23: T. Johnson et al. (2009)。様々な国のヘクタール当たりの特定のバイオ燃料容量については Bessou et al. (2010) を参照のこと。さらなる国に関する情報については、IEA Renewable Energy Division (2010) も参照のこと。

林産物のコストは、収穫及びその他の輸送活動に大きく依存している。特に人件費、機械、及び伐採場所から変換施設までの距離は重要である (Asikainen et al., 2008)。これは、特に森林が家庭向けの主要な燃料源である開発途上国において、地方市場、つまり分散型市場に有利に働く (Bravo et al., 2010)。

### 2.3.1.2 農業、食料、及び森林部門との相乗効果

2.2.1 節で強調したように、バイオエネルギー原材料生産は資源の他の利用法 (主に土地) と競合し、生物多様性、水利用可能性、土壌の質、及び気候に悪影響を与える可能性がある (2.2.4 及び 2.5 節を参照)。しかし、統合された生産システムの設計を通して相乗効果が発生する可能性もあり、それによって追加的な環境サービスが供給される。間作及び混作は、耕作した単位面積当たりのバイオマスの生産を最大化するオプションである (WWI, 2006)。混作システムは単作よりも収穫量が高くなり、同じ場所において食料及び飼料とエネルギー原材料の両方を供給する可能性がある (Jensen, 1996; Tilman et al., 2006b)。二毛作システムは、バイオエネルギー及び家畜利用のための追加的な原材料を生産するポテンシャルを持つとともに、1年の間に同じ地域で2つの作物からバイオ燃料の収量が高くなる可能性がある (Heggenstaller et al., 2008)。

農林業システムは、食料、飼料、材木、及びエネルギーを目的とした土地の利用を可能とし、関連する種に対して相互的な便益をもたらす (R. Bradley et al., 2008)。関連する土地当量比は、最大 1.5 に達する可能性がある。つまり、耕地作物と木を組み合わせた場合は単作と比べて土地面積を 50%削減出来るため (Dupraz and Liagre, 2008)、間接的土地利用変化の影響も等しく削減することが出来る (2.5.3 節を参照)。他のオプションとしては、短伐期雑木林と同様の、エネルギー用の残渣バイオマスの生産のための下層食用作物の栽培及びリグノセルロース系植物の定期伐採がある (Dupraz and Liagre, 2008)。多年生植物は、一年生植物と比較して浸食制御、肥料使用効率の向上、硝酸塩溶脱の減少などの好ましい外部性をもたらす (2.2.4.2 節を参照)。最後に、バイオエネルギー原材料の栽培によって発生する収入によって、食用作物の収穫量を増やす技術又は投入が利用可能になり、農業部門への追加的な投資が促進され、生産性上昇が促される可能性がある (De La Torre Ugarte and Hellwinckel, 2010)。これは原材料の便益が地域コミュニティに分散することを条件とする (Practical Action Consulting, 2009)。

## 2.3.2 近代的バイオマスからのエネルギーキャリアのロジスティクス及びサプライチェーン

バイオマスはほとんど密度が低い形で利用するため、化石燃料の相当物よりも多くの貯蔵スペース、輸送及び取り扱いを必要とし、結果としてコストが影響を受ける。バイオマスは、取り扱いを改善するために加工 (前処理) が必要となる場合が多い。ほとんどのバイオエネルギー・システム及びチェーンにおいて、資源の場所から変換施設までのバイオマスの取り扱い及び輸送は、エネルギー生産の全体コストにおける重要な要素の 1 つである。作物の収穫、貯蔵、輸送、前処理、及び配送は、エネルギー生産の総コストのうち 20~50%に達する可能性がある (J. Allen et al., 1998)。

バイオマスは多くの場所で収穫後の短い期間においてのみ利用可能であるため、年間を通したエネルギー生成における単一の農業バイオマス原材料の利用には、比較的大規模な貯蔵が必要となる。バイオマス利用可能性のそのような季節変動に加えて、他の特性によってバイオマスのサプライチェーンは複雑化しており、それも考慮する必要がある。これには、独自の複雑なサプライチェーンを持つ複数の原材料、及び空間的制約、火災の危険、湿度制御、菌類と孢子による健康上のリスクなどの貯蔵上の課題が含まれる (Junginger et al., 2001; Rentizelas et al., 2009)。

### 2.3.2.1 固体バイオマスの供給及び利用のための市場開発

時間の経過とともに、バイオマスの利用及びバイオマス供給の市場開発においていくつかの段階が見られる場合がある。様々な国が時間とともにこの段階を経験してきていると思われるが、それぞれの開発の段階は明確に異なっている (Faaij, 2006; Sims et al., 2010)。

1. 廃棄物処理 (一般廃棄物、生産設備のオンサイトにおけるプロセス残渣 (製紙業、食品産業) の使用など) は、一般的に開発途上のバイオエネルギー・システムの初期段階である。資源が利用可能であり、多くの場合、廃棄費用を伴う (負値の場合もある)。これによって、利用が有益になり、同時に廃棄物管理問題が解決される。大規模及び小規模の開発は、統合された資源管理とともに進歩している。
2. 森林管理及び農業からの資源の地域的な利用。この資源は、収集及び輸送のコストが高くなるが、それでも通常は経済的に魅力的である。インフラ開発が必要となる。
3. 地域規模でのバイオマス市場開発。燃料の柔軟性が向上したより大規模な変換ユニットが導入され、平均輸送距離の増加によってさらに規模の経済性が向上する。バイオマス供給のコストの増加によって、よりエネルギー効率の高い変換設備が必要かつ実現可能となる。この段階への発展には通常、固定価格制度など (FITs) の政策支援措置が必要となる。
4. 供給者と購入者の数の増加を伴う国内市場の開発。市場の創出とロジスティクスの複雑化。供給システム及び市場へのアクセスの改善によって利用可能性が向上することが多い。そのため、価格水準は低下する可能性がある (Junginger et al., 2005 などを参照)。
5. バイオ燃料の国境輸送を含む市場及び輸送距離の規模の拡大。バイオマス資源 (及びバイオマスから得たエネルギーキャリア) の国際貿易。バイオマスがしだいに地球規模で取引されるエネルギー商品になりつつある (Junginger et al., 2008 などを参照)。バイオエタノールの貿易が、この状態に最も近づいている (Walter et al., 2008 などを参照)。
6. 専用燃料供給システムの役割が大きくなる (エネルギー目的を主とする、またはエネルギーのみを目的とするバイオマス生産)。これまで、ほとんどのエネルギー作物は農業の利益及び支援 (農家への補助金、休耕補助金) によって栽培されており、それは油糧作物 (アブラナなど) 及び余剰食用作物 (トウモロコシ及びテンサイ) に集中している。

一般的に、バイオマス供給及びバイオマス市場の充実した商業経験を得た国は、時間とともにバイオマス・サプラ

イチェーンにおける大幅なコスト削減を実現することが出来る。フィンランド及びスウェーデンにおいては、規模の拡大、イノベーション、競争の激化などの要因によって、1975年から2003年にかけて納入コストは12USドル/GJ(2005年)から5USドル/GJ(2005年)まで低下した(Junginger et al., 2005)。アメリカのトウモロコシエタノール産業及びブラジルのサトウキビエタノール産業においても同様の傾向が見られる(表2.17を参照)。

地域的及び国際的バイオマス・サプライチェーンの分析によって、距離が50~150kmになる場合、未処理のかさばるバイオマスの陸上輸送は競争力を失い、エネルギー効率も悪くなることが示されている(Dornburg and Faaij, 2001; McKeough et al., 2005)。長距離輸送が必要な場合、サプライチェーンの早い段階における前処理及び圧縮(2.3.2.3及び2.6.2節を参照)によって、輸送コストを最小化する効果が得られる。エネルギー利用及び関連する温室効果ガス排出を考慮すれば、十分に体系化された輸送チェーンには、バイオマスの初期エネルギー含有量の10%以下しか必要ないが(Hamelinck et al., 2005b; Damen and Faaij, 2006)、これには輸送における規模の大きさ、効率的な前処理、及び未処理のバイオマスの陸上輸送の最小化が必要となる。

このような体系化は、急速に発展している国際木材ペレット市場で見られる(2.3.2.3及び2.4.4節を参照)。さらに、エタノールや植物油などの液体燃料の(長距離)輸送コストは、バイオエネルギー・チェーンの全体コスト及びエネルギー利用のわずかな割合でしかない(Hamelinck et al., 2005b)。

