

エネルギー資源作物と バイオ燃料変換技術の研究開発動向

地球温暖化問題を克服し、持続的な経済発展を実現する上で、再生可能なバイオマス資源の活用拡大が求められており、特に石油代替燃料としてバイオ燃料普及拡大の動きが世界各国で活発化している。

海外では、米国、EU、ブラジルを中心に、豊富な土地を活用し、エネルギー利用を目的とした作物（エネルギー資源作物）栽培と、そこで得られるバイオマス由来のエタノールやナタネ油などを自動車用燃料として利用する動きが活発化している。バイオ燃料は US\$50/バレルを超える原油価格においては、価格面で既存の化石燃料に対し十分競争可能となる。中長期的には必ずピークを迎える石油生産量と原油価格トレンドを踏まえ、欧米各国ではバイオ燃料を輸送部門の代替エネルギーの最有力候補と位置付け、様々な導入支援策に加えて、将来的な供給量の安定的確保を目指した資源・研究開発を積極化している。

これに対し日本では、2005年4月に閣議決定された「京都議定書目標達成計画」にて、原油換算 50 万 kl のバイオ燃料を輸送用燃料に利用する目標が掲げられており、2006年「バイオマス・ニッポン総合戦略」では、国内バイオマス資源を利用したエタノール生産可能量は、国内の年間ガソリン消費量の約 10%にあたる 600 万 kl/年であるとしている。しかしながら、食料自給率が 40%にとどまる日本では、化石燃料とコスト競争可能なバイオ燃料導入の実績がなく、中長期的導入義務化や税制と含めた本格的な制度対応までには至っていない。

世界の土地ポテンシャルを見ると、2050年前後の世界人口ピーク時の食料生産とバイオ燃料生産を両立する可能性は十分にある。日本でバイオ燃料を本格的に導入するにあたり、エネルギーセキュリティの観点から、今後拡大が予想される海外でのエネルギー資源作物向け耕地権益を含む国産資源の確保と多様化に努める必要がある。資源小国の日本が海外資源を獲得するために、資源国や他国には無い日本独自の第二世代バイオ燃料技術（エネルギー資源作物、リグノセルロースを原料とするバイオエタノール燃料変換、バイオディーゼル燃料変換）が重要となる。しかしながら、現状、バイオ燃料関連技術の科学技術論文数を比較すると、いずれの研究分野についても、日本の論文数は欧米から大きく引き離されており、発酵を中心とする微生物学分野など、日本が強いといわれる研究蓄積が活かされていない。

今後の日本における技術開発を進めるには、バイオ燃料の国家導入目標・時期を明確に設定し、現実的な資源確保戦略と制度対応のあり方を検討する必要がある。それらと整合した第二世代バイオ燃料研究開発ロードマップ構築が不可欠である。その際、エネルギー資源作物生産の対象となる土地条件（気候・土壌）を明確化し、研究ターゲットの絞込みが重要である。また、第二世代バイオ燃料研究対象は、エネルギー分野とライフサイエンス分野の両分野にわたっており、両分野の人的交流による研究活発化や融合化、更には研究拠点構築が重要である。

エネルギー資源作物と バイオ燃料変換技術の研究開発動向

前田 征児
環境・エネルギーユニット

1 はじめに

地球温暖化問題を克服し、持続的な経済発展を実現する上で、再生可能なバイオマス資源の活用拡大が求められている。科学技術動向誌でも2001年12月号、2005年5月号において、地球温暖化対策としてのバイオエネルギーの可能性や、各国の技術開発および普及導入政策動向を取り上げた^{1, 2)}。近年、このような環境問題に加えて、エネルギーセキュリティや経済性の面からも、石油代替燃料としてバイオマス資源に由来するバイオ燃料の普及拡大を目指す動きが世界各国で活発化している。

現在、自動車、航空機、船舶などの輸送用エネルギーの大部分は石油に依存している。電力や熱な

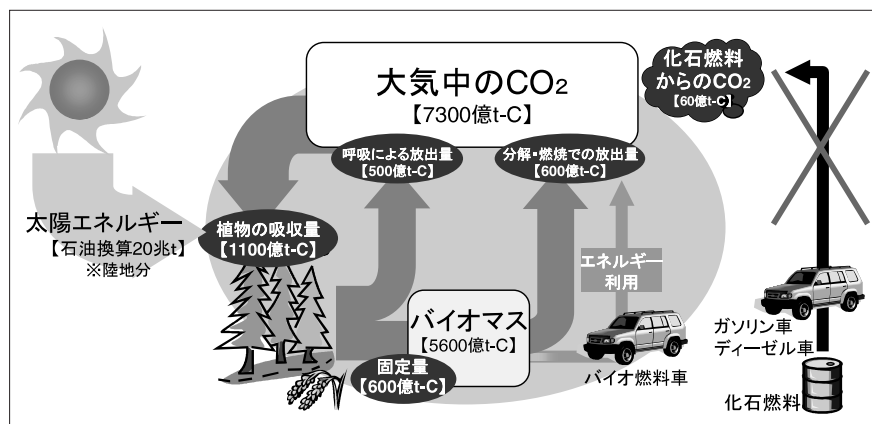
どが主体の産業用エネルギーと比較して、経済的な技術オプションが限定的である上、産出国が中東地域に偏在しているため、エネルギーセキュリティの面でも脆弱である。資源国の政情不安によるリスクや、BRICsの急激な経済発展、自然災害による供給インフラの遮断などを背景に、一時US\$80/バレルを超えた原油価格の高騰は記憶に新しい。中長期的に石油生産量は必ずピークを迎えることを踏まえると、原油の高価格トレンドは一過性のものではないと考えられ、各国では輸送用エネルギーの石油依存度低下が喫緊の課題として認識されている。そこで、世界のバイオ燃料の研究開発は、従来

の廃棄物有効活用というスタンスに加えて、輸送用エネルギーの一翼を担うことを明確な目標としはじめている。バイオマスエネルギー資源として積極的に捉えた資源作物研究や、大規模普及に不可欠な低コスト燃料変換技術が注目されている。

一方、食料自給率が40%にとどまる日本においては、食料資源との競合に配慮する形で、バイオマスの議論が国内未利用廃棄物資源活用の範囲に限定されている。そのため、本格的な石油代替エネルギーとしてバイオ燃料を多量に導入しようとする際に必要条件となる、資源の確保、コスト、品質安定性などの側面では十分な検討がされていない。海外で活発化しつつあるバイオ燃料実用化に向けた動きと比較して、日本の出遅れが目立ってきている。

本論文では、世界と日本における石油代替燃料としてのバイオ燃料の可能性を整理した後、実現に不可欠な重要技術として、「エネルギー資源作物」と「バイオ燃料変換技術」の研究開発動向をまとめる。その上で、日本における技術開発の問題点について言及し、今後のあり方を論じる。

図表1 カーボンニュートラルなバイオ燃料の利用イメージ



参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

2 輸送用エネルギーとしてのバイオ燃料の現状と可能性

2 - 1

バイオ燃料を取り巻く背景

バイオマスに含まれる炭素は、植物が成長過程において大気中のCO₂を固定化したものであり、太陽エネルギーによる炭素循環で再生産が保証されている限り、バイオマスを燃焼しても大気中のCO₂を増加させず、「カーボンニュートラル」なエネルギー源であるとみなされている（図表1）。したがって、これを石油等の化石資源由来燃料の代替燃料として利用することにより、ライフサイクル全体で温室効果ガス排出量を削減可能であり、温暖化対策上極めて有効な手段となる⁴⁾。

特にバイオマス由来の液体燃料（バイオ燃料）は、単独あるいは化石資源由来の液体燃料に混合する形で、既存の輸送用内燃機関や既存の流通インフラを生かして比較的容易に導入可能であることから、再生可能エネルギーの中でも、輸送用エネルギーとしての期待が極めて大きい。現在、日本全体の年間CO₂排出量は13.6億t-CO₂であるが、このうち自動車からの排出量は全体の約2割にあたる

2.3億t-CO₂である⁵⁾。仮に日本の自動車燃料全てをカーボンニュートラルなバイオ燃料に置き換えることで、日本全体のCO₂排出量が2割削減できたとすると、11.3億t-CO₂となり、これだけでも京都議定書削減目標の12.3億t-CO₂（1990年比6%削減）を下回ることができる。

バイオマス関連技術には、様々な原料と変換技術および活用形態の組合せがある（図表2）。輸送用エネルギーとしては、液体でエネルギー密度が高いバイオ燃料が適している。現状では、バイオ燃料は安価な作物資源の豊富な海外の農業国に限って普及が進んでいる（図表3）。作物資源に乏しい

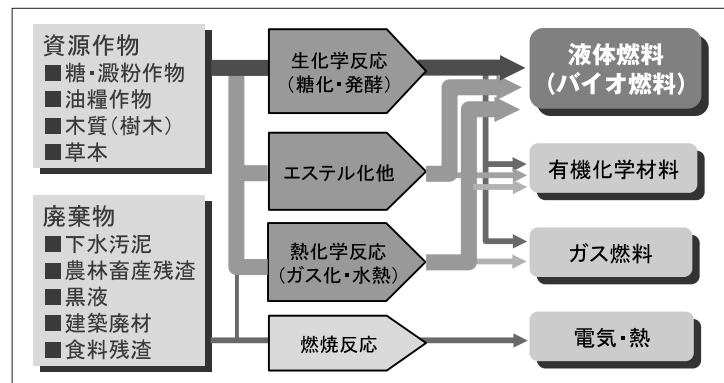
日本では、建築廃材や廃棄食用油などの廃棄物系資源からのバイオ燃料が中心であるため、現状では地域的にも量的にも極めて限定されている。

