

サマリー

日本におけるバイオディーゼル導入について

平井 晴己、永富 悠、中西 哲也、洪 起源、姜 京善

バイオ燃料は、これまで環境問題（CO₂ 排出抑制）の観点から注目を浴び、世界各国で導入の動きが加速してきた。しかしながら、昨今では原油価格が急騰する一方、食糧価格も急騰しており、環境問題にととまらず食糧の競合についても重大な関心が払われはじめた。本報告書では、バイオ燃料のうちバイオディーゼル燃料（BDF）の、日本への導入可能性について、供給量、コスト、環境問題の3点を中心に検討を行った。

1. 供給可能性

- (1) B5（軽油に5%混合）におけるBDFの必要量は約190万KL（2004年度ベース）
- (2) その大半は輸入であり、原料はパーム油
- (3) インドシアからの輸入により十分に賄うことが可能

2. 供給コスト

- (1) 原油価格以上の植物油脂価格の高騰により、軽油に対して割高となっている
- (2) 現状では採算に乗りにくい

3. 環境問題

- (1) LCA 評価によるCO₂の排出量は、熱帯雨林に蓄積された炭素量の喪失をどう評価するかにより大きく変化
- (2) 生態系への影響や食料との競合問題についても十分な配慮が必要

BDFは、既存の石油系燃料のインフラを殆どそのまま利用でき、その利便性は極めて高いと考えられるが、現状では、大規模な全国的な導入は困難を伴うと考えられる。中長期的な観点からは、環境に適合し食糧と競合しない木材系バイオマスによるガス化・FT合成などの技術開発への取り組みが必要と考えられる。

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp

日本におけるバイオディーゼル導入について*

計量分析ユニット**	研究主幹	平井 晴己
	研究主幹	中西 哲也
	主任研究員	洪 起源
	主任研究員	姜 京善
	研究員	永富 悠

はじめに

バイオ燃料は、環境問題、特に二酸化炭素排出抑制の観点から、カーボンニュートラルとして注目を浴び、過去数年に渡る原油価格の上昇と相まって、世界各国で導入の動きが加速してきた。しかしながら、ここに来て、米国における燃料用エタノールの拡大が、原料であるトウモロコシ価格の高騰を促し、それが他の食糧へ連鎖して世界的な食糧価格の高騰をもたらすに至り、俄かに「食糧と燃料の競合」が現実味を帯びるようになってきた。食糧と燃料の棲み分けが、今後、重要な課題となろう。

熱帯系作物である油椰子から採取されるパーム油は大豆油を抜いて最大の生産量を誇るようになったが、その栽培地は、地上のバイオマス中、最大の炭素 (CO₂) 貯蔵地である熱帯雨林の地域であり、その伐採と耕地化が必要である。この場合、元来、熱帯雨林が固定していた炭素量は、油椰子が代わって固定する炭素量よりもはるかに大きく、炭素の固定量 (ストック) は明らかに減少する (減少した分は大気へ放出される)。

EUの環境委員会 (EEB、2005 年) は、域外からのバイオ燃料の輸入は「環境破壊の輸出」とならないことが原則だと述べているが、これは 1997 年におけるスマトラ島の森林大火災が 1 つの契機となっている。欧州の NGO 団体が、パーム油の輸入は熱帯雨林の破壊につながるという批判を行なった¹。その後、様々な議論がなされ、現在では「持続的生産可能なパーム油とは何か」という取り組みが、生産者や消費者、NGO や政府団体を含めた包括的な議論へと発展してきているが、改めて「環境にやさしいバイオ燃料とは何か」という議論をしていく必要がある。

原油価格の高騰はとどまることを知らず、2008 年 1 月には一時的に WTI 価格は 1 バレルあたり、100 ドルを突破した。高騰するエネルギー価格と食糧価格を前にして、冷静で客観的なバランスある分析と議論が必要と考えられる。

* 2008 年 6 月 24 日に開催した第 34 回研究報告・討論会で発表された同名の報告は、本報告書 (2007 年 12 月) をもとに最近の動向を加味して作成されたものである。

** 中西研究主幹 (現、新日本石油)、洪主任研究員 (現、SK エナジー)、姜主任研究員 (現、韓国石油品質管理院) の他、森田研究理事、奥村研究主幹にも多大な協力と支援を頂いた。

¹ 油椰子の植え替えのための「火入れ」が森林火災の原因とも言われているが詳細は定かでない。

第1章 序論

第1節 バイオ燃料とは何か

1-1 輸送用バイオ燃料の分類

輸送用燃料として利用されるバイオ燃料は、下記の通り、ガソリンに混合するエタノールと軽油に混合する植物油脂¹（少量だが、動物油脂も利用される）の2つに分かれる。商業化している製造方法としては、(1)エタノール：トウモロコシやサトウキビから発酵させて製造する方法（生化学的方法）、(2)植物油脂：油糧種子から搾油して、エステル交換処理または水素化処理（化学的方法）する方法がある。若干の例外があるものの²、現段階では食糧系バイオマスからの製造に限られる。