### 2.3.2.2 開発途上国における固体バイオマス及び木炭供給

開発途上国における最貧家庭の大部分は、調理に必要な木炭などの固体バイオマス燃料に依存しており、無数の小さな産業(煉瓦及び陶製のかまどなど)によってこれらの燃料からプロセス熱が発生している(FAO, 2010a; IEA, 2010b; 1.4.1.2節を参照)。バイオマスのこの極めて重要な役割にもかかわらず、この部門はまだ規制されていない部分が多く、よく理解もされていない。そして、そのサプライチェーンの大部分はインフォーマル部門の手中にある(Sepp, 2008)。

薪が市場で取引される場合、木は通常、伐採されて大きく切り出され、地域の貯蔵施設に輸送される。そこで、売買業者が収集し、主に地方の卸売及び小売施設に運ばれる。木材の一部はキルンで木炭に変えられて大きな袋に詰められ、手、畜力車、及び軽トラックで路肩に運ばれて、そこでトラックで収集し都市部の卸売及び小売施設に送られる。そのため、木炭製造は地方の住民が都市部の市場に供給する活動となっている。作物残渣及び家畜ふん尿は通常、薪を季節的に補完するものとして動物の飼い主によって使用される(FAO 2010a)。

くず状のバイオマス残渣は、ブリケットングまたはペレット化によって圧縮される場合があり、それにはバイオマスを圧縮して押し出すスクリュウまたはピストン・プレス機が使われることが多い(FAO, 1985)。練炭及びペレットは、再生可能で質及び大きさが一定であり、圧縮されていないバイオマスよりも熱効率が良く密度が高いため、石炭、褐炭及び薪の良い代替物となりうる。

インド及びタイに、様々な二次残渣を使用し、容量が異なる稼働中のブリケットング施設があるが、他のアジア諸国にはまだそのような施設はない。アフリカにおいては多くのブリケットング・プロジェクト(ほとんどは開発業者の資金による)があるが、そのほとんどが技術的または商業的に失敗している。失敗の理由は、技術的に実証されていない新しい試験ユニットの導入、場所を考えれば経済的に意味のない高価すぎる機械の選択、部品を製造して保守する地域の能力の低さ、コスト競争力の低さ及び認知の低さによる練炭の市場の欠如などである(Erikson and Prior, 1990)。

木材ペレットは、おがくずや研削屑などの木くずで作られる。造粒機械は、飼料製造技術に基づいており、ブリケットングと比較していくらか軽く小さいバイオマスのペレットを生産する。木材ペレットは、形状及び特性が均一で輸送効率が高く、エネルギー密度が高いため、取扱い及び燃焼が容易である。木材ペレットは、多くの国で調理及び暖房用途の燃料として利用されている(Peksa-Blanchard et al., 2007)。

チップは、主に従来型の林業の副産物としての植林地の廃木材及び木材残渣(枝及び現在ではトウヒの切り株まで含む)から生産される。これらは、ペレットよりも必要となる処理が少なく、安価である。最終用途によって、チップがオンサイトで生産されるか、木材がチップ製造者に輸送される場合がある。一般的に、チップは自動暖房システムで使用され、石炭燃料発電所で直接使用するか、またはコジェネレーション生産に使用することが出来る(Fagernäs et al., 2006)。

木炭は、無酸素状態で木質バイオマスを高温に熱することで得られ、元の原材料の2倍の発熱量を有する。これは、煙を出さずに燃え、かさ密度が低いため、輸送コストが抑えられるというメリットがある。多くのアフリカ諸国の地方において、木炭は効率が10%以下の伝統的なキルンで生産されており(Adam, 2009)、一般的に都市部の家庭に売られて地方の家庭は薪を使用する。軟材は取扱い及び輸送中に大きな損失が発生する可能性があるため、硬材が木炭に最も適した原材料である。コーヒー殻、木くず、藁のような粒状材料による木炭は、粉末状であり、バインダーを使用してまたは使用せずにブリケットングする必要がある。収穫量の高いユーカリ植林地からの木炭は、

特にブラジルで、大規模な産業でも使用されている (Scolforo, 2008)。多くの場合、持続的に生産される木材と組み合わせられており、石油燃料発電所における混焼原材料としての使用も増えている。ブラジルのユーカリ植林地からの木炭生産の予測コストは、産業炭化過程を使用した場合、5.7~9.8US ドル/GJ (2005 年) である (Fallot et al., 2009)。

アフリカにおける木炭は、主にインフォーマル部門の効率の悪い伝統的なキルンで生産されており、違法な生産であることが多い。現在の木炭の生産、包装、及び輸送の特徴は、低い効率と稚拙な取扱いであり、それが損失につながっている。この産業に変化をもたらすには、持続可能で環境保護目標と矛盾しない場所で、木炭が認知され、合法化する必要がある。合法化されれば、それを規制して燃料品質を扱う基準、包装及び製造キルンの基準を導入し、木炭の生産に使用すべき樹種をより良い形で強制することが出来る (Kituyi, 2004)。

### 2.3.2.3 木材ペレットのロジスティクス及び供給

木材ペレットは、国際的に取引されているものの中でも、最も成功しているバイオエネルギー商品の 1 つである。木材ペレットには、他の固体バイオマス燃料と比較していくつかの優位性がある。一般的に、木材ペレットは含水率が低く、発熱量が比較的高いため (約 17GJ/t)、エネルギー・バランスに影響を与えることなく船舶による長距離輸送を行うことが出来る (Junginger et al., 2008)。地域の輸送はトラックによって行われ、バイオマス原料の場合の実行可能上限は 50km (ペレットの場合は 150km) の輸送であり、必要な貯蔵と合わせて通常は最終コストの 50%以上を占めている。ペレットの大量輸送は、家庭用灯油の輸送に非常に似ており、トラック運転手によって行われる。貯蔵スペースにペレットが吐き出され、吸い上げポンプによって塵が取り除かれる。貯蔵方法としては、地下タンク、容器ユニット、サイロ、ボイラー室での貯蔵が挙げられる。国内ユーザー向けのより効率の良いペレットの貯蔵、管理、及び燃焼システムの設計が進行中である (Peksa-Blanchard et al., 2007)。ペレットの取り扱いに適した設備を持つ港への船による国際貿易は、主な輸送上の障壁の 1 つとなっている<sup>12</sup>。輸送コストも障壁の 1 つであり、国際貿易需要による影響を非常に受けやすい。たとえば、2004 年には、カナダの工場のペレットの平均価格は 3.4US ドル/GJ (2005 年) で、オランダへは 4.1US ドル/GJ (2005 年) (本船渡し)、ロッテルダム港の場合は 7.5US ドル/GJ (2005 年) で送られていた (Junginger et al., 2008; Sikkema et al., 2011 も参照)。

### 2.3.3 電力、熱、液体及び気体燃料への変換技術

商業的バイオエネルギー経路は図 2.6 に示されており、森林作物または農業作物、産業、商業、または一般廃棄物及び副産物などの原材料から始まっている。これらの経路は、直接的に、またはコジェネレーション、バイオガス、及び液体バイオ燃料 (サトウキビまたはトウモロコシからのエタノール、として油糧種子作物からのバイオディーゼルなど) として、バイオマスから電力または熱を供給している。現在のバイオマスを利用した商業プロセスは、石油を用いた燃料及び生産物の多様性と比較して、生産される液体燃料の幅は狭い。

図 2.2 は、第二世代 (リグノセルロース系草本または木質植物) 及び次世代 (水生植物) 原料及び様々な第二世代 (または次世代) 転換プロセスに基づく一連の複雑な開発途上の技術的オプションを示している<sup>13</sup>。これには、商業用 (図 2.6) 第一世代 (油糧、糖料、及びでんぷん作物)、固体バイオマス原材料及び転換プロセス (発酵、エステル交換、燃焼、ガス化、熱分解、及び嫌気性消化) も含まれる。第二世代原材料及び転換プロセスによって、開発途上のバイオリファイナリー (2.6.3.4 節でより詳細に解説している) で、より効率の高い電力及び熱に加え、幅広い液体炭化水素燃料、アルコール (よりエネルギー密度が高いものを含む)、エーテル、化学物質、及びポリマー (バイオ材料) を生産することが出来る。炭化水素燃料の生産に関する初期の研究開発は、糖及びでんぷん作物から始められ、ガソリン、ディーゼル、及びジェット燃料まで扱われており、化学物質への関心も高まってきている。改良された第一世代作物 (一年生サトウキビを元にするものなど) と特定の地理的領域に適した第二世代植物の両方が、従来は石油化学産業から得られていた大量の化学物質及び材料に加えて、様々なエネルギー製品を供給し、原材料当たりの最終産物の生産量を最大化するポテンシャルを秘めている。