2 - 2

各国のバイオ燃料導入と政策の動向

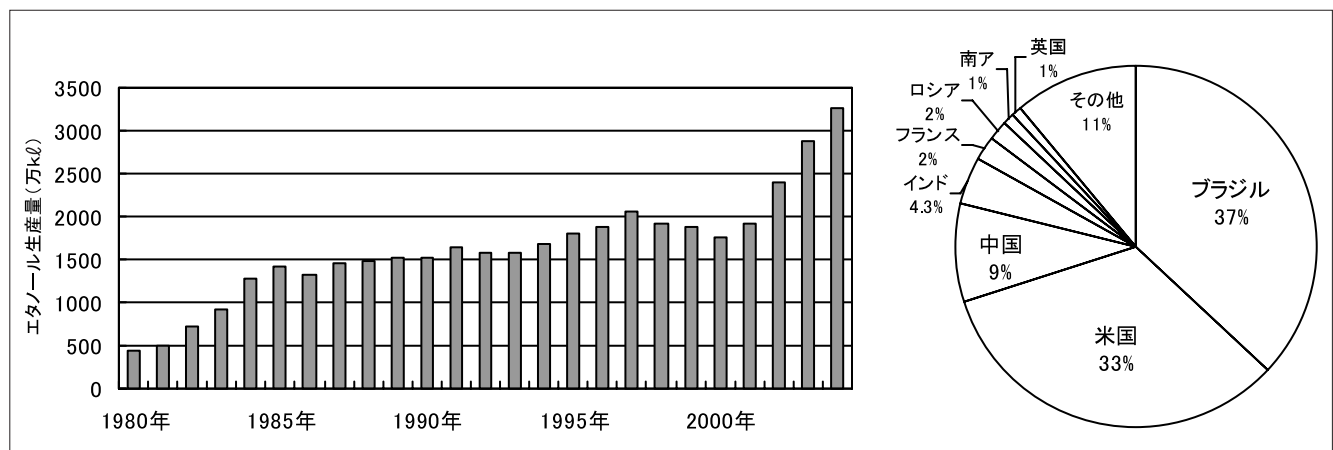
海外ではバイオ燃料の普及導入が積極的に展開されている国が多く、導入量義務化や中長期的な導入目標量の設定と合わせて、税制や導入支援策を含む普及拡大のための制度対応が進展している（図表4）。米国およびEUでは、国内の農林業の振興、エネルギーセ

図表2 バイオマス関連技術の原料と活用形態



参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 世界のバイオ燃料（エタノール）生産量と国別シェア



参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 各国のバイオ燃料導入政策

地域	国	混合率	原料	車両対応	導入目標/義務	普及支援措置
北米	米国	E10/E85	トウモロコシ	ガソリン車 E10 対応済 FFV 市販	再生可能燃料導入量を義務化 (2005 年エネルギー政策法) 2006 年 40 億ガロン(約 1,500 万 kℓ、ガソリン流通量の 2.8%相当) 2012 年 75 億ガロン (約 2,800 万 kℓ) 再生可能・代替燃料の導入量目標化 (2007 年大統領教書演説) 2017 年 350 億ガロン (約 1.3 億 kℓ)	燃料税額控除措置 小規模燃料製造事業者への補助及び融資事業
		B2 ~ 5/ B20/B100	大豆、 廃食油	一部 B10 対応車 B100 対応車市販		
	カナダ	E5 ~ 10/ E85	トウモロコシ 小麦、大麦	ガソリン車 E10 対応済 FFV 市販	エタノール導入量を目標化 (2003 年エタノール利用拡大プログラム) 2010 年 ガソリン消費量の 35%を E10 化	燃料課税軽減措置 燃料製造施設建設費補助
中南米	ブラジル	E20/ E25/E100	サトウキビ	ガソリン車 E25 対応済 FFV 市販	ガソリンへのエタノール 20 ~ 25%混合義務化	専用車両に対する連邦工業税・地方税軽減措置
		B2	大豆	一部 B25 対応車 B100 対応車市販	軽油への BDF 混合義務化 (2008 年までに 2%、2013 年までに 5%)	燃料課税軽減措置
欧州	EU	—	—	—	バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令、2007 年 EU 再生可能エネルギーロードマップ) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料比率 2% 2010 年 同上比率 5.75% (2100 万 kℓ 相当) 2020 年 同上比率 10%以上 バイオ燃料義務化検討中 (2005 年バイオマス行動計画、2006 年バイオ燃料戦略)	原料作物栽培への補助
	ドイツ	ETBE	ライ麦、小麦		バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 2%	燃料課税軽減措置 原料作物栽培への補助
		B5/B100	ナタネ	B100 対応車市販		
	フランス	ETBE 6 ~ 7	テンサイ、 小麦		バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 3%	燃料課税軽減措置 原料作物栽培への補助
		B5/B30	ナタネ	一部 B30 対応車		
	英国	E5	トウモロコシ		バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 0.3% 2010 年 同上比率 5% (※ 2008 年より導入義務化制度開始予定)	燃料化税軽減措置 原料作物栽培への補助
	スウェーデン	E5/E85	小麦	FFV 市販	バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 3%	燃料課税軽減措置 原料作物栽培への補助
	スペイン	ETBE 3 ~ 4 ETBE 6 ~ 7	小麦、 大麦		バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 2%	燃料課税軽減措置 燃料製造事業者への免税措置 原料作物栽培への補助
イタリア	B5/B30	ナタネ、 ヒマワリ	B30 対応車市販	バイオ燃料導入量を目標化 (2003 年 EU バイオ燃料指令に基づく) 2005 年 輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率 2%	燃料課税軽減措置 原料作物栽培への補助	
アジア	インド	E5	サトウキビ		2003 年から E5 普及全国展開開始 E10 全国普及が最終目標	燃料課税軽減措置
		B5	ヤトロファ		2005 ~ 2007 年 実証試験 2007 ~ 2010 年 供給エリア拡大、生産・流通設備整備 2011 ~ 2012 年 全国展開	
	中国	E10	トウモロコシ 小麦		バイオ燃料導入量目標化 (2004 年エタノールガソリン拡大試験計画) 2005 年 4 省で E10 化	エタノール生産事業者への消費税免除 原料作物栽培への補助 エタノール間接税還付措置
	タイ	E10	キャッサバ		バイオ燃料導入量目標化 2011 年 E10 化完了	エタノールへの物品税免除 E10 生産事業者への補助
		B2	パーム		バイオ燃料導入量目標化 2006 年 B2 化完了 2011 年 B3 化完了	
	フィリピン	E5	サトウキビ	1995 以降の市販車は E10 対応車	バイオ燃料導入量目標化 (2005 年国家エタノール燃料プログラム) 2010 年 E10 化完了	
		B1	ココナッツ		政府公用車での B1 利用義務化	
	マレーシア	B2 ~ 5	パーム		バイオ燃料導入量目標化 (2005 年国家バイオ燃料政策)	
ネパール	B5	パーム		バイオ燃料導入量目標化 (国家エネルギー管理法) 2025 年 BDF 利用量 470 万 kℓ		
オーストラリア	オーストラリア	E10	サトウキビ	ガソリン車 E10 対応済	バイオ燃料導入量目標化 (連邦政府目標) 2010 年 35 万 kℓ	エタノール生産事業者への補助

混合率略号：E はバイオエタノール、B はバイオディーゼル、ETBE はエチルターシャリーブチルエーテル、数字は体積混合率
参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

キュリティ（中東・ロシア依存度の低減）、温暖化対策が重視されている。中国では、これらに加えて、経済成長に伴うエネルギー消費増大への対応の側面が強い。これに対し、ブラジルやASEAN諸国では域外輸出に積極的で、関連産業振興や貧困撲滅が重視されている。しかし、その反面、熱帯雨林の過伐採など、環境面の悪影響への対応に迫られている。

このように、バイオ燃料の普及各国における政策背景は様々ではあるが、中長期的な視点でバイオ燃料を石油代替燃料として明確に位置付けている。経済的に成立するエネルギー向け作物（エネルギー資源作物）の自国生産実績をもち、義務化も含めた量的な導入目標設定や、様々な普及支援制度を充実させている点は、各国で共通している。

日本でも、2005年4月に閣議決定された「京都議定書目標達成計画」⁷⁾において、輸送用燃料におけるバイオ燃料利用目標が50万kℓ（原油換算）とされ、また、2006年に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」⁸⁾で、バイオ燃料の導入意義や目的が整理され、利用促進に向けた施策が急速に進展している。2006年11月には、安倍内閣総理大臣より、地球環境および地域／農業の活性化という観点から、国産バイオ燃料生産拡大が指示され、これを受けて農水省を中心に関連省庁が連携する「バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議」にて、課題の整理と実現に向けたシナリオが提示された⁹⁾。また、国内の関連産業界からは、バイオ燃料の大量かつ安価な生産モデルがまとめられ、技術開発ロードマップや研究開発組織、アジアとの協力について提案がなされている¹⁰⁾。

しかしながら、日本では海外のように化石燃料とコスト競合可能なバイオ燃料導入の実績がまだ無

いため、中長期的な導入義務化や、税制を含む本格的な制度対応までには至っていない。

2 - 3 土地利用から見た バイオ燃料の供給可能性

バイオ燃料を化石燃料代替として本格導入する場合、食料との競合への配慮が欠かせない。拡大する世界人口は2050年前後に約92億人でピークに達すると予測され

ている¹¹⁾。世界の耕地は、必要な食料に加えて、どの程度の量のバイオ燃料を供給可能であろうか。

現在、世界全体の土地面積1,450億haに対し、農地面積は約10%を占める¹²⁾。国連の予測では、今後の拡大可能な農地面積は約18億haと報告されている¹³⁾。しかし、この拡大可能面積のうち、60%は森林や保護地域であり、残り2/3は土壌や地形に難点があるため、現実的にはそれらを差し引いた5億ha程度が実質的な農地拡大

図表5 2050年のバイオ燃料供給ポテンシャル

(a)国連前提ケース

年	1970	2000	2015	2030	2050
人口	37億人	61億人	71億人	81億人	91億人
一人当たり穀物需要	0.33t/人	0.34t/人	0.33t/人	0.33t/人	0.33t/人
穀物需要	8.5億t	20.4億t	23.2億t	26.8億t	30.1億t
単収	1.3t/ha	2.9t/ha	3.3t/ha	3.3t/ha	3.3t/ha
食料収穫面積	6.5億ha	6.7億ha	7.0億ha	8.1億ha	9.1億ha
食料収穫面積の必要増加分（2000年比）					2.4億ha
エネルギー利用可能面積					2.6億ha
エタノール年間生産可能量					10.3億kℓ

(b)食料需要増加ケース

年	1970	2000	2015	2030	2050
人口	37億人	61億人	71億人	81億人	91億人
一人当たり穀物需要	0.33t/人	0.34t/人	0.35t/人	0.37t/人	0.41t/人
穀物需要	8.5億t	20.4億t	25.0億t	30.1億t	37.6億t
単収	1.3t/ha	2.9t/ha	3.3t/ha	3.3t/ha	3.3t/ha
食料収穫面積	6.5億ha	6.7億ha	7.6億ha	9.1億ha	11.4億ha
食料収穫面積の必要増加分（2000年比）					4.7億ha
エネルギー利用可能面積					0.3億ha
エタノール年間生産可能量					1.3億kℓ