(1) エタノール（ガソリンへの混合）：生化学反応

①トウモロコシ、米、麦：澱粉質（糖化－発酵）

②サトウキビ、てんさい：糖質（発酵）

(2) 植物油脂（軽油への混合）：化学熱力学反応

ナタネ油、大豆油、ひまわり油、パーム油：エステル交換、または水素化処理

エステル交換した植物油脂「FAME（脂肪酸メチルエステル）」を特にBDF（バイオディーゼル燃料）と呼ぶ場合があるが、本報告書では、植物油脂を水素化処理したものを含めてBDFと呼ぶことにする。牛や豚などの動物油脂に関しては、取り組み例は多くないものの代表的な取り組みとしてアメリカのコノフィリップスとタイソンフーズによる取り組みが挙げられる。これは植物油脂同様、動物油脂を水素化処理し軽油代替の燃料とするものであり、コノフィリップスが持つ既存の製油所を用いて処理する。

将来的な技術としては、非食糧系の原料である、セルロース系バイオマスからのエタノール製造や、木材系バイオマスをガス化して、FT合成（フィッシャー・トロプッシュ）法により軽油を合成する方法（BTL）³があるが、現段階で商業化しておらず、バイオ燃料は食糧生産と競合しているのが現状である。尚、本報告書は主にBDFに関してまとめたものであり、BTL、セルロース系エタノールに関しては特に詳細な検討は行っていない。

1-2 バイオディーゼル燃料

世界の4大植物油脂（あるいは植物油）には大豆油、ナタネ油、ひまわり油、パーム油があり、その搾油されるもとの原料である種子を「油糧種子」と呼ぶ。大豆油は食用油として利用される一方、その絞り粕も飼料用として利用されるので、大豆自体の需給は油と

¹ 植物油脂をそのまま混合するのではなく、エステル交換または水素化処理の加工後に混合する。

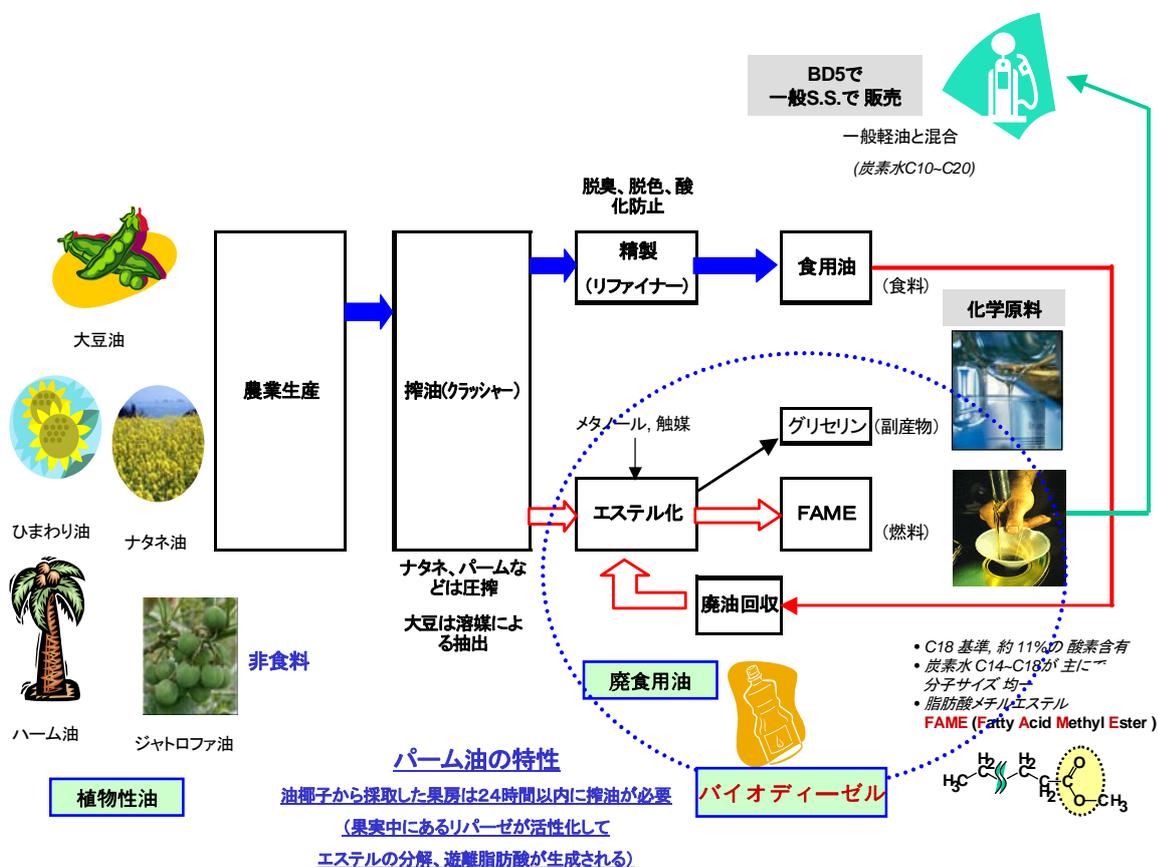
² 油椰子と同様の熱帯系作物であるが、実に毒があり食糧としては不適な「ジャトロファ（南洋アブラギリ）」の利用がある。インドなどの農村地域で栽培され燃料利用がされている。