<sup>12</sup> 輸出ポテンシャルを有するほとんどの国において、まだ港には貯蔵・近代的な管理設備は整えられていないか、管理が洗練されておらず、それによって出荷コストが高くなっている。

<sup>13</sup> リグノセルロース系バイオマスによるものなど、新しい過程で生産されたバイオ燃料は、先進バイオ燃料または次世代バイオ燃料とも呼ばれる。



図 2.6: 商業用バイオエネルギー経路の概略図（IEA, Bioenergy, 2009 を改変）。

注:

<sup>1</sup>各原材料の一部は他の経路でも使用可能である。<sup>2</sup>各経路は副産物も発生させる。<sup>3</sup>バイオマス・アップグレードには、あらゆる高密度化プロセス（ペレット化、熱分解など）が含まれる。<sup>4</sup>嫌気性消化プロセスによってメタン及び二酸化炭素が放出され、基本的に二酸化炭素の除去によって、天然ガスの主要な成分であるメタンが発生する。アップグレードされた気体はバイオメタンと呼ばれる。

### 2.3.3.1 変換技術の開発段階

熱、電力、及び燃料の生産に関する、固体リグノセルロース系バイオマス、含水廃棄物、サトウキビまたはでんぷん作物からの糖、及び植物油からの選ばれた熱化学、生化学、及び化学経路の開発段階が、表 2.5 に示されている。たとえば、蒸気サイクルを用いたタービンなどの発電機と組み合わせたバイオマス燃焼は商業的発電（またはコジェネレーション）システムであるが、スターリング・エンジンとの組み合わせは未だ開発途上であり、有機ランキンサイクル（ORC）は商業的に普及し始めたばかりである（van Loo and Koppejan, 2002）。一般的に、固体木材または廃棄物バイオマスは熱化学経路で、含水原材料及び糖料またはでんぷん作物は生化学的または化学的に、植物油の場合は機械的圧搾過程の後に加工される（Bauen et al., 2009a）。開発段階は大きく、研究開発、実証、初期商業、完全商業製品及びプロセスに分けられる。産業において多くの開発が行われており、それらはピア・レビューされた文献で文書化されていない場合が多いため、これらの異なる開発段階への厳密な割り当ては難しく、いくらか恣意的となる（Regalbutto, 2009; Bacovsky et al., 2010a,b）。通常、世界中で普及可能なプロセスは、技術的リスクが小さく、資金を得ることが出来るため、完全に商業的技術であると言える（Kirkels and Verbong, 2011）。

バイオマス産業と廃棄物管理の相乗効果はすでに確立されており、石油精製、化学物質、天然ガス、及び石炭産業とともに追加的な相乗効果が発展している（King et al., 2010; Kirkels and Verbong, 2011）。商業化に向かうバイオエネルギー・システムの多くは、技術的リスクが高い。2.6.3 節では、これらの追加的な進歩している転換プロセスについてより詳細に説明する。

### 2.3.3.2 熱化学プロセス

**バイオマス燃焼**は、燃料内の炭素及び水素が十分な酸素と反応して二酸化炭素と水を形成し、熱を放出するプロセスである。バイオマスの直接燃焼は、地方において調理に広く利用されている。木材及び木炭は、産業においても燃料として利用されている。燃焼プロセスは良く理解されており、幅広い既存の商業技術がバイオマスの特性及びその用途の規模に適応している。バイオマスは石炭燃料発電所において石炭と混焼させることも出来る（van Loo and Koppejan, 2002; Faaij, 2006; Egsgaard et al., 2009）。

**熱分解**は、無酸素状態（空気の無い状態）で発生するバイオマスの熱による分解であり、これによって固体（木炭）、液体（熱分解油またはバイオ油）、及び気体生成物が生産される。3つの副産物の相対的な量は、プロセスで使用される作動温度及び滞留時間に依存している。中程度の温度（450～550°C）のバイオマス原材料の高速加熱では、含酸素油が主な生成物（70～80%）となり、残りはバイオ炭とガスに分かれる。低速熱分解（炭化としても知られる）は、開発途上国における伝統的ストーブ、西洋諸国におけるバーベキュー、ブラジルの鉄鋼業など、世界中で行われている（Bridgwater et al., 2003; Laird et al., 2009）。

**表 2.5:** バイオエネルギーの開発段階の例。固体リグノセルロース系及び含水廃棄物バイオマス、サトウキビまたはでんぷん作物の糖、植物油からの熱、電力、液体及び気体燃料の熱化学（黄）、生化学（青）、及び化学（ピンク）経路（IEA Bioenergy, 2009; Alper and Stephanopoulos, 2009; Regalbutto, 2009）。

種 物	生成物の種類	生成物またはシステムのプロセスの開発段階				
		基礎及び応用研究開発	実証	初期商業	商業	
低水分リグノセルロース系	圧縮バイオマス	乾燥	水熱油 (Hy 油)	熱分解油 (Py 油)	ペレット化	
	木炭	熱分解 (バイオ炭)			炭化	
	熱				小規模ガス化	燃焼ストーブ
						燃焼
	電力またはコジェネレーション				熱分解及び水熱油	家庭及び地域産業
		以下と組み合わせた燃焼				
				スターリング・エンジン	ORC <sup>1</sup>	蒸気サイクル
		石炭との混焼または共燃焼				
				間接	並行	直接
	ガス化 (G) または統合ガス化 (IG)					
統合ガス化燃焼電池		統合ガス化ガスタービン	ガス化及び蒸気サイクル			
統合ガス化燃焼サイクル						
含水廃棄物	熱、電力、または燃料	バイオガスへの嫌気性消化				
					2段階	埋め立て (1段階)
		微生物燃料電池		メタンへのバイオガス・アップグレード 水素 (H <sub>2</sub> ) への改質	小型肥料消化槽	
		油または気体燃料への水熱処理				
糖	燃料	微生物処理 <sup>2</sup>			糖発酵	
		H <sub>2</sub>	ガソリン、ディーゼル、及びジェット燃料	バイオブタノール <sup>3</sup>	エタノール	
粗	燃料	水素化		抽出及びエステル化		
		再生可能ディーゼル			バイオディーゼル	

注:

<sup>1</sup>ORC: 有機ランキンサイクル。<sup>2</sup>合成生物学的手法または代謝工学によって生成されるイソブタノール（または炭化水素）を作る遺伝子操作された酵母または細菌。<sup>3</sup>いくつかの四炭素アルコール類は、ガソリン、ディーゼル、灯油、ジェット燃料、及びその他の生成物の主要な化学的構成要素である。

バイオマス・ガス化は、加熱を行った上でバイオマスの部分酸化が起こった際に、発生する。これによって、エネルギー含量が 5~20MJ/Nm<sup>3</sup>（バイオマスの種類とガス化が空気、酸素、間接的加熱のどれによって行われたかに依存する）である一酸化炭素及び水素 (H<sub>2</sub>) に富んだ燃焼可能な気体混合物（発生炉ガスまたは燃料ガスと呼ばれる）が生成される。このエネルギー含量は、天然ガスの発熱量の約 10~45%である。そして、燃料ガスは、バイオマス合成ガスまたは単に合成ガスと呼ばれるより質の高い気体混合物にアップグレード出来る (Faaij, 2006)。ガスタービン、ボイラー、及び蒸気タービンは、電力併産にガス留分を使用するためのオプションである。発電機と組み合わせ、合成ガスは、適切に設計されたまたは適応した内部燃焼エンジンにおいて、ディーゼルに代わる燃料として利用することが出来る。一般的に利用可能なガス化装置は木材または木質バイオマスを使用しており、特別に設計されたガス化装置は非木質バイオマス材料を変換出来る (Yokoyama and Matsumura, 2008)。バイオマス・ガス化ストーブも、インドや中国などの多くの農村部産業において暖房及び乾燥目的で利用されている (Yokoyama and Matsumura, 2008; Mukunda et al., 2010)。燃焼と比較して、ガス化は効率がが高く、より制御された暖房、発電におけるより高い効率、及び化学物質と燃料の同時生産の可能性を実現する (Kirkels and Verbong, 2011)。

### 2.3.3.3 化学プロセス

エステル交換は、アルコール（メタノールであることが多い）が触媒（酸または塩基）によって植物油または動物性脂肪に含まれるトリグリセドと反応し、脂肪酸のアルキルエステル及びグリセリン副産物を形成するプロセスで