(c)単位収穫量改善ケース

年	1970	2000	2015	2030	2050
人口	37億人	61億人	71億人	81億人	91億人
一人当たり穀物需要	0.33t/人	0.34t/人	0.35t/人	0.37t/人	0.41t/人
穀物需要	8.5億t	20.4億t	25.0億t	30.1億t	37.6億t
単収	1.3t/ha	2.9t/ha	3.3t/ha	3.6t/ha	3.9t/ha
食料収穫面積	6.5億ha	6.7億ha	7.6億ha	8.5億ha	9.6億ha
食料収穫面積の必要増加分（2000年比）					2.9億ha
エネルギー利用可能面積					2.1億ha
エタノール年間生産可能量					8.6億kℓ

参考文献^{11)~14)}のデータを基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 6 第二世代バイオ燃料

	種類	名称	バイオマス原料	製造技術
バイオエタノール	第一世代	従来型バイオエタノール	テンサイ(糖類) 穀類(澱粉)	加水分解(糖化)＋発酵
	第二世代	セルロース系バイオエタノール	木質、草本類 (リグノセルロース)	高度加水分解(糖化)＋発酵
バイオディーゼル	第一世代	脂肪酸メチルエステル(FAME)	油糧作物(例:ナタネ) 廃食用油	圧搾抽出＋エステル交換
	第二世代	バイオマスガス化合成軽油(BTL: Biomass to Liquid)	木質、草本類 (リグノセルロース)	ガス化＋FT合成
		水素化バイオ軽油(BHD: Bio Hydrofined Diesel)	油糧作物/動物性油	水素化分解

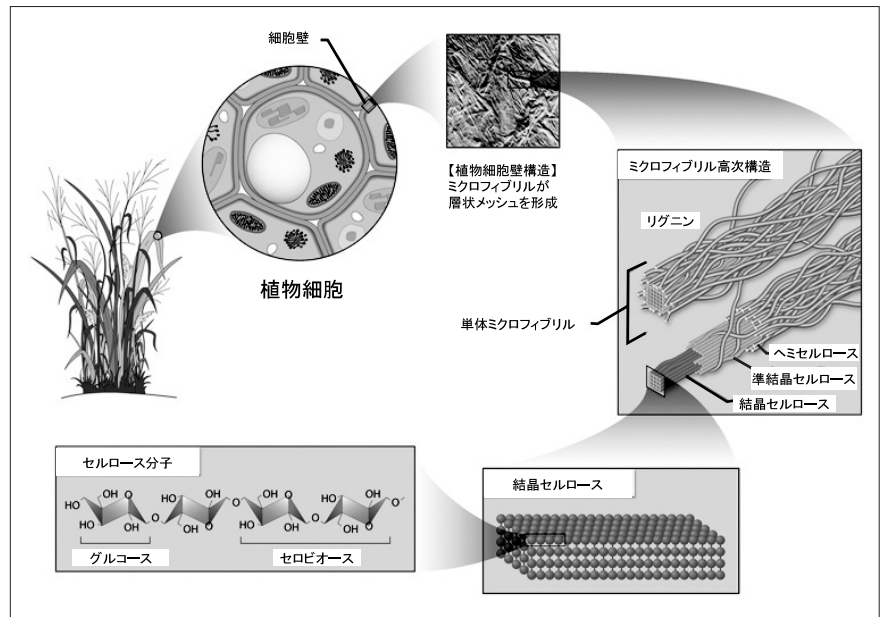
参考文献^{15, 16)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

可能面積と考えられる。

国連の穀物需要見通しを前提に試算すると、世界人口がピークに達すると見られる2050年においては、食料向けには2.4億haの収穫面積拡大が必要になる。したがって差し引き2.6億haでバイオ燃料向けの収穫可能面積であり、この面積からのエタノールの年間生産量は約10億klと期待できる(図表5(a))。国連の穀物需要見通しでは、今後の一人当たりの穀物需要は、現状と変わらず一定としているが、発展途上国での経済成長を踏まえると、この数字はやや楽観的過ぎるようにも思える。そこで過去30年の一人当たり穀物需要増加率の実績値である10%が今後も続くことを前提に試算し直すと、エタノール年間生産量は1.3億klに減少する(図表5(b))。

ここで食料供給とバイオ燃料供給拡大の両立に向けたアプローチとしては、以下の二通りが考えられる。第一は「作物単位収穫量の改善」である。上記試算では、2015年以降の単位収穫量向上が頭打ちになることを前提としている。穀物の単位収穫量は、1960年代には年増加率が3%であったが、1980年代以降は年増加率1.5%にまで減ってきており、2015年までで見ると年増加率1.1%に鈍化する見通しである¹⁴⁾。しかし、2015年以降にも引き続き年増加率1%で単位収穫量が改善されるな

図表 7 植物繊維構造とリグノセルロース



出典：参考文献¹⁶⁾

らば、2050年のエタノール生産は約8.6億klが確保可能となる(図表5(c))。今後、遺伝子組換え技術を適用した作物の生産性改良が本格化すれば、実現性のある数値レベルと言える。

第二のアプローチとしては、「革新的なバイオ燃料生産技術の確立」が挙げられる。米国やEUでは、これらの技術を「第二世代バイオ燃料技術」と総称し、この領域は近年研究が活発化している(図表6)。なかでも、これまでは未活用であったリグノセルロースを低コストでエタノールに変換する研究が盛んである。

リグノセルロースは、木材や茎などの植物細胞を構成する主要成

分であり、エネルギー利用の観点からは最も量的なポテンシャルが大きい。主な組成はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンからなる(図表7)。しかし、糖質や澱粉質のように簡単にエタノールに変換する実用技術がなかったために、これまでは利用されてこなかった⁴⁾。リグノセルロースからのエタノール変換技術が実現すれば、澱粉および糖質に加えて、茎や葉を含む穀物体全体をエタノール原料に活用可能となるだけでなく、牧草や樹木などもエタノール原料として活用でき、バイオ燃料の資源量を大幅に拡大できる。したがって、欧米では実現に向けた研究が注目されている。

日本におけるバイオ燃料の可能性

ここで、日本におけるバイオ燃料の可能性について、量およびコストの両面で考察する。「バイオマス・ニッポン総合戦略」では、国内バイオマス資源を利用したエタノール生産可能量は、600万kl/年であるとされている(図表8)。エタノール原料としては、食料との競合を回避するために、稲わら等の草本系バイオマスや林地残材などの木質系バイオマス(非食料系資源)活用や、遊休地でのエネルギー資源作物(稲、ソルガム、等)栽培を想定している。

国産バイオマス資源を用い国内でエタノールを生産する以外に、海外産エタノールを輸入するケースが考えられるが、両者をコ

スト面で比較する(図表9)。バイオ燃料先進国である米国やブラジルでは、現在すでにガソリン価格に競合可能なバイオエタノール燃料を自国内で流通させている。これらを日本に輸入する場合は、当然のことながら輸入流通コストや関税などの諸経費や、エタノールの流通設備インフラ追加投資分の上乗せが必要となる。しかし、これらを加算しても、米国産トウ

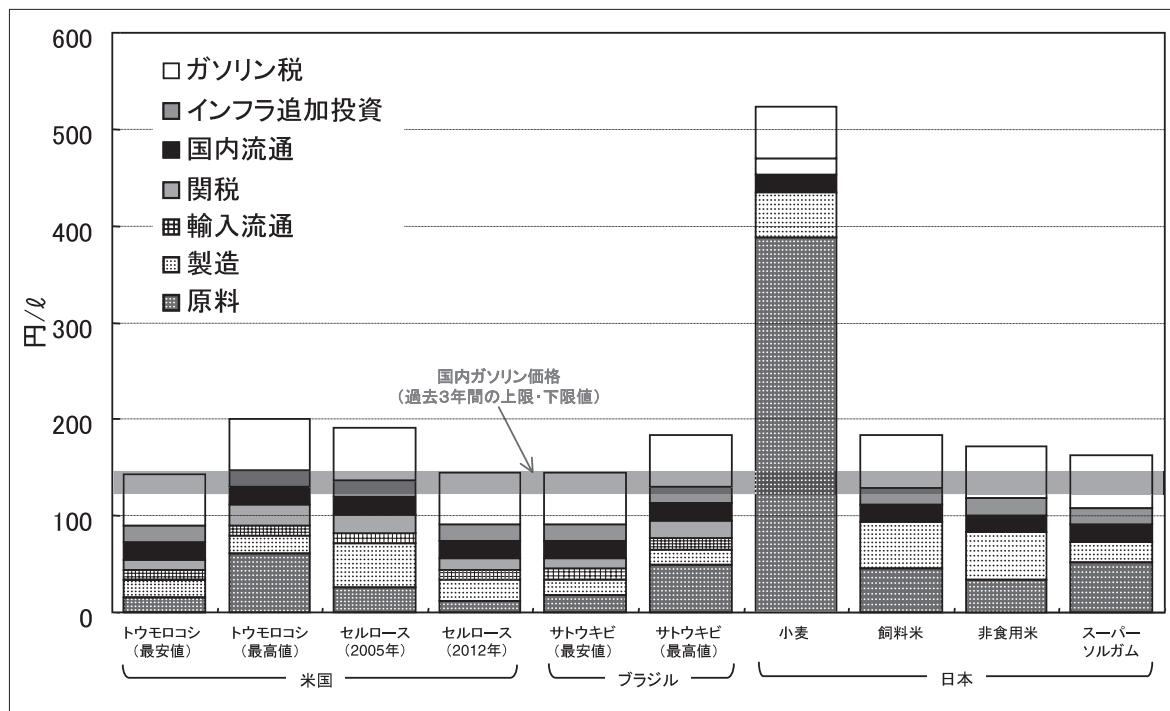
モロコシ由来のエタノールやブラジル産さとうきび由来のエタノール価格の下限値は、過去3年間の日本の国内ガソリン価格を下回っており、十分競合が可能である。これに対し、国産穀物の中で最も安価な小麦(原料価格164円/kg)を用い、国内で同規模でのエタノール生産した場合の価格は、ガソリン税を除いても450円/ℓ以上となり、ガソリンや海外産エタノ

図表8 バイオマス・ニッポン総合戦略における国産バイオ燃料供給可能量

原料	生産可能量(2030年度)	
	エタノール換算	原油換算
1. 糖・澱粉質 (食料生産過程の副産物、規格外農産物等)	5万kl	3万kl
2. 草本系(稲わら、麦わら等)	180万~200万kl	110万~120万kl
3. 資源作物(稲、テンサイ)	200万~220万kl	120万~130万kl
4. 木質系(建設廃材、林地残材等)	200万~220万kl	120万~130万kl
5. バイオディーゼル燃料系	10万~20万kl	6万~12万kl
合計	600万kl程度	360万kl程度