³ 商業化されている製造方式を「バイオ燃料第1世代」と呼ぶのに対して、次世代バイオ燃料（第2世代、第3世代など）と呼ぶ。

粕の2つの市場の需給によって決まることになる。ナタネも同様であるが、パーム油は油椰子の果実から搾油されるものの、その絞り粕はそのまま廃棄されるので、パーム油という1つの市場で需給が決まることになる。大豆、ナタネ、ひまわりは油糧種子の形で搬送することが可能であるが、パーム油はその実が採取されてから24時間以内に搾油することが必要となるため、搾油は生産地で行われることになる。

図1-1に示すとおり、油糧種子から搾油された油は、食用の場合、脱色、脱臭、水素添加などの精製を行い食用油を製造する。燃料製造の場合は、搾油された植物油をメタノールによりエステル交換して脂肪酸メチルエステル(FAME)の形として利用する。現在生産されているBDFはその大半がFAMEであるが、今後は、エステル交換の代わりに水素化精製が増加すると思われる。FAMEはその品質を厳格に考えない場合は、反応条件は常温常圧のため、製造は比較的容易である。一方、水素化精製は反応条件が高圧高温となるため、石油精製の製油所や大規模な化学プラントでの処理が必要となる。高品質の燃料製造が可能であり、大量かつ広範に流通させることが可能となる。

図1-1 バイオディーゼル燃料の製造（概略）

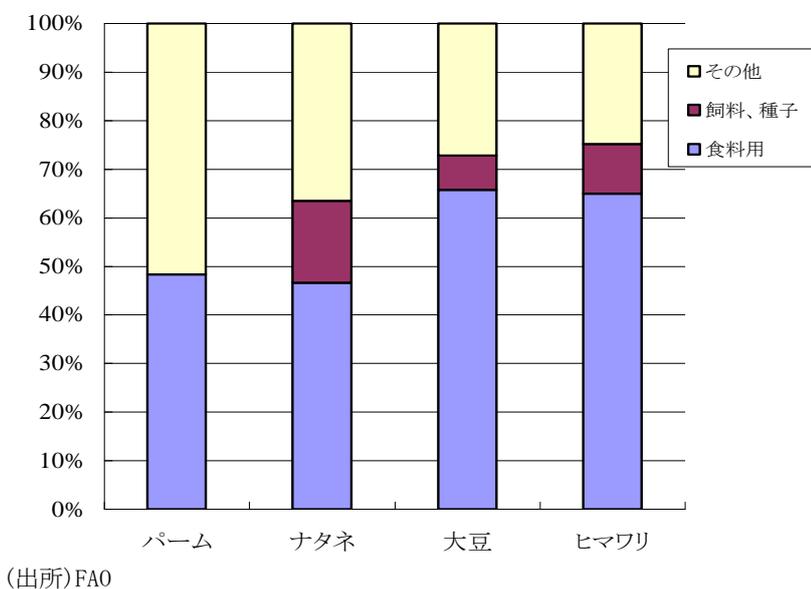


第2節 植物油の用途とマテリアルフロー

2-1 4大油脂の用途

図1-2に4大油脂の用途を示した。食料や飼料用・種子用として利用される比率が高いが、その他の利用として石鹼や洗剤などの工業原料になる他、再生可能原料として様々な化学合成原料としての利用価値が高まっている。比較的食糧系の比率が高い大豆やひまわりと、工業用原料としての利用比率が高いパーム油に分かれる。ナタネ油はEUを中心として燃料用としての利用比率が高い。

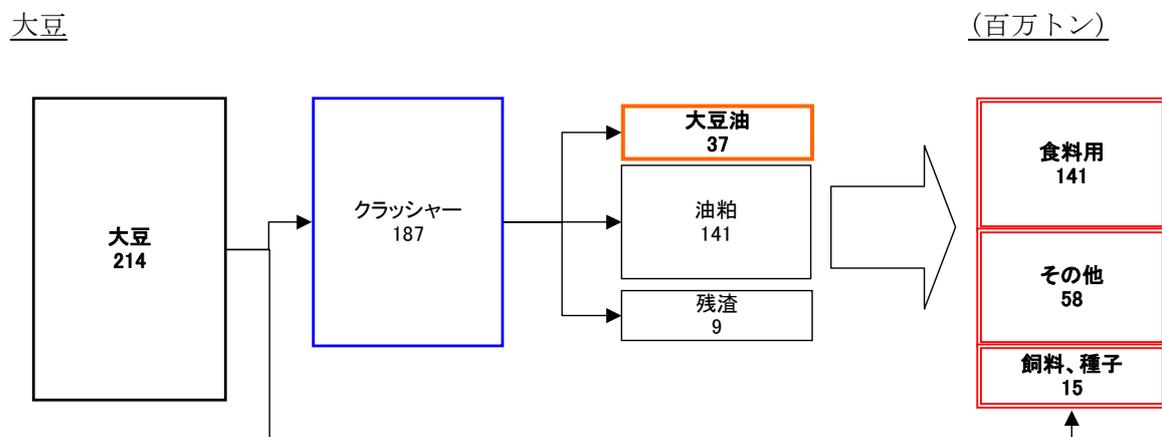
図1-2 4大油脂の用途(2005年)