ある。植物油は通常、エステル交換に先立って機械破碎または化学溶剤によって種子から抽出される。一般的に、脂肪酸アルキルエステルは「バイオディーゼル」と呼ばれ、石油ディーゼル燃料と混ぜることが出来る。プロテインに富む残渣（ケーキとしても知られる）は、動物飼料または肥料として売られるが、より価値のある化学物質の合成に利用される場合もある（WWI, 2006; Bauen et al., 2009a; Demirbas, 2009; Balat, 2011）。

触媒存在下での植物油、動物性脂肪、または再生油の**水素添加分解**は、再生可能ディーゼル燃料（生産物としての石油ディーゼル及びプロパンと、どのような割合でも混ぜることが出来る炭化水素）を生産する。このプロセスには、触媒存在下での水素（一般的には石油精製所から発生したもの）と植物油または動物性脂肪の反応が含まれる（Bauen et al., 2009a）。これはエステル交換よりは開発及び普及の段階が若い、植物油及び動物性脂肪の水素添加分解は商業規模で実証されており、第一世代と考えることが出来る<sup>14</sup>。水素化バイオ燃料は、セタン価及び粘性が高く、硫黄分が低い（Knothe, 2010）。

#### 2.3.3.4 生化学プロセス

生化学プロセスは、より緩やかな条件下で反応を行うために様々な微生物を利用する。一般的に、熱化学プロセスよりも特異性が高くなる。この反応は微生物の代謝機能の一部であり、代謝工学によって特異的な生成物を目的として変更することが出来る（Alper and Stephanopoulos, 2009）。たとえば、発酵は低酸素または無酸素状態で酵母などの微生物が糖を代謝し、エタノールを生成するプロセスである。細菌の中でも、最もよく使用されるのは大腸菌であり、エタノール、乳酸などの生化学生成物の工業合成を行うために使用される。サッカロマイセス・セレヴィシエは、糖からの産業用エタノール生産に最もよく使用される酵母である。現在の生化学変換における主要な原材料は、サトウキビ、サトウモロコシ、及びでんぷん作物（トウモロコシ、コムギ、キャッサバなど）であり、このプロセスの主要な商業用生成物はエタノールである。エタノールは、主に低負荷輸送におけるガソリンの代替物として利用されている。

**嫌気性消化 (AD)** は、バイオガス（メタン（50～70%）と二酸化炭素の混合物）を生成する、無酸素状態における微生物集団による動物のふん尿、人間の排泄物、広葉樹材料、生活系固体及び液体廃棄物、食品加工廃棄物などに含まれる有機化合物の分解を伴う。このプロセスでは、廃棄物の有機画分が分離され、密閉容器（バイオガス消化槽）に収容される。消化槽内では、分離されたバイオマスが、嫌気性条件下でメタン生成細菌の存在下で生分解され、メタンに富むバイオガス及び排水を生成する。バイオガスは、調理と暖房、または複式燃料式エンジン、ガス・エンジン、低圧ガスタービンか蒸気タービンによる動力か電力の生産に利用することが出来る。バイオガスは、より熱含量の高いバイオメタン（85～90%メタン）への改質によってアップグレードし、天然ガス供給網に導入することも出来る（Bauen et al., 2009a; Petersson and Wellinger, 2009）。安定化後の嫌気性消化からの残渣は、有機耕土または肥料として利用することが出来る。残渣は、投入された廃棄物の組成によって、肥料として売ることが出来る。

インド、中国など、多くの開発途上国が、地方において大規模に嫌気性消化技術を使用している。多くのドイツ及びスウェーデンの企業が、大規模バイオガス工場技術において市場リーダーとなっている（Faaij, 2006; Petersson and Wellinger, 2009）。スウェーデンでは、複数の廃棄物及び肥料（共同消化）も利用されており、バイオガスがバイオメタン（天然ガス・パイプラインで供給でき、車両で直接使用することも可能なメタン含有量の高いガス）にアップグレードされている<sup>15</sup>。

### 2.3.4 バイオエネルギーシステム・チェーン: 既存の最先端システム

表 2.6 及び 2.7 では、エネルギー製品、原材料、主要なプロセス、現在の効率、推定される将来的な効率（2020～2030）、推定される現在及び将来（2020）の生産コストごとの、現在の様々な国において稼働中の関連する商業バイオエネルギー・システムの文献からの例を示している。現在の市場及びポテンシャルは 2.4 節で検討している。

表 2.6 及び 2.7 で示す生産コストは、文献データの一致を行わず、利用可能な文献から直接得たものである。というのも、複数の生産物を分析する場合を除いて、基礎となる技術経済的パラメータは、必ずしも相当する生産コストを達成出来る具体的な条件を評価するのに十分な透明性を持っているわけではないためである。2.7 節は、様々なバイオエネルギー・システムの均等化原価に関する補足的な情報を示し、Annex II に明示される方法及び要約される想定に基づき、具体的なコスト決定要因を解説している（表 2.6 及び 2.7 に含まれる、基礎となる想定のうち、Annex III で示すデータへのインプットとして使用されているものはわずかである点に注意）。

#### 2.3.4.1 電力、コージェネレーション、及び熱のためのバイオエネルギー・チェーン

<sup>14</sup> 世界中で多くの企業が特許及び実証施設を持ち、ディーゼルを目的として商業規模でこの技術の試験を行っており、例としてはシンガポールにある Neste Oil の商業施設などが挙げられる（Bauen et al., 2009a; Bacovsky et al., 2010b）。

<sup>15</sup> リンチェピングの例（[www.iea-biogas.net/download/linkoping\\_final.pdf](http://www.iea-biogas.net/download/linkoping_final.pdf)）などを参照（IEA Bioenergy Task 37 success story）。

バイオマスからの液体バイオ燃料は、熱及び電力目的で使用される場合、固体バイオマスよりも生産コストが高くなる（2～5US ドル/GJ（2005年）以下）。未加工固体バイオマスは、前処理されたもの（高密度化によるもの。10～20US ドル/GJ（2005年））で取引される木材ペレットなどよりもコストが低くなるが、輸送コストが高くなる。そのため、両方の種類の固体バイオマス市場が開発されている（2.3.2.2.2.2 及び 2.3.2.3 節）。規模の経済性により、大規模に有用性が実証された具体的な技術（発電目的の燃焼など）の中には、費用対効果が高い形で小規模用途に直接利用出来ないものもある。そのため適した代替技術を見つけることが必要になり、通常、炭素質燃料を用いた既存の技術が適用される。これは、商業段階に入っている有機ランキンサイクル、及びまだ開発段階にあるスターリング・エンジン技術、またはエンジンと組み合わせられる燃焼からガス化への転換に当てはまる（IEA, 2008a）。

熱分解からの中間液体燃料は、輸送可能な燃料であるため、混焼用途における発展中の暖房及び電力の一部であり（表 2.6 を参照）、定置電力用及び輸送燃料へのアップグレード用に研究が進められている（2.3.3.2 及び 2.6.3.1 節を参照）。熱分解油は、少量特殊化学物質の商業的供給源である（Bridgwater et al., 2003, 2007 を参照）。

多くのバイオエネルギー・チェーンでは、そのシステムにおいてコジェネレーションを採用しており、ここでは発電の副産物として発生した熱が、プロセス加熱需要を満たすために蒸気として利用される（全体効率は 60% またはそれより高い場合（90%以上）もある）（IEA, 2008a; Williams et al., 2009）。燃料としてバガスを使用した高温及び高压蒸気発生に利用可能な技術によって、サトウキビ圧搾機をより高い水準のエネルギー効率の下で稼働させたり、それが必要とする量よりも多くの電力を生産したりすることなどが可能となる。サトウキビ・バガスはプロセス熱及び電力に利用されており、サトウキビの機械収穫からのサトウキビ農場残渣の利用も増えてきている（Maués, 2007; Macedo et al., 2008; Dantas et al., 2009; Seabra et al., 2010）。これらの利用によって、2009年にはブラジルの電力の 5%がバガス・コジェネレーションによって供給されていた（EPE, 2010）。同様に、黒液（パルプ化化学物質を含む有機パルプ化生成物）は、紙パルプ工業で生産されており、ボイラーで効率的に燃やされ、プロセス熱として利用されるエネルギーを生産している（Faaij, 2006）。北ヨーロッパ及びヨーロッパ諸国におけるコジェネレーション・ベース地域暖房も非常に普及している。