出典:参考文献⁹⁾

図表9 日本におけるバイオ燃料(エタノール)の供給コスト比較



【産出根拠】

- ①米国トウモロコシ: 過去3年間の米国エタノール価格(油槽所渡し)の上限・下限値。プラント規模26.3万kl/年。1.9DTケミカルタンカーでの海上輸送。1\$=120円。アルコール関税23.8%。
- ②米国セルロース: 原料費および製造費とも2005年現状および2012年DOE目標値。その他の数値は①と同様。
- ③ブラジルサトウキビ: 過去3年間のブラジル産輸入エタノールの上限・下限値。その他の数値は①と同様。
- ④国産小麦、飼料米: 原料費原料農水省統計価格。プラント規模3.6万kl/年。
- ⑤非食用米: 三重県干拓地における大規模モデル生産ケース。玄米収穫方式。粉殻・稲わら活用。製造法は②の2012年目標値。
- ⑥スーパーソルガム: 参考文献²⁰⁾による多収性の「ウルトラソルゴー」。製造法は②の2012年目標値。

参考文献^{17~20)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

ールに対して全くコスト競争力がない。

一方、同じ国産原料でも、食用としては規格外の飼料米を原料とする場合(原料価格 20 円/kg)は、ガソリン税を除くと、海外産エタノールやガソリン価格とほぼ競合可能な価格を見込める。飼料米だけでは量的には限られるが、将来的に、味覚や見た目を考慮しない非食用米を大規模生産し(原料価格 15 円/kg)、米のみならず茎などのリグノセルロースの活用も前提に試算すると、同様にガソリン税を除けば、ガソリン価格と十分競合可能な価格が見込める。このように、「革新的エタノール変換技術」と「大規模原料生産」、更には欧米で一般化しているエタノールへの「燃料課税減免制度」という条件が揃えば、採算可能な経済性を持った国産エタノールの供給が十分現実的となる。

ただし、ここで前提とした大規模生産が実現可能な農地面積は、国内では限定的と見るのが現実的である¹⁰⁾。エネルギー資源作物の栽培用耕地として期待される耕作放棄地は、日本全体で 39 万 ha 存在するが(図表 10)、その内約 8

割が 5 ha 以下の零細規模として散在している²¹⁾。

日本でバイオ燃料を本格導入するにあたっては、海外産エタノール輸入も検討する必要がある。しかし、現状のブラジルや米国からの海外産エタノール輸入の場合、価格変動幅がガソリンと比較しても極端に大きい点に注意しなければならない。この原因としては、両国ともエタノール原料が自国産トウモロコシやサトウキビに限られ、天候不順や自然災害による収穫不足や、先物市場での投機対象となりやすい点が挙げられる。米国では、リグノセルロースを中心とした原料多様化を目指した第二

世代バイオ燃料技術の研究開発に力を入れることで、トウモロコシ由来のエタノールとコスト的に遜色ないバイオ燃料の安定供給を目指している。

したがって、日本では短期的には従来の化石燃料同様、エネルギーセキュリティの観点から、今後拡大が予想される海外でのエネルギー資源作物向け耕地権益を含む国産資源の確保と多様化に努めることが重要である。一方、長期的には、資源小国の日本が海外資源耕地権益を獲得していくにあたって、資源国や他国には無い日本独自の第二世代バイオ燃料技術の研究開発も必要と考えられる。

図表 10 日本の土地利用状況

山地 2,500 万 ha	天然林	1,500 万 ha	
	人工林	1,000 万 ha	現役林 330 万 ha 伐採放棄林 670 万 ha
平地 1,300 万 ha	農地	470 万 ha	水田 160 万 ha 生産調整地 100 万 ha 畑・牧草地 210 万 ha
		水面・河川・水路	130 万 ha
		道路	130 万 ha
	宅地	180 万 ha	
	その他	390 万 ha (内耕作放棄地 39 万 ha)	

参考資料^{22, 23)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

3 第二世代バイオ燃料技術の開発動向と課題

以下の章では、第二世代バイオ燃料技術を大きく 3 つに分類し、研究開発動向と今後の課題をまとめる。

3 - 1

エネルギー資源作物技術

エネルギー資源作物としては、単位土地面積当たりの乾物収量という点で、穀物、草本(ソフトバイオマス)、木材(ハードバイオマス)、油脂植物のそれぞれについて、様々な候補が考えられてい

る(図表 11)。食用作物の場合と異なり、味覚や形状に対する品質要件が無い代わりに、育成時の単位エネルギー投入量あたりの乾物収量増大と、低コスト大量生産という点が強く求められる。その際、食料生産との棲み分けという観点から、現在、食用作物生産されている土地よりも、必然的に条件の悪い土地での生産が予想される。食用作物の生産性向上や環境耐性改善に関しては、過去に非常に多くの研究蓄積があるが、これらが

エネルギー資源作物に活用可能かどうかは、土地の条件(気候、土壌)次第であろう。極端な乾燥気候の土地や塩害による劣化地での生産は非現実的であり、酸性土壌やアルカリ性土壌で、かつ一定の降水量のある土地が現実的なターゲットとなりうる。このような条件の耕作未利用地は、世界的には広範囲にわたると期待できる。国内外を問わず、将来的に日本がエネルギー資源作物生産を期待できる土地の条件(気候、土壌)を整理し、

図表 11 代表的なエネルギー資源作物と研究開発動向

分類	品種	乾物収量 [t/(ha・年)]	研究動向
糖質澱粉作物	サトウキビ (ソルガム)	64.1 (熱帯・ハワイ) 49.5 (亜熱帯・沖縄) 28.8 (温帯・長野)	遺伝子組み換えによる糖増産 (アサヒビール・生研機構) 環境ストレス改善 (SCIVAX)
	トウモロコシ	34.0 (温帯・イタリア)	ゲノム解読 (米国 DOE / DOA) セルロース分解が容易なハイブリッド種開発 (米国 Edenspace System 社)
	イネ	19.2 (温帯・岩手)	ゲノム解読 (日本、中国) 多収穫米 (日本)
	ジャガイモ	9.0 (温帯)	遺伝子導入による環境ストレス改善 (東洋紡)、病害抵抗性付与 (豊田中研) ゲノム解読 (米 DOE / DOA)
油糧作物	パーム (アブラヤシ)	20.0 (熱帯)	
	アブラナ	1.4 ~ 2.5 (温帯)	遺伝子組み換えによる不飽和脂肪酸増産 (米ダウ、米 NRC)
	大豆	1.8 ~ 2.3 (温帯)	遺伝子組み換えによる不飽和脂肪酸増産 (サントリー) ゲノム解読 (米 DOE 共同ゲノム研究所) プロテオーム・メタボローム解析 (豪)
草本類	ネピアグラス	84.7 (熱帯・プエルトリコ)	
	ギニアグラス	48.8 (熱帯・プエルトリコ) 51.1 (亜熱帯・沖縄) 24.3 (温帯・熊本)	
	スイッチグラス	16.0 (温帯・米国)	ゲノム解読 (米 DOE)
	ジャイアント ミスカンタス	60.0 (温帯)	イネ科ススキ属ハイブリッド品種開発 (米国イリノイ大)
	その他		荒廃農地における多種の多年生草本植物育成法 (米国ミネソタ大)
樹木	ポプラ	15 ~ 22 (温帯・米国・アイルランド)	ゲノム解読 (米 DOE 共同ゲノム研究所 / オークリッジ国立研究所)
	ユーカリ	10 ~ 30 (熱帯・亜熱帯)	酸性土壌での育成促進 (王子製紙)
	シラカンバ	7.4 ~ 10.8 (亜寒帯・北海道)	
	柳	19.0 ~ 20.5 (北海道)	
	杉	4 ~ 7 (北海道)	

参考文献^{1, 24~29)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

ターゲットの明確化を早急に行う必要がある。

エネルギー資源作物技術研究の方向性として、特に注目されるのは以下2点である。

1点目は、作物栄養機構に対して行われた分子生物学的アプローチによる、劣化土壌に対応した作物品種改良研究が挙げられる。近年、東京大学の研究チームが、劣化土壌における鉄分の栄養機構に着目し、遺伝子組み換えによる高生産性作物開発を報告しており、注目される²³⁾。

2点目は、リグノセルロースからのエタノール変換技術の実用化を前提とした作物の品種改良のアプローチである。具体的には、穀物の食用部以外の植物体全体の乾物収量の増大化を目指した研究

や、エタノール変換工程に向けた植物構造の改変を目指した研究アプローチが、米国を中心に活発化しており、注目されている。

3 - 2

バイオエタノール燃料変換技術^{3, 4)}

リグノセルロースを原料としてバイオエタノール燃料を製造する場合、糖質・澱粉質と同様のエタノール発酵工程の前段に、植物繊維をほぐすための前処理工程、セルロースおよびヘミセルロースの糖化工程、エタノール発酵には不要なリグニンの除去工程が余計に必要となる (図表 12)。

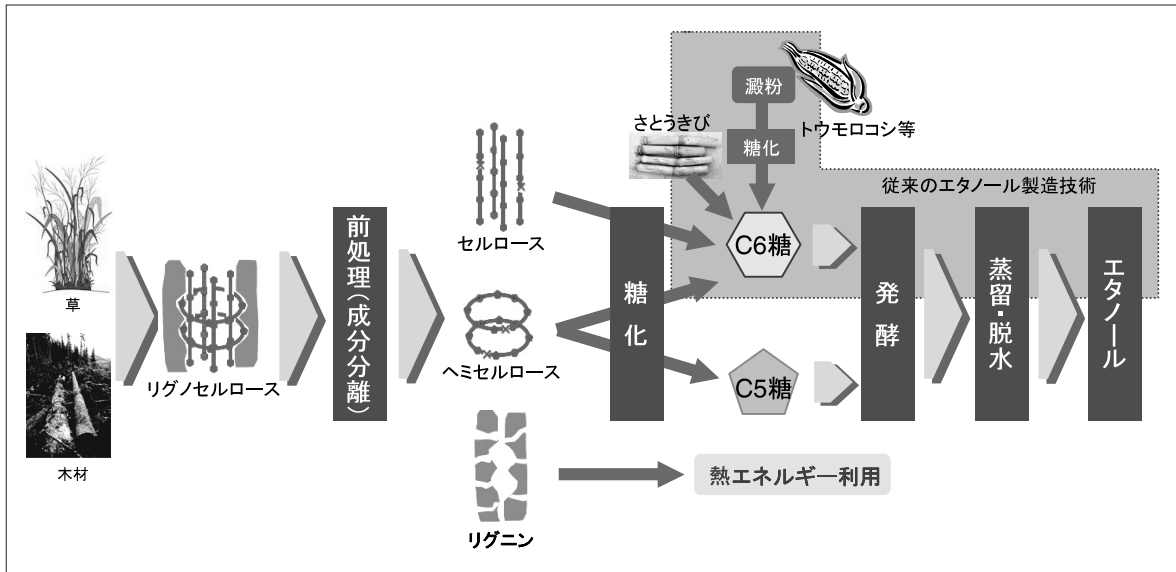
また、従来の糖質・澱粉質作物から得られる糖は、ブドウ糖など

のC6糖が主成分であるが、リグノセルロースを糖化すると、C6糖以外にキシロースなどのC5糖が2:1~3:1の割合で生じる。従来の発酵酵母では、C5糖を発酵できないか、または発酵能力がある酵母であってもC6糖共存下でC5糖の発酵能力が抑制されてしまうなどの問題が生じ、現在までの技術ではリグノセルロースの糖成分を十分に活用できていない。