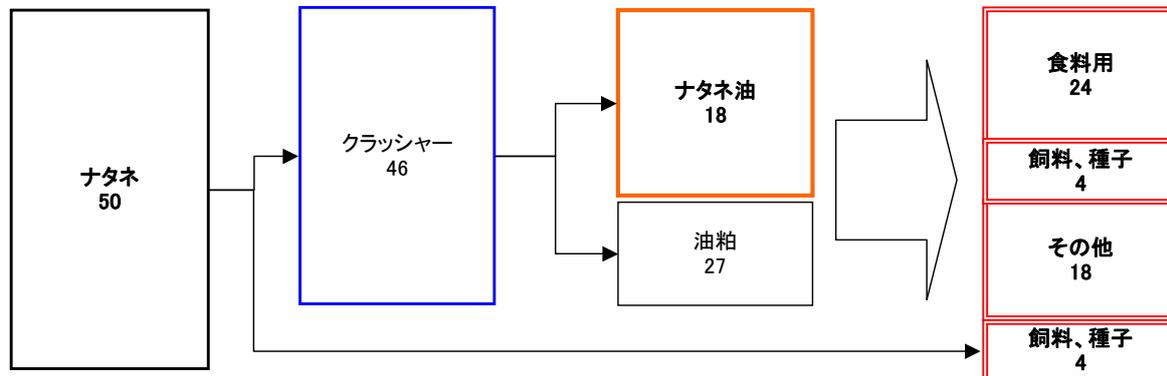
2-2 4大油脂のマテリアルフロー

4大油脂のマテリアルフロー（生産から需要に至るまで）を、図1-3に示した。

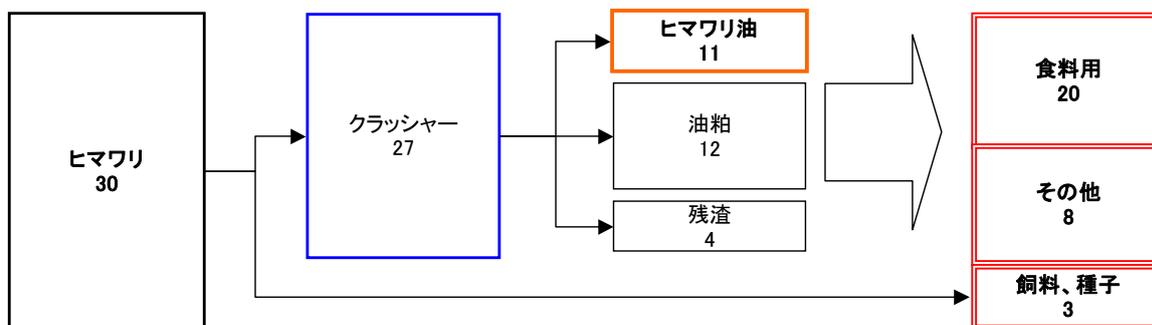
図1-3 4大油脂のマテリアルフロー(2005年)



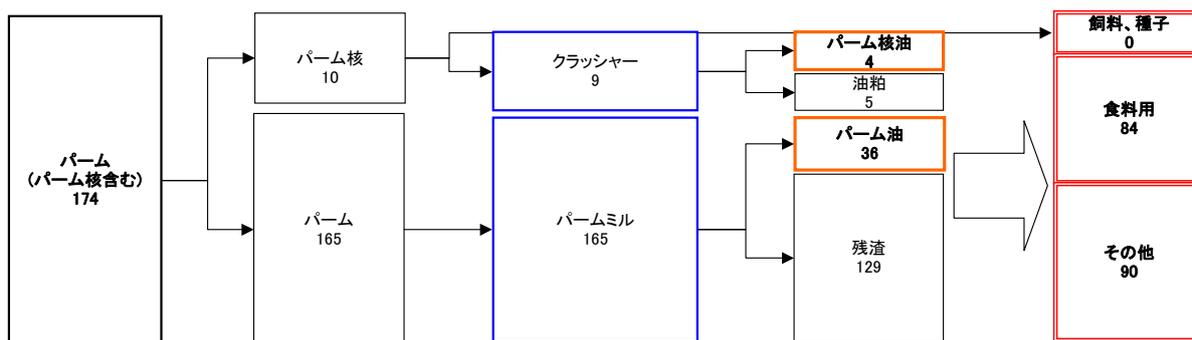
ナタネ



ヒマワリ



パーム



(出所)FAO 及び WORLD OIL 誌から作成

(注)数字は小数点以下を四捨五入したもの

第2章 バイオディーゼル燃料の需給動向

第1節 油糧種子及び植物油の需給バランス

1-1 油糧種子の特性及び生産動向

1-1-1 4大油脂の生産状況

油脂は、ナタネ、大豆などの作物から採取される植物性油脂と、魚や牛などから採取される動物性油脂に分かれ、食料用や石鹼などの製造原料として利用される。表 2-1 に示す通り、世界の油脂生産量は約1億5,000万トンで、植物油脂が約1億3,500万トン(90%)、動物油脂が約1,500万トン(10%)となっている。植物性油脂のうち、4大油脂と呼ばれる、大豆油、ナタネ油、ヒマワリ油、パーム油¹の合計生産量は約1億トン(70%)とその大半を占める。

表 2-1 油糧種子別油脂生産量 (2006年)