直接燃焼と比較してより効率的な固体バイオマスの利用法である、非バイオマス燃料を用いた混焼（共燃焼）など、相当数の発電方法が利用可能である。規模の経済性により、場所によっていくらか異なるものの、一般的に小型施設における熱及び電力の供給は、大型のシステムよりも生産コストが高くなる。利用可能な熱及び電力システムには、様々な規模があり、効率も高い。現在、バイオガスのガス化によって、産業用途、コジェネレーション及び共燃焼において、年間約 1.4GW<sub>th</sub> が供給されている（Kirkels and Verbong, 2011）。小型のシステムは調理ストーブ及び嫌気性消化システムから小型のガス化装置まで多岐に渡り、時間とともに効率が向上してきている。いくつかのヨーロッパ諸国は、固体バイオマス、都市廃棄物及び家畜ふん尿の混合物を用いて電力または質の高いメタンを生産する消化システムを開発中である。最も小さい規模では、バイオマスの主な利用目的は照明、暖房及び調理である（表 2.6 を参照）。

土地及び労働コスト、バイオマス分布密度、及び季節変動など、多くの地域固有の要因によって、バイオエネルギーキャリアの生産コストが決まる。また、その他の市場及び用途も部分的にバイオマスの価値を決定する。多くのバイオエネルギー・システムにおいて、バイオマス供給コストは、総生産コストの大きな割合を占めている。バイオ燃料変換技術の規模、地域の規制、及び環境基準も、国によって大きく異なる可能性がある。気候条件（冬季の地域暖房など）、作物収穫サイクル（サトウキビ収穫サイクル及び気候の影響など）などによって、変換システムの動作（負荷率など）も異なっている。その結果、技術及び資源の種類のみではなく、多くの地域的要因に影響を受け、生産コストの幅は広がっている（2.7 節及び Annex III に示すこの幅の例を参照）。

#### 2.3.4.2 液体輸送燃料のバイオエネルギー・チェーン

液体輸送燃料のバイオエネルギー・チェーンも同様に多様であり、以下に 3つの小区分に分けて説明している。その小区分は、(1) サトウキビからの統合されたエタノール、電力、及び糖、(2) エタノール及び飼料生産物、(3) バイオディーゼルである。また、ここでは原材料及び地域ごとの 2008～2009 年のバイオ燃料生産コストも取り上げている。液体バイオ燃料は主に輸送部門で使用されているが、多くの開発途上国及びいくつかの先進国において、発電及びピーク電力の生産にも使用されている。

##### サトウキビからの統合されたエタノール、電力、及び糖

サトウキビからのエタノールは、主に圧搾汁及び糖蜜またはサトウキビ圧搾機の副産物から作られる。発酵は、単一バッチ、フェドバッチまたは連続プロセスで行われており、後者は酵母を再利用出来るため、広く普及し始めており、効率も高い。ブラジルでは、発酵液中のエタノール含有量は、7～10%となっており（BNDES/CGEE, 2008）、後に蒸留され、純度は約 93%に達する。ほとんどの用途においてガソリンと混合させるためには、エタノールは無水にしななければならない、混合物を 99.8～99.9%のレベルまでさらに脱水する必要がある（WWI, 2006）。

## エタノール及び飼料生産物

トウモロコシから製造されたエタノール燃料向けの主な乾式粉碎（または乾式研削）プロセス（88%がアメリカの生産）は、全粒を粗挽きの粉末（スラリーにされる）にするハンマー・ミリングに始まり、次にアルファ及びアマミラーゼ酵素を用いて加水分解されてデキストリンを形成して、続いてグルコアミラーゼによって加水分解されグルコースを形成し、最終的にグルコースが酵母によって発酵する（最後の2つのプロセスは組み合わせることが出来る）。副産物は、可溶分を有する蒸留穀物残渣（動物飼料）である（McAloon et al., 2000; Rendleman and Shapouri, 2007）。これは、バイオリファイナリー周辺の飼育場に水分を保ったまま売るか、安定化のために乾燥させて売ることが出来る。最も一般的なプロセス熱源は天然ガスである。1980年代初期から2005年にかけて、北アメリカにおける平均的な乾式粉碎施設のエネルギー量は、生産が倍増するごと（累積）に14%ずつ減少してきた（学習率。表 2.17; Hettinga et al., 2007, 2009 を参照）。それ以降、累積で10回倍増しており（2.7.2 節も参照）、この産業はコジェネレーションなどによってエネルギー効率を向上させ続けている（(S&T)<sup>2</sup> Consultants, 2009）。この改善及びその他のプロセスの改善の影響は継続すると推定されており、2022年までに生産コストは2009年の17.5USドル/GJ（2005年）から減少し16USドル/GJ（2005年）になると予測されている（EPA, 2010）。表 2.7 は、低温で行われるエタノールの膜分離から酵素までのプロセスなどの改善の例を示している。トウモロコシ乾式粉碎と同様のプロセスの1つに、コムギからエタノールまでのプロセスがある。それは、麦芽製造段階から始まり、酵素または酸加水分解によって発酵用の糖が生成される。

## バイオディーゼル

バイオディーゼルは、アブラナやダイズのような油糧種子作物または油糧種子ヤシなどの木から生産される。また、調理油または動物性脂肪からの様々な油脂及び廃棄物からも生産されている。低コストの廃棄物から高価な植物油までにわたる、この幅広い原材料によって、元の油糧種子植物の特性に準じた、より価値のある特性を持ったバイオディーゼル燃料が生産される。様々な非食用油糧種子植物がそうであるように、燃料基準の統一はまだ開発途上である（Knothe, 2010; Balat, 2011）。生産地域の例は、図 2.7 に示されている。

## 複数の原材料及び世界の地域における 2008～2009 年のバイオ燃料コストのスナップショット

糖（糖蜜）の製造からの廃棄物や加工残渣などの様々な原材料に基づく、様々な世界の地域における 2008～2009 年（主に 2009 年）のバイオ燃料生産コストの幅のスナップショットが、図 2.7 に示されている。このスナップショットは、APEC（アジア太平洋経済協力）諸国における最近のコスト比較（Milbrandt and Overend, 2008, 改訂版）<sup>16</sup>や表 2.7 のデータ<sup>17</sup>などの様々な文献に基づいている。これらの国の生産量については図 2.9 を参照のこと。エタノール生産の場合、原材料コストが総生産コストの約 60～80%を占めており、油糧種子から得たバイオディーゼルの場合はその割合がより高くなる（80～90%）（2008～2009 年のデータ）。この期間において最も生産コストが低いのは、ラテンアメリカ及び中央アメリカのサトウキビエタノールであり、それにアジア、太平洋、及び北アメリカのでんぷん作物、ヨーロッパ連合（EU）のテンサイ、EUの穀物の順で続いている。糖蜜の生産コストは、インド及び太平洋諸国において、その他のアジア諸国よりも低くなっている。バイオディーゼル生産の場合、ラテンアメリカのコストが最も低く、それにその他のアジア諸国のアブラヤシ、その他のアジアのダイズ及びアブラナ、北アメリカのダイズ、EUのアブラナの順で続いている。一般的に、バイオディーゼルの生産コストはエタノールよりもいくらか高いが、インドネシアとマレーシア、アルゼンチンなどのより生産性が高い植物またはコストの低い基盤を有する国ではエタノールに匹敵する可能性がある。

<sup>16</sup> この研究では、バイオ燃料生産、原材料利用可能性、経済性、燃料補給インフラ、代替燃料車両の使用、貿易、及び政策を扱っている。

<sup>17</sup> ここで示されている生産コストの幅は、2.7 節で要約したもの及び Annex III で詳述したものよりも地理的分布の幅が広い様々な廃棄物及び原材料を含んでいる。Annex III のデータは、コスト、投資資本、副産物、及び資金面の前提が異なるいくつかの原材料の広い幅を扱っている。この透明性の高い技術経済データにより、読者は前提を変え、特定の地域における大まかな生産コストを再計算することが出来る。