この結果、現在の実用化技術では、エネルギー効率、生産コスト、環境負荷のいずれの面でも化石燃料に競争力を示すことができていない。

リグノセルロースからのエタノール燃料変換技術の検討にあたっては、「前処理・糖化工程の高効率化、および低コスト化」と「発

図表 12 第二世代バイオエタノール燃料変換技術の全体プロセスと技術課題



参考文献^{4, 10)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 13 第二世代バイオエタノール燃料変換技術の研究項目

項目	研究項目	研究機関 (国)	研究段階
前処理	アルカリ処理/リグニン可溶化除去	森林総研 (日本)	基礎研究
	酸処理セルロース非晶化/ヘミセルロース糖分分離/オルガノゾル化によるリグニン除去	バージニア工科大 (米国)	基礎研究
	白色腐朽菌によるリグニン分解	共同ゲノム研究所 (米国)、京大 (日本)	基礎研究
糖化	オンサイト酵素生産による糖化並行複発酵	東大 (日本)、ルンド大 (スウェーデン)	基礎研究
	固相発酵による酵素生産	東大/理化学研究所 (日本)	基礎研究
	複合菌による異種酵素生産	神戸大/月桂冠 (日本)	基礎研究
	遺伝子組換え微生物 (Trichoderma reesei) による酵素生産	Iogen 社 (カナダ)	試験生産
	水蒸気・亜臨界・超臨界水処理による前処理・糖化一括化	京大 (日本)、 ブリティッシュコロンビア大 (カナダ)	基礎研究
発酵	CO ₂ 除去・オンライン生産物分離	協和発酵 (日本)	実証化
	遺伝子組換え酵母による C5/C6 糖同時発酵	パデュー大 (米国) /Iogen 社 (カナダ)	試験生産
	Pichia 酵母、Zymomonas 菌による C5 糖発酵	秋田県総食研 (日本)、鳥取大 (日本)、NREL (米国)	基礎研究
	セルラーゼ、βグルコシダーゼ遺伝子の細胞壁表層結合酵母セルラーゼ遺伝子導入菌による糖化同時発酵	京大/神戸大 (日本) ダートマス大/ Mascoma 社 (米国)	基礎研究 実証化
	遺伝子組換えエタノール耐性・耐熱性酵母菌による高速発酵	マサチューセッツ工科大 (米国)	基礎研究
分離濃縮	ゼオライト分離膜によるエネルギー消費低減	協和発酵 (日本)	実証化
	濃度スイッチング分離膜による連続生産	農研機構/東大 (日本)	基礎研究
物質生産	セルロース・リグニンの液化変換	東大農、森林総研、京大	基礎研究
	リグニンを原料とする有価物生産	STFI パックフォッシュク研究所/シャルメシュ工科大/リグノブースト社 (スウェーデン)	試験生産
	分離バイオリクターによる糖類からの有機酸/多価アルコール生産	アルゴンヌ国立研究所/ Archer Daniels Midland 社 (米)	基礎研究

参考文献^{28, 29, 31-33)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

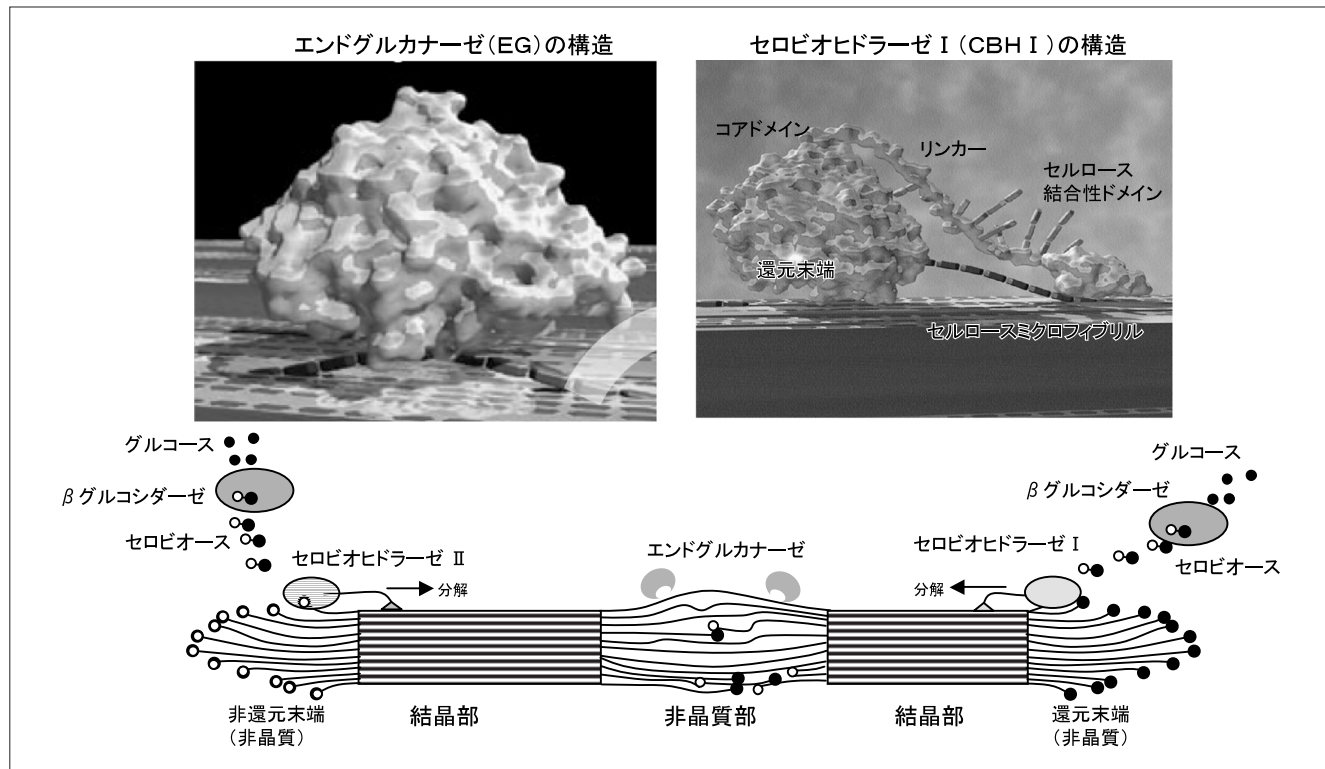
酵工程の高効率化」が鍵を握っており、これらに対して様々な検討が行われている (図表 13)。

「前処理・糖化工程の高効率化、および低コスト化」に関しては、従来の「酸加水分解法」に代わる

新たな手法として、「酵素糖化法」が有望とされ、活発に検討されている (図表 14)。「セルラーゼ」と呼ばれる特定有用酵素を用い、温和な条件下でセルロースを糖に分解することができ、従来法と比較

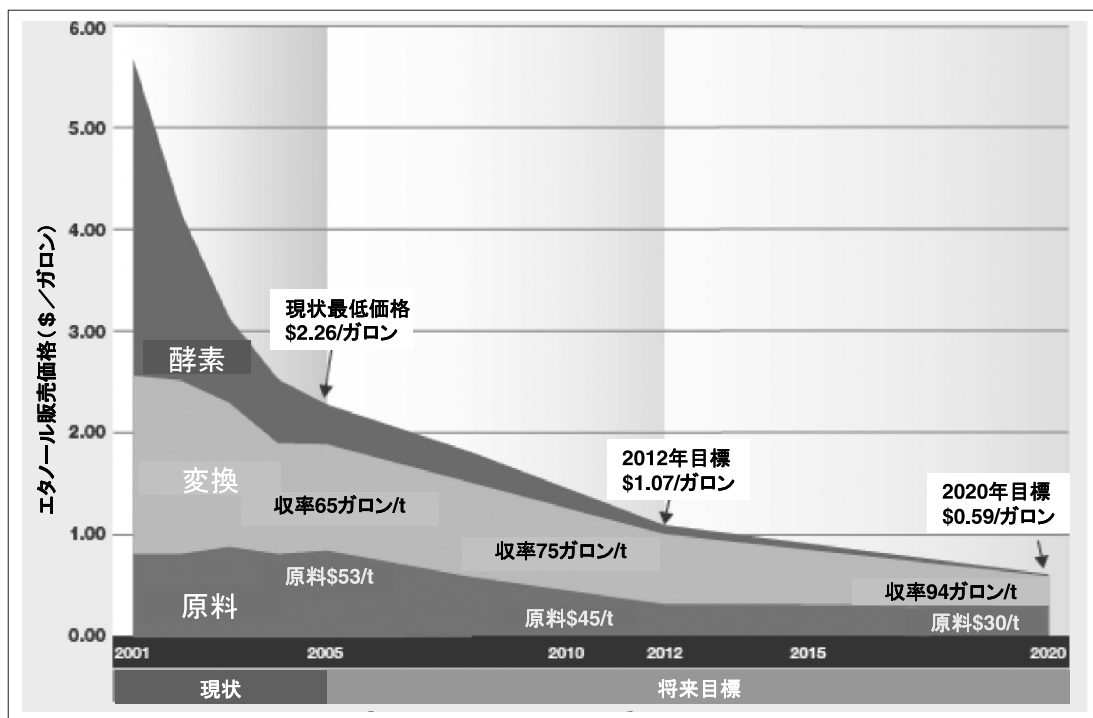
してエネルギー面で大きな利点がある。草食動物内臓やシロアリ体内に存在する菌や腐葉土中に存在する菌の中から、有用なセルラーゼ生産菌株が見出されており、遺伝子組換え技術により酵素生産効

図表 14 セルロース分解酵素（セルラーゼ）と生化学反応メカニズム



参考文献^{3, 34, 35)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 15 米国 DOE における研究開発のコスト目標