	生産量(千トン)	(比率)
大豆油	35,313	23.5%
菜種油	18,423	12.3%
パーム油	37,151	24.8%
ヒマワリ油	11,166	7.4%
その他	32,345	21.6%
植物油脂	134,398	89.6%
動物油脂	15,586	10.4%
油脂合計	149,984	100.0%

(出所) OIL WORLD(2007)

(注) パーム油にはパーム核油(2,386千トン)は含まず

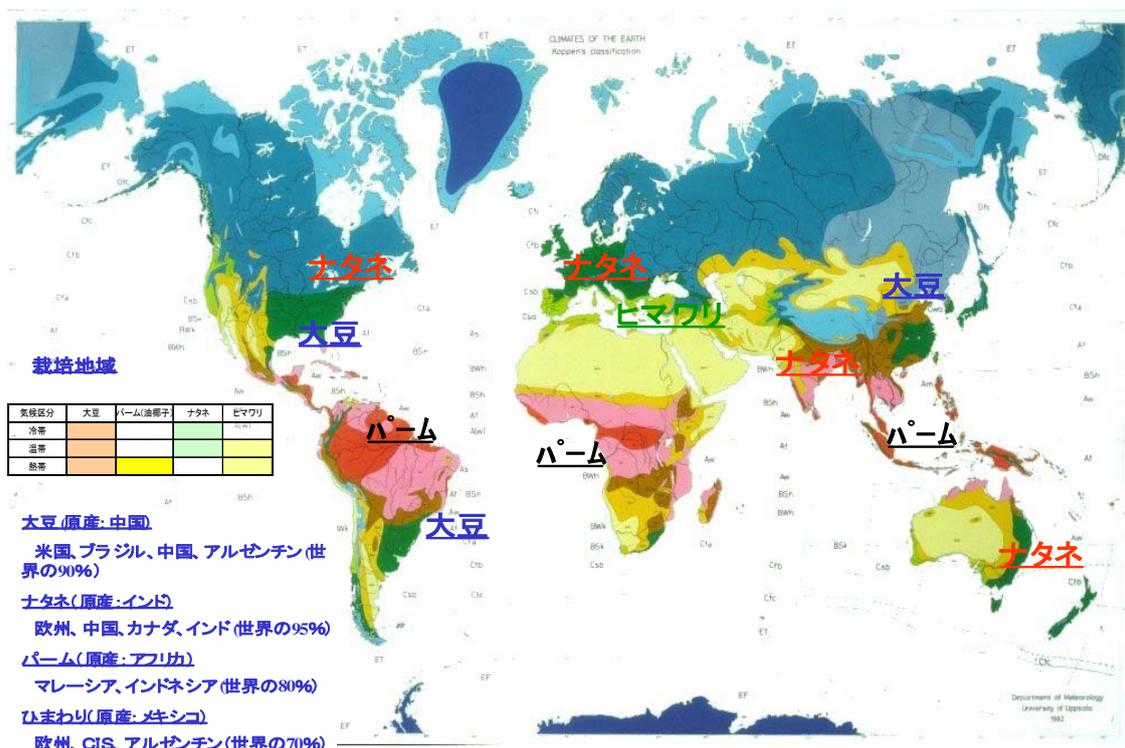
4大油脂の原料となる大豆(Soybean)、ナタネ(Rapeseed)、ヒマワリ(Sunflower)、油椰子(Palm)を油糧種子と呼び、その栽培地域は、大豆は温帯地域、ナタネは冷帯、温帯地域、ヒマワリは温帯、亜熱帯地域、パームは熱帯地域と各々地域が分かれる(図 2-1)。各種子の生産を概略すると以下の通りである。

- ① 大豆：主要生産地域は米国、ブラジル、中国、アルゼンチンで、この4国で世界の生産量の約90%を占める。
- ② ナタネ：主要生産地域は欧州、中国、カナダ、インドで、この4地域で世界の生産量の約95%を占める。

¹ 油椰子のFFB(Fresh Fruit Bunch)からパーム油(収率20%)と同時にパーム核油(2%)も生産されるが、上記の数字にはパーム核油の生産量は含まれていない。大豆、ナタネ、ひまわりは種子の形で長期の輸送や貯蔵が可能で、必要時に搾油することが可能であるので、種子(Oil Seed)、油脂(Oil)の双方で商取引がなされる。一方、パーム油は種子の果肉から搾油するため、FFB採取後24時間以内に搾油する必要がある。これは皮中にある酵素リパーゼの働きにより、遊離脂肪酸が発生するためであり、油脂の形のみで取引がなされる。但し、パーム核油の原料となる部分は種子であるので、大豆などと同様に種子での取引が可能である。

- ③ ひまわり：主要生産地域は欧州、ロシア、ウクライナ、アルゼンチンで、この4国で世界の生産量の約70%を占める。
- ④ パーム：主要生産地域は東南アジア、アフリカ、ブラジルなど熱帯地域であるが、マレーシア、インドネシア両国で世界の生産量の約80%を占める。