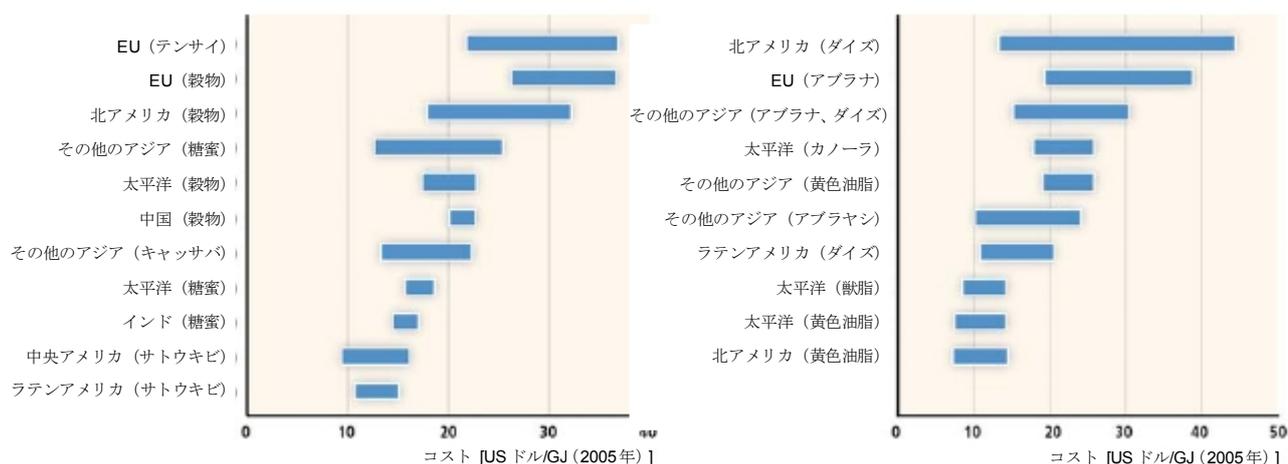


図 2.7: Milbrandt and Overend (2008) 及び表 2.7 に基づく、様々なバイオマス原材料及び廃棄物からのエタノール及びバイオディーゼルの現在 (2008~2009 年) の推定生産コストの地域的幅のスナップショット

注:

北アメリカのダイズ・ディーゼルの幅の上限は、Bauen et al. (2009a) の一点推定値によるものである。他の推定値の幅は 12~32US ドル/GJ (2005 年) である。

表 2.7 に示す予測される効率の増加に基づけば、原材料の改善 (主に生産性) (2.6.1 節も参照) 及びその生成物への変換にはまだ大きな余地がある。アメリカのバイオ燃料生産の分析において、米国環境保護庁 (EPA) は、Forest and Agricultural Sector Optimization Model (FASOM) に基づいてコストを予測し、改善の余地が大きいことを発見した (表 2.7; EPA, 2010 を参照)。IEA は、2030 年までの経済協力開発機構 (OECD) 諸国におけるアブラナ・バイオディーゼルのコスト削減を同様に推定した (IEA Bioenergy, 2007)。2.7 節では、過去及び将来のコスト予想についてさらに考察している。

### 2.3.5 合成

現在商業化されている技術の中でも主要となっているのは、熱生産 (家庭での調理から地域暖房まで含む)、燃焼によるバイオマスからの発電、コジェネレーション、バイオマスと化石燃料の混焼、油糧作物からの第一世代液体バイオ燃料 (バイオディーゼル)、糖及びでんぷん作物からの第一世代液体バイオ燃料 (エタノール) である。いくつかのバイオエネルギー・システムは、競争力のある形で展開されてきている。中でも注目すべきは、廃棄物及び残渣によるサトウキビエタノール、熱及び電力生産である。その他のバイオ燃料でも、コスト及び環境への影響の削減が図られており、規模も大きくなったが、まだ政府による補助金を必要とする状態である。

近代的バイオエネルギー・システムには、幅広い原材料の種類、農業と林業の残渣、様々な有機性廃棄物、及び専用作物及び多年生植物システムが含まれる。既存のバイオエネルギー・システムの大部分は、熱及び電力の生産においては木材、残渣、及び廃棄物に、液体バイオ燃料の場合は農業作物に依存している。原材料の経済性及び収穫量は、世界の地域及び原材料の種類によって大きく異なっている。単位面積当たりのエネルギー収量の幅は、バイオ燃料原材料の場合は 16~200GJ/ha (1.6~20TJ/km<sup>2</sup>)、リグノセルロース系原材料の場合は 80~415GJ/ha (8~41.5 TJ/km<sup>2</sup>)、残渣の場合は 2~155GJ/ha (0.2~15.5TJ/km<sup>2</sup>) で、コストの幅は 0.9~16US ドル/GJ/ha (2005 年) (0.09~1.6US ドル/TJ/km<sup>2</sup> (2005 年)) となっている。原材料の生産は林業及び食料部門と競合するが、農林業や混作などの統合生産システムの設計によって追加的な環境サービスとともに相乗効果が得られる可能性がある。

生産場所から変換施設までのバイオマスの取り扱い及び輸送は、バイオエネルギー生産の総コストの 20~50% を占める可能性がある。規模の増大、イノベーション、及び競争の激化などの要因が、サプライチェーンの経済及びエネルギーコストの 50% 以上の削減に寄与してきた。輸送距離が 50km を超える場合、ペレット化またはブリケットリングを通じた高密度化が必要になる。圧縮原材料の輸送の国際的なコストは、貿易の影響を受けやすく、ペレット燃料の場合は 10~20US ドル/GJ (2005 年) になり、いくつかの地域において他の市場燃料に対して競争力を有する。これによって、そのような市場が増加してきている理由が説明出来る。バイオマスから作られた木炭は、開発途上国における主要な燃料であり、より効率の高いキルン及び高密度化技術の適用によって恩恵を受けることは確かである。

相当数の発電方法が利用可能であり、混焼 (共燃焼) が直接燃焼と比較して相対的に効率の良い固体バイオマスの使用方法である。場所によっていくらか異なるが、通常、小型施設は、大型システムよりも生産コストが高くなる。利用可能な熱及び電力システムの規模及び効率は様々である。現在、バイオガスのガス化によって、産業用途、コ

ジェネレーション及び共燃焼において、約 1.4GW<sub>th</sub> が供給されている。小型のシステムは調理ストーブ及び嫌気性消化システムから小型のガス化装置まで多岐に渡り、時間とともに効率が向上してきている。いくつかのヨーロッパ諸国は、固体バイオマス、都市廃棄物及び肥料の混合物を用いて電力または質の高いメタンのアップグレードによって生産する消化システムを開発中である。輸送システムなど、多くの用途が開発中であり、その有効性をさらに向上させるポテンシャルがある。小規模の技術（主に暖房用ストーブ）も改良を続けているが、普及の速度は遅い。

サトウキビ、テンサイ、及び穀物由来エタノールの生産の効率は、ブラジル、アメリカ、EU などの主要な生産国において高い水準に達している。中央南ブラジルのエタノール産業は、大幅にコジェネレーション効率を上昇させ、2009 年には国全体の電力の 5% を供給している。製糖からの廃棄物によるエタノールの開発は、インド、太平洋、及びその他のアジア諸国で行われており、それらの国では比較的成本の低いエタノールを生産出来るが、生産量は限られている。廃脂肪及び油脂からのバイオディーゼルの生産は、アブラナ及びダイズによるものよりも原材料コストは低くなるが、廃脂肪及び油脂の量は限られている。

バイオ燃料生産の経済性は、バイオ燃料産業の将来的な拡大において非常に重要である。持続可能なバイオ燃料の将来的な開発は、経済的、環境的、及び社会的基準を含むバランス・スコアカードにも依存している（2.5 節を参照）。技術的、経済的、社会的、境的、及び法的課題の解決は、現在でもバイオ燃料のさらなる発展において重要である。世界の市場及び産業の発展については、次節で説明している。