出典：参考文献³⁶⁾

率の向上を目指した改質が試みられている³⁾。

また、「セルロソーム」と呼ばれるセルラーゼ複合体も見出されており、細胞壁を分解する過程で必要となる複数の酵素機能モジュールを、遺伝子組換え技術で複合

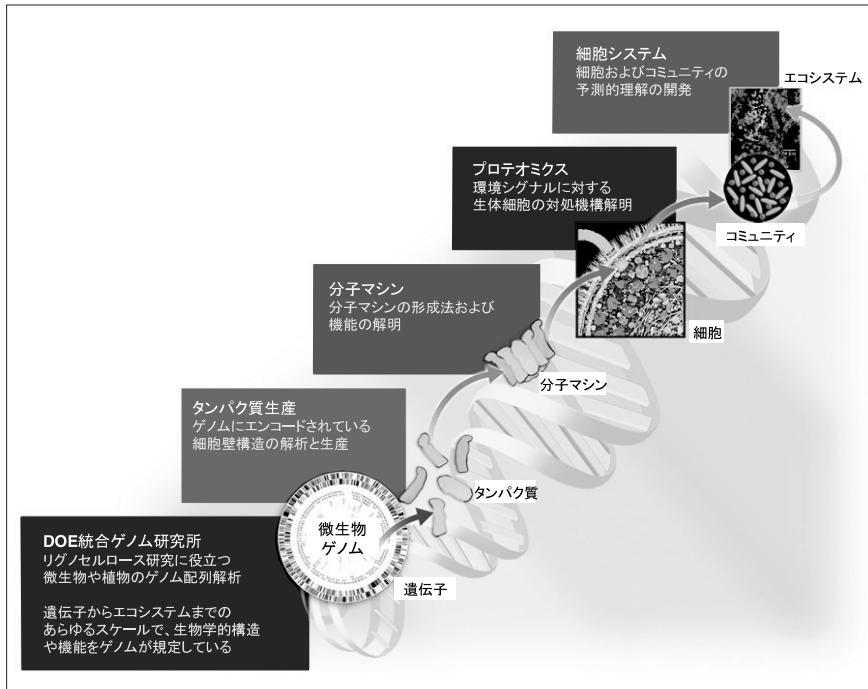
化する研究も活発化しており、注目される³⁷⁾。

「発酵工程の高効率化」については、遺伝子組換えにより C5 糖と C6 糖を同時に発酵可能な酵母や、エタノールや熱への耐性が高い酵母、更には糖化酵素を酵母表

層に結合して糖化と発酵を同時に行える酵母などについて、さまざまな研究がなされている。

米国では特に、酵素技術による飛躍的な生産性向上とコストダウンを目指し（図表 15）、分子生物学的アプローチに基づく研究に重

図表 16 米国 DOE における分子生物学的アプローチによるバイオエタノール研究



出典：参考文献³⁶⁾

点が置かれている (図表 16)。新規有用微生物・酵素や代謝経路の獲得、代謝制御法の確立などの研究課題に対し、微量化合物の迅速分析装置やシミュレーション手法を用い、ゲノム/蛋白質/代謝機構の解明およびデータベース化を進めている。

例えば、米国の大手酵素メーカーと国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) では、セルロースと酵素の相互作用と、セルロース高次構造における分解活性点を解明し、特定有用酵素 (セルラーゼ) の低コスト生産につながる成果を報告している¹⁶⁾。現在、米国エネルギー省 (DOE) により支援されたベ

ンチャー企業により、工業化に向けた実証試験が行われている。また、これらの知見はセルラーゼに分解されやすい植物の品種改良にもフィードバックされている。

3 - 3 バイオディーゼル燃料関連技術

現在、バイオディーゼル燃料 (BDF) としては、植物油を原料とした脂肪酸メチルエステル (FAME) が用いられ、欧州や東南アジアを中心に実用化が進んでいる。FAME の問題点としては、酸化されやすく貯蔵安定性が悪い

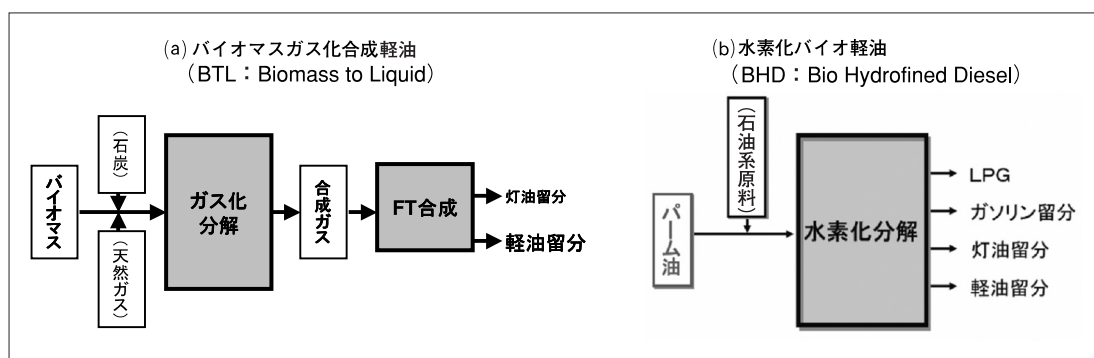
ことが挙げられる。また、使用する油脂原料の違いにより燃料性状が異なり、原料によっては低温で固まりやすく、中緯度以上の地域では冬期に使用することができない場合もあるなど、流通面での課題が多く、大規模な普及の妨げとなっている。

BDF における第二世代バイオ燃料技術としては、多様な油脂原料から安定的な燃料性状に変換することが主要課題となっている。大別してバイオマスガス合成軽油 (BTL : Biomass to Liquid) と水素化バイオ軽油 (BHD : Bio Hydrofined Diesel) の二つの方法が提案されている (図表 17)。近年、特に後者の BHD について、産業界を中心に実証されてきており、技術開発段階としてはリグノセルロースからのエタノール変換技術などよりも、燃料変換技術として実用化ステージに近い。

3 - 4 論文分析による各国の研究動向比較

バイオ燃料関連技術の科学技術論文数の各国の推移を見ると、1990 年頃から急激に増加した。地域別で比較すると、エタノール、BDF および資源作物の研究のいずれも、EU15 カ国と米国の論文数が突出して多い (図表 18)。特に 90 年代以降、EU15 カ国および米国と、その他の地域との差が急

図表 17 第二世代バイオディーゼル燃料関連技術の 2 つのプロセス



参考文献³⁸⁾ を基に科学技術動向研究センターにて作成

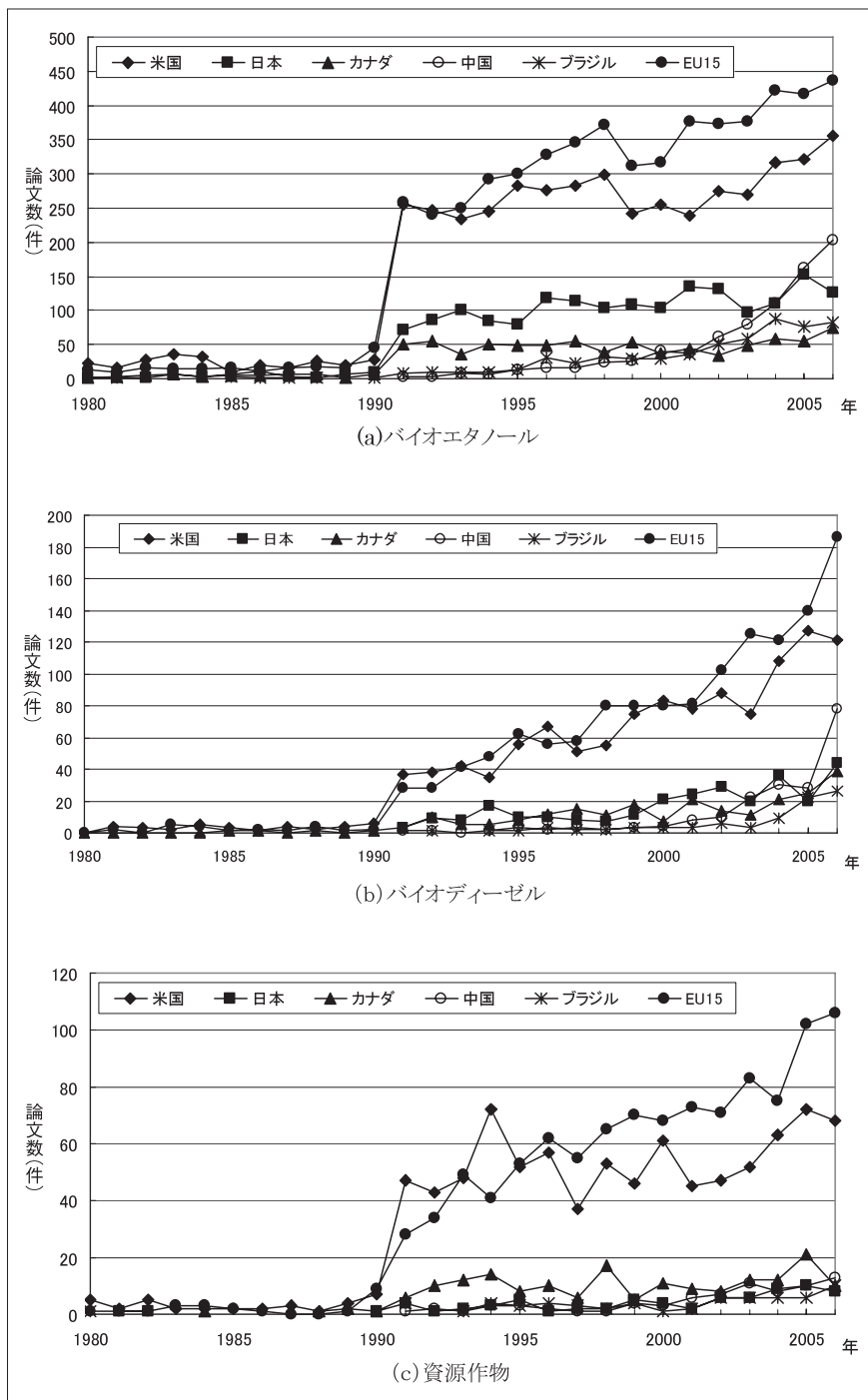
拡大している。米国では1990年に改正大気浄化法が施行され、一酸化炭素排出削減を目的に含酸素燃料の添加が義務付けられ、エタノール需要が急拡大している³⁹⁾。90年代以降のバイオ燃料研究の活発化はこれが影響しているものと推察できる。