図 2-1 油糧種子の栽培地域



(出所)OIL WORLD

3

1-1-2 4大油脂の生産性、耕地面積の推移

表 2-2 に、4大油脂の1990年および2006年生産量を示した。

表 2-2 4大油脂の生産量の推移

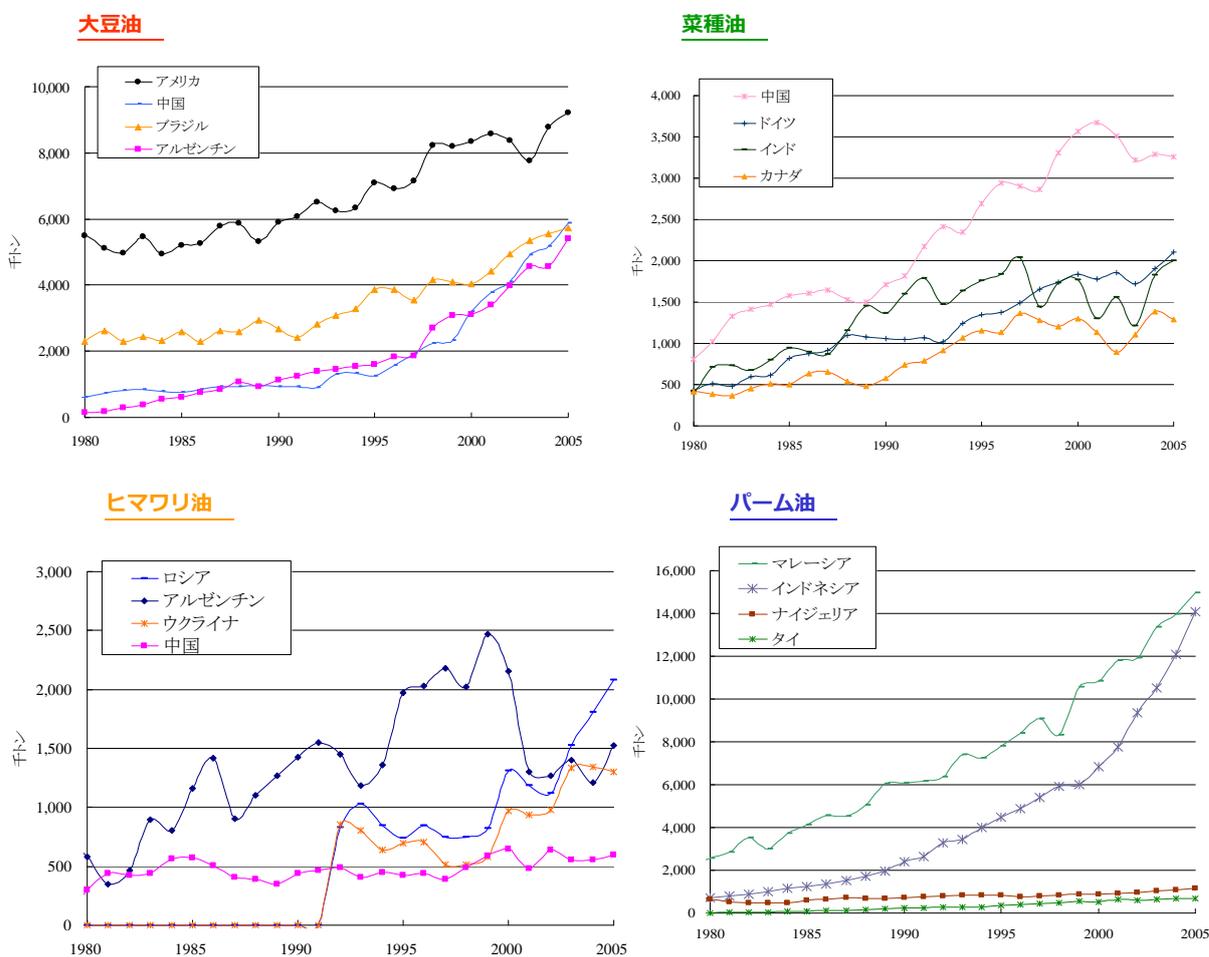
	耕地面積(千ha)			油生産量(千トン/年)			油収率(トン/ha)		
	1990年	2006年	年率(%)	1990年	2006年	年率(%)	1990年	2006年	年率(%)
大豆油	58,542	92,699	2.9%	16,143	35,313	5.0%	0.28	0.38	2.0%
菜種油	17,129	27,416	3.0%	8,176	18,423	5.2%	0.48	0.67	2.2%
パーム油	3,245	9,843	7.2%	11,027	37,151	7.9%	3.40	3.77	0.7%
ヒマワリ油	15,640	22,989	2.4%	7,804	11,166	2.3%	0.50	0.49	-0.2%

(出所)World Oil 誌

(1)生産量及び油収率の推移(表 2-2)

大豆油の生産量は、1990年の約1,600万トンから年率5%で増加し、2006年には約3,500万トンとなった。同時期、ナタネの生産量は約820万トンから年率5.2%で増加、約1,800万トン、ひまわりの生産量は約780万トンから年率2.3%で増加、約1,100万トンと大幅に増加した。特に著しいのはパーム油で、同時期、約1,100万トンから年率7.9%で増加、約3,700万トンとなり（1990年の約4倍）、最も生産量の多かった大豆油を追い抜き、世界1位となった。各油脂の生産性を比較すると、大豆油の場合²、2006年ベースで1haあたり0.38トン、ナタネが0.67トン、ひまわりが0.49トンとなっている。一方、パーム油は3.77トンと極めて高い生産性を示していることが分かる。図 2-2 に国別の生産量推移を示した。