**表 2.6:** 利用可能な文献データから直接得た、世界の地域の様々な規模における、廃棄物からの電力、熱、及びバイオメタンのバイオエネルギー・チェーンの現在及び予測の推定生産コスト及び効率

原材料、国、及び地域	主要なプロセス	効率、用途、及び生産コスト; Eff.=バイオエネルギー・バイオマスエネルギー US ドル/GJ (2005年) 換算での部品コスト	推定生産コスト US ドル/GJ (2005年) US セント/kWh (2005年)	潜在的な進歩 US ドル/GJ (2005年) US セント/kWh (2005年)
丸太、残渣、チップ/農業残渣/世界	石炭との混焼	5~100MW <sub>e</sub> 、Eff.=30~40%以下 <sup>1,2</sup> 。50 超の発電所が、丸太または残渣を使用して運転または実験運転を行った。そのうち 16 個が運転可能であり石炭を使用している。20 超の微粉炭発電所が稼働している <sup>3</sup> 。木材チップ（藁）は、石炭との混焼で少なくとも 5（10）の稼働中の発電所で利用されている <sup>3</sup> 。	8.1~15 2.9~5.3 投資コスト (US ドル/kWh): 100~1,300 <sup>1</sup>	前処理、特性化及び測定方法の改善による燃料コストの削減 <sup>4</sup> 。半炭化バイオマスは、固体単一生成物である。含水率が低くてエネルギー含量が高く、微粉炭発電所における混焼により適している <sup>3</sup> 。石炭発電所向けのコスト削減及び耐腐食材料が必要である <sup>5</sup> 。
丸太、残渣、チップ/農業残渣 /世界	直接燃焼	10~100MW <sub>e</sub> 、Eff.=20~40%以下 <sup>1,2</sup> 。スカンジナビア及び北アメリカで非常に普及している。様々な先進概念によって、高い効率、低いコスト、及び高い柔軟性が実現している <sup>2</sup> 。主要な変数はバイオマスの供給コストである <sup>2</sup> 。	20~25 7.2~9.2 投資コスト (US ドル/kWh): 1,600~2,500 <sup>1</sup>	アメリカの 2020 年のコスト予測: <sup>6</sup> 6.3~7.8 ストーカ燃焼式ボイラー: 7.5~8.1
一般廃棄物/世界	直接燃焼（ガス化及び石炭との混焼）	50~400MW <sub>e</sub> 、Eff.=22%以下 <sup>1,2</sup> 。低温蒸気による腐食の回避 <sup>7,8</sup> 。商業的に導入された焼却は、投資コストが高く、(平均) 効率が低い <sup>2</sup> 。4 つの石炭発電所で一般廃棄物を混焼している <sup>3</sup> 。	9.1~26 3.3~9.4 <sup>7</sup>	一般廃棄物を用いた新しいコージェネレーション設備の設計では、コージェネレーションの電気効率及び全体効率がそれぞれ 28~30%、85~90% に達すると予想されている。
木材/農業残渣 /世界	小型/ガスエンジン・ガス化	5~10MW <sub>e</sub> 、Eff.=15~30%以下 <sup>1,2</sup> 。第一世代概念は資本集約的であることが分かっている <sup>2</sup> 。	29~38 10~14 投資コスト (US ドル/kWh): 2,500~5,600 <sup>1</sup>	ガス化の効率及び統合システムのパフォーマンスの向上。タール及び排出量の削減 <sup>1</sup> 。
木材ペレット/EU	直接石油共燃焼・共ガス化	12.5~300MW <sub>e</sub> <sup>9</sup> 。石炭との混焼において、2 つの稼働中の発電所で使用されている <sup>3</sup> 。コストは、出荷サイズ及び距離に大きく依存する <sup>9</sup> 。	14~36 5.0~13 <sup>9,10</sup>	PELLETS@LAS Pellet Handbook 及び www.pelletsatlas.info を参照のこと。
熱分解油/EU	石炭混焼/ガス化	12.5~1,200MW <sub>e</sub> <sup>9</sup> 。コストは、出荷サイズ及び距離に大きく依存する <sup>9</sup> 。	19~42 7.0~159 <sup>9,10</sup>	ディーゼル混合燃料における直接的な使用を可能にする直接的な従来型石油精製の統合やアップグレードプロセスを開発 <sup>1</sup> 。
薪/ほとんどは開発途上国	熱目的の燃焼	0.005~0.05MW <sub>th</sub> 、Eff.=10~20%以下 <sup>2</sup> 。伝統的な装置は効率が悪く、屋内汚染が発生する。燃料の使	投資コスト (US ドル/kWh):	効率が 35~50%の新しいストーブも、屋内空気汚染を 90%以上削減出

原材料、国、及び地域	主要なプロセス	効率、用途、及び生産コスト; Eff.=バイオエネルギー・バイオマスエネルギー USドル/GJ (2005年) 換算での部品コスト	推定生産コスト USドル/GJ (2005年) USセント/kWh (2005年)	潜在的な進歩 USドル/GJ (2005年) USセント/kWh (2005年)
		用量を減らし(最大で60%)、屋内汚染を70%削減する、改良された調理ストーブが利用可能である。住宅用の利用(調理) <sup>2</sup> 。	100 <sup>2</sup>	来る <sup>2</sup> 。2.5.7.2節を参照のこと。
		近代的な炉の場合、1~5MW <sub>th</sub> 、Eff.=70~90%以下 <sup>2</sup> 。既存の産業は、汚染度の高い低効率のキルンを使用している <sup>11</sup> 。	投資コスト (USドル/kW): 300~800 <sup>2</sup>	改良されたキルンの利用がより広まることで、消費を50~60%抑え、汚染を緩和することが出来る <sup>11</sup> 。
有機性廃棄物/一般廃棄物/世界	メタン回収を伴う埋め立て	Eff.=10~15%以下(電力) <sup>2</sup> 。電力目的のため広く利用されており、多くの国の廃棄物処理政策の一環となっている <sup>2</sup> 。	バイオガス 1.3~1.7 <sup>12</sup>	効率の向上が継続すると予想される。
有機性廃棄物/一般廃棄物/肥料/スウェーデン/EUで拡大	嫌気性共消化、ガス浄化、圧縮、及び供給	均質な含水有機性廃棄物流及び排水に広く利用されている <sup>2</sup> 。有機性家庭廃棄物などの不均質な含水廃棄物における利用はそれより少ない <sup>2</sup> 。	燃料: 2.4~6.6 <sup>13</sup> 電力: 48~59 <sup>1</sup> 17~21 <sup>1</sup>	バイオマスの前処理、バイオガス洗浄プロセス、高温プロセス、及び生物学的消化の改善(すでに研究開発段階にある) <sup>1,17</sup> 。
		コストは、肥料副産物の販売の控除を織り込んでいない <sup>14</sup> 。	燃料: 15~16 投資コスト (USドル/kW): 13,000 <sup>14</sup>	スウェーデン(その他のEU諸国)における商業利用の場合、カリフォルニア州の研究では、天然ガス分布の増大のポテンシャルが示されている <sup>14</sup> 。
ふん尿/世界	家庭消化	調理、暖房、及び電力用途。副産物である液体肥料がコスト控除可能。	回収期間は1~2年	ジオメンブレンを使用したコストの大幅な削減。設計の改良及び消化時間の短縮 <sup>15</sup> 。
ふん尿/フィンランド	農場	農場からのバイオガス 0.018~0.050 MW <sub>e</sub> <sup>16</sup>	電力: 77~110 投資コスト (USドル/kW): 14000~23000 <sup>16</sup>	設計の改良及び消化時間の短縮。微生物の複雑なコンソーシアの嫌気性消化及びメタゲノミクスの理解の向上 <sup>12</sup> 。
ふん尿/食料残渣	農場/食品産業	家畜残渣及び食品加工残渣からのバイオガス 15~0.29 MW <sub>e</sub> <sup>16</sup>	電力: 70~89 投資コスト (USドル/kW): 12000~15000 <sup>16</sup>	

略語: Inv.=Investment; Elec.=Electricity. 参考文献:

<sup>1</sup>Bauen et al. (2009a) ; <sup>2</sup>IEA Bioenergy (2007) ; <sup>3</sup>Cremers (2009) (IEAの共燃焼データベースを参照: www.ieabcc.nl/database/cofiring.php) ; <sup>4</sup>Econ Poyry (2008) ; <sup>5</sup>Egsgaard et al. (2009) ; <sup>6</sup>NRC (2009b) ; <sup>7</sup>Koukouzas et al. (2008) ; <sup>8</sup>IEA (2008a) ; <sup>9</sup>Hamelinck (2004) ; <sup>10</sup>Uslu et al. (2008) ; <sup>11</sup>REN21 (2007) ; <sup>12</sup>Cirne et al. (2007) ; <sup>13</sup>Sustainable Transport Solutions (2006) ; <sup>14</sup>Krich et al. (2005) ; <sup>15</sup>Müller, (2007) ; <sup>16</sup>Kuuva and Ruska (2009) ; <sup>17</sup>Petersson and Wellinger, 2009.