中国では2000年以降に論文数が急拡大しており、特に直近の2006年には、エタノール、BDFおよび資源作物の研究のいずれも、日本の論文数を上回っている。中国では1986年1月に施行した「国家高技術研究発展計画(863計画)」より、バイオ燃料の研究開発の重点化に取り組んできた⁴⁰⁾。2001年の「第十次五カ年計画」では「エタノール混合ガソリンの発展計画」が盛り込まれ、導入モデル事業や法整備が進められた。また、2006年の「第十一次五カ年計画」では、国家エネルギー戦略の中に再生可能エネルギーを重点開発分野として位置付けた。これを受けて、2006年にはアジアでは最初となる「再生可能エネルギー法」を施行するとともに、「再生可能エネルギー中長期発展計画」によって、2020年までにバイオマスを中心とする再生可能エネルギーのシェアを、一次エネルギーの16%に引き上げる方針を示している⁴¹⁾。これらを背景に、中国におけるバイオ燃料研究が活発化しているものと推察できる。

ブラジルとカナダでは、従来はバイオエタノールの研究が中心であったが、近年、バイオディーゼルの研究も活発化してきている。

次に、リグノセルロースのエタノール変換技術について、どのような研究分野の論文が多いかを地域別で比較する。化学工学や応用化学分野では日米欧がほぼ拮抗しているが、バイオテクノロジー、

図表 18 各国のバイオ燃料変換技術の科学技術論文数の推移



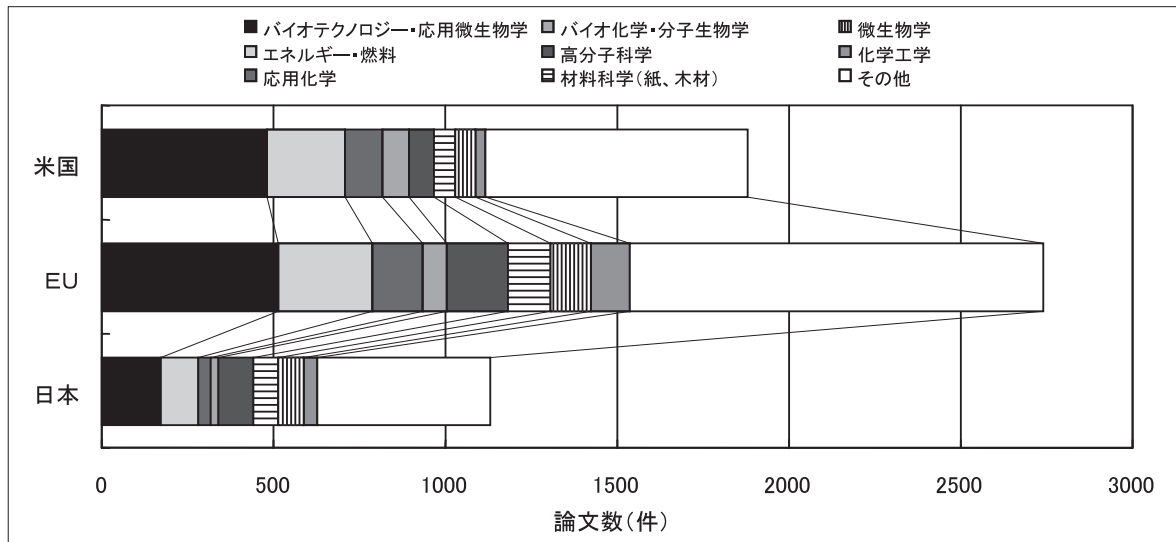
Thomson Scientific 社データベース “Web of Science” を用いて科学技術政策研究所において集計

分子生物学、微生物学分野では、いずれも米欧が日本を圧倒している(図表 19)。従来、発酵を中心とする微生物学分野は日本が強いとされていたが^{42, 43)}、リグノセルロースのエタノール変換技術の研究分野に限って見れば、十分にその強みが発揮されていない。

各分野の論文生産数の上位研究機関を見ると、大多数は米国勢が占めているが、リグノセルロースのエタノール変換技術分野については、スウェーデンのルンド大学とカナダのプリティッシュコロンビア大学が米国勢を抑えて上位を占めており注目される(図表 20)。

両拠点とも樹木を中心としたリグノセルロース系資源作物の先端的な研究成果をあげているだけでなく、バイオマス総合利用システムに関する産業界や他研究機関との連携を通じ、エネルギーとライフサイエンス分野の融合領域の拠点となっていることが注目される。また、バイオディーゼルの研究では、インド工科大学や中国科学院が上位を占めていることも注目される。

図表 19 各国のリグノセルロース関連論文の対象分野比較 (1980年以降の累計論文数)



Thomson Scientific 社データベース “Web of Science” を用いて科学技術政策研究所において集計

図表 20 バイオ燃料関連研究拠点の論文生産数順位 (1980年以降の累計論文数)

エタノール (リグノセルロース)				バイオディーゼル				エネルギー資源作物			
順位	拠点名	国	論文数	順位	拠点名	国	論文数	順位	拠点名	国	論文数
1	ルンド大学	スウェーデン	132	1	インド工科大学	インド	55	1	米国農務省農業科学教育局	米国	153
2	ブリティッシュコロンビア大学	カナダ	101	2	中国科学院	中国	46	2	フランス国立農業研究所	フランス	83
3	米国農務省農業科学教育局	米国	97	3	米国農務省農業科学教育局	米国	45	3	スウェーデン大学	スウェーデン	52
4	ロシア科学アカデミー	ロシア	69	4	米国環境省	米国	40	4	カリフォルニア大学デービス校	米国	45
5	国立再生エネルギー研究所 (NREL)	米国	64	5	ネブラスカ大学	米国	35	5	オークリッジ国立研究所	米国	42
6	京都大学	日本	63	6	テキサス大学	米国	34	6	テキサスA&M 大学	米国	37
7	フランス国立農業研究所	フランス	61	7	カリフォルニア大学パークレー校	米国	29	7	米国農務省農業研究サービス	米国	36
8	東京大学	日本	57	8	京都大学	日本	26	7	中国科学院	中国	36
9	中国科学院	中国	51	8	アテネ工科大学	ギリシャ	26	7	フロリダ大学	米国	36
10	コーネル大学	米国	50	8	アイダホ大学	米国	26	7	レディング大学	英国	36

Thomson Scientific 社データベース “Web of Science” を用いて科学技術政策研究所において集計

4 研究開発に取り組む上での日本の課題

世界的に活発化している革新的な第二世代バイオ燃料技術の多くは、分子生物学や作物栄養学といったライフサイエンス分野の知見に立脚することが不可欠である(図表21)。これまで日本のエネルギー分野の研究は、これらの研究分野との研究者同士の交流や融合が活発ではなかった点を見直す必要がある。

バイオマスは第3期科学技術基本計画において、環境分野の戦略重点科学技術に選定されており(注: エネルギー分野ではない)、総合科学技術会議でもバイオマス連携施策群を設けている。バイオマス関連の省庁を越えた連携と情報交換に取り組まれているが、個別テーマのバイオ燃料に関しては、研究領域の融合化や連携推進

が十分に進んではいない。2007年4月に設立された「研究独立法人バイオ燃料研究推進協議会」には、バイオ燃料に関する国内の主要公的研究機関が参画しており⁴⁴⁾、今後これらに分野の融合領域のロードマップコミュニケーションを促す役割が期待されている。

図表21 ライフサイエンスの知見が必要なバイオ燃料研究分野

研究分野	目標	研究対象	研究課題	必要な資源・基盤・リソース	
微生物生産	発酵	発酵生産性飛躍的向上	一次代謝産物 二次代謝産物 合成中間体 その他生体成分	新規有用微生物の獲得 新規有用酵素/酵素群/代謝経路の獲得 高度な発現制御法の確立 高度な代謝制御法の確立 細胞間/生物間相互作用制御法の確立 環境応答制御法の確立 増殖/代謝加速の達成 無/低酸素高速発酵の確立	複雑系微量化合物の迅速分析 経時的連続的な転写・代謝解析 単一細胞内現象解析 特定菌株の全蛋白質機構解明 細胞間/生物間相互作用解明 環境応答機構解明 高効率遺伝子操作技術・素材微生物ゲノム/蛋白質/代謝データベース 代謝/発酵シミュレーション技術 計測・制御技術、分離・精製技術
	生産システム	安価なバイオエネルギーの利用拡大	作物生態系環境	コミュニティゲノミクス 非滅菌系での微生物間相互作用の解明 生態系制御	メタゲノム、メタトランスクリプトーム 超微量物質同定装置 生態構造解析・シミュレーション技術
植物生産性	農業生産物	収量拡大	エネルギー資源作物(穀類・豆類・イモ類・油脂植物)	ゲノムベースの作物特性の理解 雑種強勢、生殖隔離、シンクソース機能 ストレス耐性、環境適応性 生物間相互作用(寄生、共生、菌根菌、土壌微生物) 栽培過程のゲノムレベル解析 各種作物への有用遺伝子導入	ゲノムデータ 野生種リソース ハイスループットな選抜法 メタボローム、プロテオーム QTL解析用交配集団 遺伝子組み換え作物の開放系評価システム 植物での遺伝子制御発現制御 植物工場
	樹木・草本類による生産	植物体生産収量拡大	リグノセルロース	リグニンの効率的逐次機能変換 樹木成分の変換・分離 植物素材の循環設計解説 生合成系/生合成制御系の解明 生物的成分変換法開発(微生物領域との融合) セルロース分解系(分解糖)原料の発酵生産	

科学技術動向研究センターにて作成

5 まとめと提言

近年、欧米を中心に、中長期的な化石燃料依存度低減に向け、輸送用代替燃料の一翼を担うべく、「エネルギー資源作物」と「バイオ燃料変換技術」の研究開発が活発化している。本論文では日本における石油代替燃料としてのバイオ燃料の可能性を、量およびコス

トの両面で整理した。主な点は以下にまとめられる。

- 世界人口がピークを迎える2050年時点に、資源用作物と食料との競合が最も顕在化すると想定される。現実的に可能な農地拡大面積と穀物需要見通しに

基づき、可能なエタノール供給量を推算した結果、世界全体での土地利用ポテンシャルとしては、世界人口の食料を十分満たした上で、バイオ燃料需要量を十分満たすことが出来ると推定される。

- 「革新的エタノール変換技術」

と「大規模原料生産」および「燃料課税減免制度」という条件が揃えば、日本においても現在のガソリン価格や海外産バイオマスとコスト競争力がある国産バイオ燃料の供給も可能である。ただし、国内の土地利用の現実的な状況を踏まえると、量的には限定されると見るべきである。

- 日本が海外産バイオ燃料を輸入する場合、「燃料課税減免制度」が導入された条件下では、現在のガソリン価格に競合可能な価格を実現しうる。ただし、輸入価格変動幅は非常に大きく、常に競合できるとは言い切れない。世界的に供給原料を多様化するために、第二世代バイオ燃料技術の研究開発が進展している。日本もこの動きに注目し、独自技術を開発するべきである。