図 2-2 4大油脂の国別生産量の推移



(出所)FAO

² 大豆油搾油後の油粕（大豆ミール）は飼料として利用され、油粕と油の2つが生産物となる。ナタネ、ひまわりも同様であるが、パーム油は絞り粕である EFB が商品価値のない残渣であるため単一生産物となる。

(2)生産性の推移(図 2-3)

過去 16 年間の生産量の増分要因を耕地面積の増大と油収率の上昇という観点から見ると、大豆油およびナタネ油の場合は、年率で耕地面積が約 3%、油収率は約 2%増加となり、この間に、品種改良などの生産性向上が図られてきたことが分かる。一方、パーム油は耕地面積の増大が約 7%、油収率の上昇が約 1%と、その大半が耕地面積の拡大に依存して成長してきたことが分かる。油収率は、種子収穫率（トン/ha）と搾油率に分かれる。図 2-3 に耕地面積あたりの種子収穫率（トン/ha）、図 2-4 に国別の耕地面積を示した。

図 2-3 4大油糧種子の国別収穫率の比較(2005年)

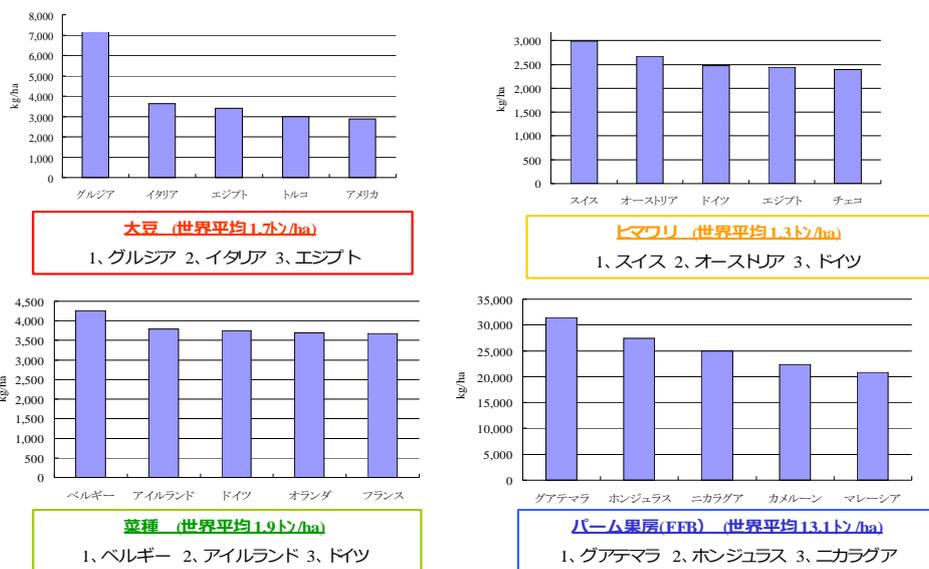
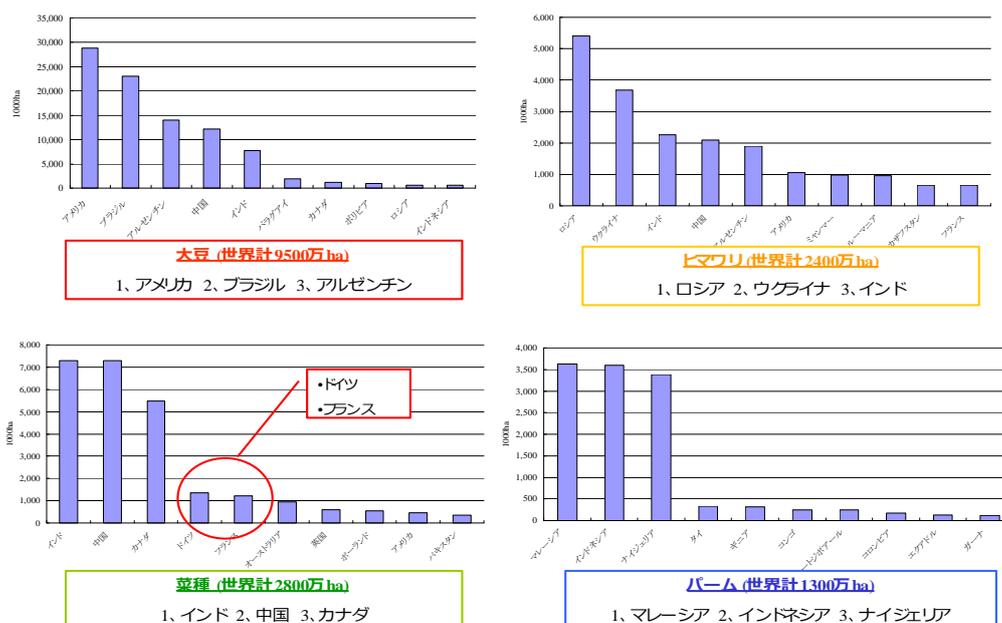


図 2-4 4大油脂の国別耕地面積の比較 (2005年)