**表 2.7:** 利用可能な文献データから直接得た、様々な国における商業用バイオ燃料の現在及び予測の推定生産コスト及び効率。化石燃料と比較したこれらの経路による温室効果ガス排出量の直接的削減の幅も示している（温室効果ガス排出量の詳細な考察については、2.5節を参照）。パート A と B は、それぞれエタノール、バイオディーゼル燃料を扱っている。

**A: エタノール**

原材料/プロセス	国/地域	効率、用途、及び生産コスト; Eff.=バイオエネルギー・ バイオマスエネルギー USドル/GJ (2005年) 換 算での部品コスト	推定生産コスト USドル/GJ (2005年)	化石参照 (FR) からの直 接的温室効果ガス削減 (%)	コスト、削減、及び効果の 面における潜在的な進歩 USドル/GJ (2005年)
エタノールになるサトウ キビの圧搾及び絞り汁の 発酵、プロセス熱及び電力 になり、電力販売目的のも のも増えているバガス	ブラジル	Eff.=38%以下 <sup>1</sup> , 41%以下 (エタノールのみ); <sup>2</sup> 1.7 億 l/年、FC: 11.1; CC ※: 3.7 CR.抜き <sup>2</sup>	14.8 (CR.抜き) <sup>2</sup>	79~86% (CPC 抜き及び 含む); FR: ガソリン <sup>4</sup>	9~10 <sup>1</sup> . Eff.=50%以下 <sup>5</sup> . サトウキビの藁及び葉の 収穫の機械化及び効率的 な利用 <sup>6</sup> . 複数の生産物を 有するバイオリファイナ リー <sup>5</sup> . 酵母の改善。
	オーストラリア	Eff.=38%以下 <sup>1</sup> , 41%以下 (エタノールのみ)、FC: 24.8; CC※: 7 CR.抜き <sup>3</sup>	31.8 (CR.抜き) <sup>3</sup>		
エタノール、動物用の飼料 (DGS) のためのトウモロ コシ穀粒乾式製粉プロセ ス		Eff.=62%以下; <sup>2,8</sup> 生産の 89% <sup>5</sup> . 水分を含んだまま売られ る副産物飼料 DGS 30% <sup>5,8</sup> . 2.5 億 l/年 (工場)、FC: 14.1 <sup>2</sup> ~29.4 <sup>11</sup> ; CC※: 6 及 び CR: 3.8~4.4. <sup>2</sup>	20~21 (CR 含む) <sup>2,15,19</sup> 17.5 <sup>5</sup> 31 (CR.含む) <sup>11</sup>	35~56% (様々な CPC 方 法の場合); FR: ガソリン 35% (シス テム拡大); プロセス熱: NG (天然ガ ス). <sup>12,13</sup>	Eff.=64%以下 <sup>11</sup> 産業 Eff. =65~68%以下。 推定生産コスト: 16. <sup>5,8</sup> ア メリカは、低温でんぷん酵 素加水分解及び発酵、トウ モロコシ乾式分別、90%の 製粉所における油からの バイオディーゼル、膜エタ ノール分離、及びコジェネ レーションを計画してい る <sup>5</sup> .
	フランス	1.7 億 l/年、FC: 29.3; CC ※: 10.5 及び CR: 5 <sup>11</sup>	34.8 (CR.含む) <sup>11</sup>	60% <sup>9,14</sup>	
エタノール、飼料 (DGS) になるトウモロコシと同 様のコムギ	EU (英国)	Eff.=53~59%以下 <sup>11,16</sup> . 2.5 億 l/年 (工場)、FC: 36.2; CC※: 10.5 及び CR: 6 <sup>11</sup> .	40.7 (CR.含む) <sup>11</sup>	40% (エネルギーになる DGS) <sup>17</sup> 2~80% (エネルギーにな る DGS を含む)	2020年の Eff.=64%以下 <sup>11</sup>

				-8~70% (飼料になる DGS を含む) <sup>18</sup>	
	オーストラリア (廃棄物から)	3 千万 ㎏/年 (工場)、FC: 14.4; CC※: 8.6 及び CR: 0.2. <sup>3</sup>	22.8 (CR.含む) <sup>3</sup>	55% (コムギでんぷん NG)、27% (麦炭)、59% (藁の燃焼を含むコムギ) <sup>3</sup>	
エタノール及び残渣になるサトウキビの破碎及び糖の発酵	EU (英国)	Eff. = 12% 以下 <sup>1,16,19</sup> 。2.5 億 ㎏/年 (工場)、FC: 21.6; CC※: 11 及び CR: 8.2 <sup>11</sup> 。	24.4 (CR.含む) <sup>11</sup>	28~66%、代替的な副産物の利用 <sup>17,18</sup>	2020 年の Eff. = 15% 以下 <sup>1</sup>
エタノールになるキャッサバのマッシング、加熱、発酵	タイ及び中国	タイのプロセスでは、3,800 万 ㎏ が使用され、生産性は 20~21 t/ha に達している <sup>16,20,21</sup> 。中国の稼働中のエタノール工場は十分な容量を備えていない <sup>22</sup> 。	タイ: 26 <sup>23</sup>	タイ: 45% <sup>24</sup> 中国: 20% (嫌気性消化エネルギー含む) <sup>25</sup>	
糖生産の糖蜜副産物	タイ/オーストラリア	タイでは、糖蜜の約 3% がエタノールに使用出来る。FC: 10.9 及び 10; CC※: 10.1 及び CR: 5.7. <sup>23</sup>	タイ: 21 <sup>23</sup> オーストラリア: 16 <sup>3</sup>	27~59% (副産物の控除方法による) (オーストラリア) <sup>26,27</sup>	

## B: バイオディーゼル

原材料/プロセス	国	効率、用途、及び生産コスト; Eff. = バイオエネルギー及びバイオマスエネルギー US ドル/GJ (2005 年) 換算での部品コスト	推定生産コスト US ドル/GJ (2005 年)	化石参照 (FR) からの直接的温室効果ガス削減 (%)	コスト、削減、及び効果の面における潜在的な進歩 US ドル/GJ (2005 年)
アブラナ	ドイツ	Eff. = 29% 以下; 総合システムの場合、藁の余剰分が発電に利用されると想定 <sup>27</sup> 。	31~50 <sup>1</sup>	31~70% (代替的な副産物の利用) <sup>9,17,28</sup>	25~37 for OECD <sup>1</sup>  生体触媒を用いた新しい手法; 超臨界アルコール反応 不均一系触媒または生態触媒。グリセリンの新しい利用法。原材料生産性の向上 <sup>30</sup> 。
	フランス	55GJ/ha/年 (EU)、2.2 億 ㎏/年 (工場)、FC: 40.5; CC※: 2.7 及び CR: 1.7 <sup>11</sup>	41.5 (CR.含む) <sup>11</sup>		
	英国	2.2 億 ㎏/年 (工場)、FC: 35.6; CC※: 4.2 及び CR: 11.3 <sup>11</sup>	28.5 (CR.含む) <sup>11</sup>		

アブラヤシ	インドネシア マレーシア アジア諸国 <sup>20</sup>	163GJ/ha/年、2.2 億 円 /年 (工場)、FC: 25.1; CC※: 2.7 及び CR: 1.7 <sup>11</sup>	26.1 (CR.含む) <sup>11</sup>	35～66% (代替的な副産物の利用) <sup>31</sup> (熱帯休閑地、電力になる残渣、良好な管理) <sup>28</sup>	
植物油	109 ケ国	コストにおいては、いくつかの生産コストが高い国は除外されている。FC: 0.6 ～21; CC※: 2.3～3.7 及び CR: 0 ～6.2. <sup>3,11,29</sup>	4.2～17.9. <sup>3,11,31</sup>	該当なし	アメリカは、2020 年の廃油エステル・コストを 14 と予測している <sup>5</sup> 。119 ケ国で約 500 億 円 と予測されている <sup>29</sup> 。

略語: ※変換コスト (CC) には、投資コスト及び操業費が含まれる; CR=副産物収入; CPC=副産物控除; FC=原材料コスト; FR=化石参照; NA=該当なし

参考文献: <sup>1</sup>IEA Bioenergy (2007a) ; <sup>2</sup>Tao and Aden (2009) ; <sup>3</sup>Beer and Grant 2007; <sup>4</sup>Macedo et al. (2008) ; <sup>5</sup>EPA (2010) ; <sup>6</sup>Seabra et al. (2010) ; <sup>7</sup>UK DfT (2003) ; <sup>8</sup>Rendleman and Shapouri (2007) ; <sup>9</sup>Bessou et al. (2010) ; <sup>10</sup>Wang et al. (2011) ; <sup>11</sup>Bauen et al. (2009a) ; <sup>12</sup>Wang et al. (2010) ; <sup>13</sup>Plevin (2009) ; <sup>14</sup>Ecobilan (2002) ; <sup>15</sup>Bain (2007) ; <sup>16</sup>Fulton et al. (2004) ; <sup>17</sup>Edwards et al. (2008) ; <sup>18</sup>Edwards et al. (2007) ; <sup>19</sup>Hamelinck (2004) ; <sup>20</sup>Koizumi and Ohga (2008) ; <sup>21</sup>Milbrandt and Overend (2008) ; <sup>22</sup>GAIN (2009a; for China) ; <sup>23</sup>GAIN (2009c; for Thailand) ; <sup>24</sup>Nguyen and Gheewala et al. (2008) ; <sup>25</sup>Leng et al. (2008) ; <sup>26</sup>Beer et al. (2001) ; <sup>27</sup>Beer et al. (2000) ; <sup>28</sup>Reinhardt et al. (2006) ; <sup>29</sup>Johnston and Holloway (2007) ; <sup>30</sup>Bhojvaid (2007) ; <sup>31</sup>Wicke et al. (2008)