これらを踏まえ、日本における第二世代バイオ燃料技術の研究開発の課題と対応について、以下の点が提言できる。

①バイオ燃料の国家導入戦略と第二世代バイオ燃料技術の研究開発ロードマップ構築

日本において輸送用燃料としてバイオ燃料を導入する上では、国産バイオマス資源を最大限に有効活用することが肝要である。ただし、化石燃料と競合可能なコストで生産できるバイオ燃料は国内では量的に限定されると見るのが現実的であり、今後海外で拡大が予想されるエネルギー資源向け耕地の開発権益の獲得に努める必要が生じる。その際、日本が海外資源を獲得していくにあたっては、海外資源国から見ても価値のある日本独自の第二世代バイオ燃料技術が必要である。バイオ燃料の国家導入目標および時期を明確に設定し、国内・海外資源のバランスをふまえた資源確保戦略を立て、制度対応（土地利用・農業政策、

税制、各種規制見直し）のあり方を検討した上で、それらと整合した形で、第二世代バイオ燃料技術の研究開発ロードマップ構築が不可欠である。

②エネルギー資源作物の生産対象となる土地条件明確化と研究対象の絞込み

エネルギー資源作物は、育成時の単位エネルギー投入量あたりの生産性増大や低コスト生産が、食用作物よりはるかに強く求められる。その際、どのような土地条件（気候、土壌）を前提とするかで、研究のアプローチが全く異なってくる。食料生産との棲み分けと現実的な生産性確保の観点から、極端な乾燥地や塩害劣化地ではなく、酸性土壌やアルカリ土壌でかつ一定の降水量のある未耕作地が有望な対象と想定とされる。国内外に限らず、中長期的な視点で日本がエネルギー資源作物生産を期待できるそのような土地条件を整理し、そこで栽培できる作物技術の研究ターゲットを絞り込むことが重要である。

③第二世代バイオ燃料技術開発を目指したエネルギー分野とライフサイエンス分野の研究融合

世界的に活発化している革新的な第二世代バイオ燃料技術の多くは、分子生物学や作物栄養学などのライフサイエンス分野の知見に立脚して展開されている。これまで、日本のエネルギー分野の研究は、ライフサイエンス分野との融合化が十分に進んでおらず、日本が強いと言われる発酵を中心とする微生物学分野などの研究蓄積が活かしきれていない。これらの融合領域での人的交流による研究の活発化を目指すことが重要である。欧米の事例に見られる産学連携拠点の成功要因を十分調査し、日本においてもそのような拠点を形成して研究資源を集中化するべ

きである。また、第二世代バイオ燃料技術の研究開発拠点には、資源国からも研究者を積極的に招き、人材育成や技術協力を通じ、資源確保に向けた関係強化を一体で行うべきである。

謝辞

本稿の執筆にあたり、東京大学名誉教授 森敏博士、東京大学大学院農学生命研究科 横山伸也教授、鮫島正浩教授、西澤直子教授、川島博之准教授、神戸大学工学部応用化学科 近藤昭彦教授には、全般にわたって貴重なご意見、ご助言ならびに資料をご提供いただきました。独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構バイオマス研究センター片山秀策センター長、岡田謙介博士、上田達己主任研究員、独立行政法人森林総合研究所 山本幸一博士、大原誠資博士、田中良平博士、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー技術部 木内主任研究員、独立行政法人産業技術総合研究所バイオマス研究センター 坂西欣也センター長、独立行政法人理化学研究所植物科学研究センター 出村拓博士、財団法人地球環境産業技術研究機構 湯川英明博士、三宅親弘博士には、貴重なご意見ならびに資料をご提供いただきました。関係の皆様へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大森良太ら；科学技術動向、2001年12月、No.9、pp20 - 31：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt009j/feature2.html#3-0>
- 2) 大平竜也；科学技術動向、2005年5月、No.50、pp11 - 21：
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt050j/0505_03_feature_articles/200505_fa01/200505_fa01.html
- 3) 坂志朗；「バイオマス・エネルギー

- ー・環境」、アイビーシー (2001年1月)
- 4) (社)日本エネルギー学会;「バイオマスハンドブック」、オーム社、2002年9月
- 5) 環境省中央環境審議会地球環境部会第35回配布資料1-2;「温室効果ガス排出量について」2006年6月:
http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-35/mat01_2-1.pdf
- 6) 環境省エコ燃料利用推進会議「輸送用エコ燃料の普及拡大について」、2006年5月:
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf_ecofuel/rep1805/
- 7) 「京都議定書目標達成計画」、2005年4月閣議決定:
<http://www.env.go.jp/houdou/gazou/5937/6699/2278.pdf>
- 8) 「バイオマス・ニッポン総合戦略」、2006年3月閣議決定
http://www.maff.go.jp/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf
- 9) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議「国産バイオ燃料の大幅な生産拡大」、2007年2月総理報告別紙:
http://www.maff.go.jp/www/press/2007/20070227press_1b.pdf
- 10) 産業競争力懇談会 (COCN);「バイオ燃料プロジェクトについて (報告書) ~年産100万kl、40円/lを目指して~」、2007年4月:
<http://www.cocn.jp/common/pdf/6baionenryo.pdf>
- 11) 国際連合;「World Population Prospects: The 2006 Revision」
<http://esa.un.org/unpp/>
- 12) 国際連合食料農業機関;「FAOSTAT」:
<http://faostat.fao.org/site/377/default.aspx>
- 13) 国際連合食料農業機関;「World agriculture: towards 2010: an FAO study」, John Wiley & Sons Inc (1995年):
<http://www.fao.org/docrep/v4200e/v4200e00.htm>
- 14) 農林水産省国際食料問題研究会第二回配布資料1「世界の食料需給の見通し」、2007年3月
http://www.maff.go.jp/www/council/council_cont/kanbou/syokuryo_mondai/02/data01.pdf
- 15) 欧州委員会;「Biofuels in the European Union-A vision for 2030 and beyond」、2006年:
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels_vision_2030_en.pdf
- 16) 米国エネルギー省;「Genomics: GTL Roadmap」、2005年8月:
<http://genomicsgtl.energy.gov/roadmap/>
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会石油分科会燃料政策小委員会;「第二次中間報告書」、2004年7月:
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g40705a02j.pdf>
- 18) 経済産業省;「ブラジルからのエタノール輸入可能性に関する調査研究報告書」、2005年5月:
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g50524a41j.pdf>
- 19) 農林水産省国産輸送用バイオ燃料推進本部第一回配布資料;「バイオ燃料をめぐる情勢」、2006年6月:
<http://www.maff.go.jp/biomass/dpt/01/data02.pdf>
- 20) 小林真;「多収性資源作物開発の現状と展望」;農研機構バイオマス・シンポジウム資料、2006年9月
- 21) 全国農業会議所;「2005年遊休農地対策データベース」
<http://www.nca.or.jp/Nochi/yukyu-db/Yuukyu2/index.html>
- 22) 農林水産省;「農林水産基本データ集 (平成19年5月)」:
<http://www.maff.go.jp/www/info/shihyo/shihyo070531.pdf>
- 23) 国土交通省;「平成18年度土地に関する動向 (案)」、2007年5月:
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/tochi/h19/h19tochi.pdf>
- 24) 農林水産省農林水産技術会議;「バイオマス変換計画」、光琳、1991年3月
- 25) 中川仁;農業および園芸、第76巻第1号、2001年、pp3-10
- 26) 農林水産省農林水産技術総合研究機構;「平成18年度農業技術の研究ターゲットに関する調査研究」、2006年12月
- 27) 新エネルギー・産業技術総合開発機構;「NEDO海外レポートNo983」、2006年8月:
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/983/index.html>
- 28) 新エネルギー・産業技術総合開発機構;「NEDO海外レポートNo984」、2006年9月:
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/984/index.html>
- 29) 新エネルギー・産業技術総合開発機構;「NEDO海外レポートNo994」、2007年2月
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/994/index.html>
- 30) 米国科学アカデミー紀要 (PNAS)、vol.104、No18、pp.7373-7378、2007年5月:
<http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/104/18/7373>
- 31) 科学技術振興機構;「第三世代バイオマス技術の日米欧研究開発比較」、2006年5月
<http://crds.jst.go.jp/output/pdf/06gr01.pdf>
- 32) 新エネルギー・産業技術総合開発機構;「平成17年度バイオマスエネルギー高効率転換技術開発成果報告会予稿集」、2007年2月
- 33) 財地球環境産業技術研究機構;「革新的バイオマス利用システムの実現可能性に関する調査研究報告書」、2007年3月:
http://www.rite.or.jp/Japanese/kicho/chosa/hokokusho/h18kikai_chosa.pdf

- 34) 米国国立再生エネルギー研究所；「Unraveling the Structure of Plant Life」、2004年7月
<http://www.nrel.gov/docs/gen/fy04/36356.pdf>
- 35) 米国エネルギー省；「Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol」、2005年6月
<http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/2005workshop/b2blowres63006.pdf>
- 36) 米国国立再生エネルギー研究所；「On the Road to Future Fuels and Vehicles」、2005年7月
http://205.168.79.26/research_review/pdfs/2005/38668a.pdf
- 37) 三重大学資源循環学科生物循環機能学研究室ホームページ：
<http://www.bio.mie-u.ac.jp/~karita/cellulosome.html>
- 38) 財石油産業活性化センター；「第2世代バイオ燃料製造技術の研究開発に関する報告書」、2007年3月：
http://www.pecj.or.jp/japanese/plaza/euro/bioenergyreport_rev1.pdf
- 39) 小泉達治；「米国における燃料用エタノール政策の動向」、農林水産政策研究、2006年第11号、pp.53 - 72
- 40) Chew Chong Siang；「中国の新・再生可能エネルギーの動向」、IEEJ2006年1月号、pp.1 - 15
- 41) Chew Chong Siang；「中国の再生可能エネルギー中長期発展計画」、IEEJ 2007年4月号、pp.1 - 23
- 42) 特許庁；「バイオテクノロジーの環境技術への応用に関する技術動向調査」、2001年5月
<http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/kankyo.pdf>
- 43) 特許庁；「ライフサイエンスに関する特許出願技術動向調査報告」、2003年4月：
http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/life_science.pdf
- 44) 農林水産省他プレスリリース「研究独法バイオ燃料研究推進協議会の発足について」、2007年4月：
http://www.maff.go.jp/www/press/2007/20070419press_5.html

執筆者



環境・エネルギーユニット

前田 征児

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



工学博士。エネルギー関連の貯蔵・変換システムの研究開発に従事。専門は電気化学、材料工学。現在、エネルギー・環境分野の科学技術政策およびイノベーションマネジメントに興味を持つ。