(出所) FAO

1-2 パーム油の採取とその利用用途

1-2-1 パーム油の採取

図 2-5 に示すように、油椰子の木から採取された FFB（多数の果実が含まれる）の果実のうち、中果皮と呼ばれる部分から搾油したものがパーム油である。

図 2-5 油椰子（パーム）から採取された果実

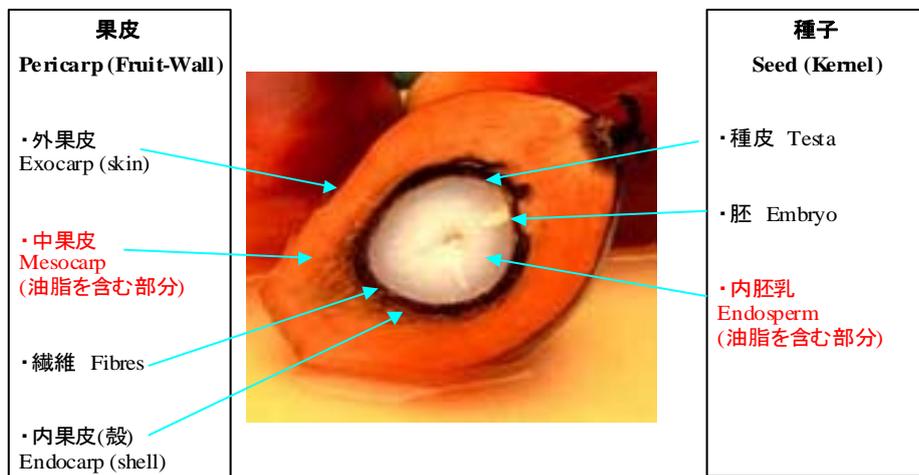
FFB (Fresh Fruit Bunch) の外観



果実の断面図



果実の断面図(詳細図)



(出所) FELDA 資料

図 2-6 に、パーム油の採取プロセスとマテリアルバランスを示したが、FFB ベースでパーム油（粗油：CPO）の収率は約 20%、果実ベースで約 32%となる。CPO はさらに、精製、加工される。ちなみに、大豆の搾油率は約 19%、ナタネは 39%程度である。

図 2-6 果房のマテリアルバランス

マテリアルバランス

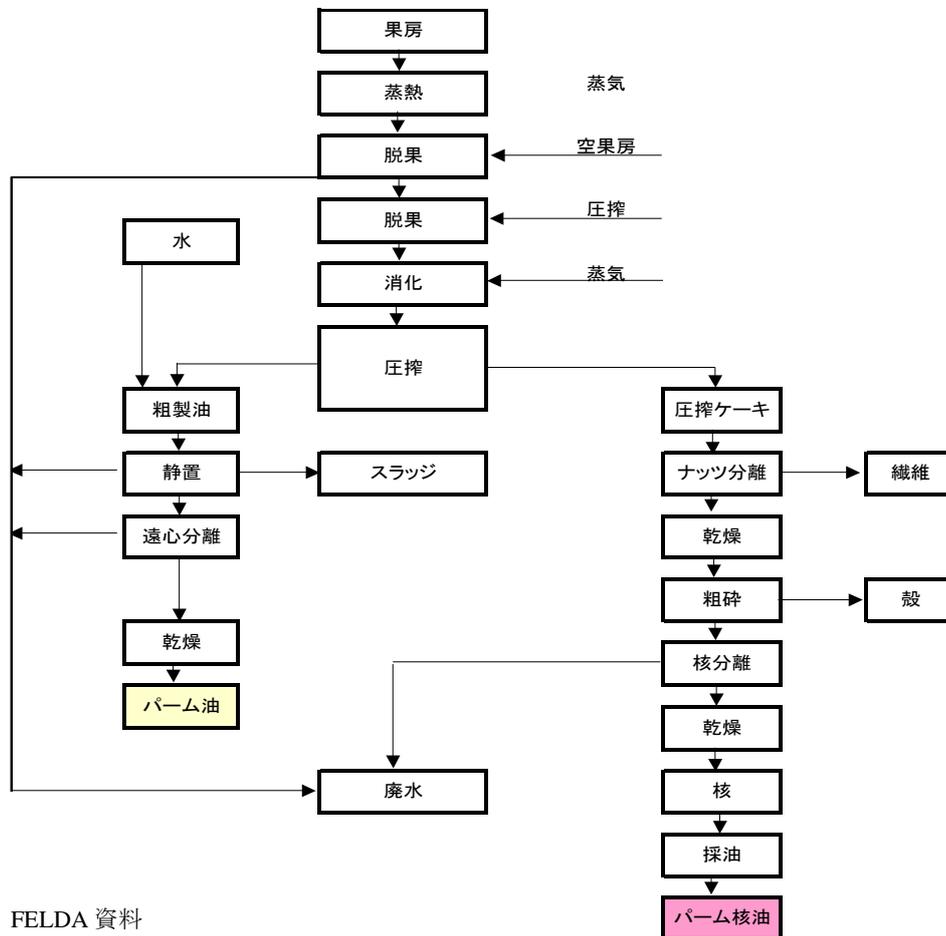
果房 (FFB)									
100									
空房	果実								水分
23	67								
	内果皮			種子 (Nut)			中果皮 (粗製油)		
	13			11			43		
	繊維	水分	核	水分	殻	CPO	水分	固形分	10
	11.5	2.5	4.5	1.5	5.5	21.5	17.5	2.5	

肥料、蒸気電力

パーム核油

パームオイル

搾油工程



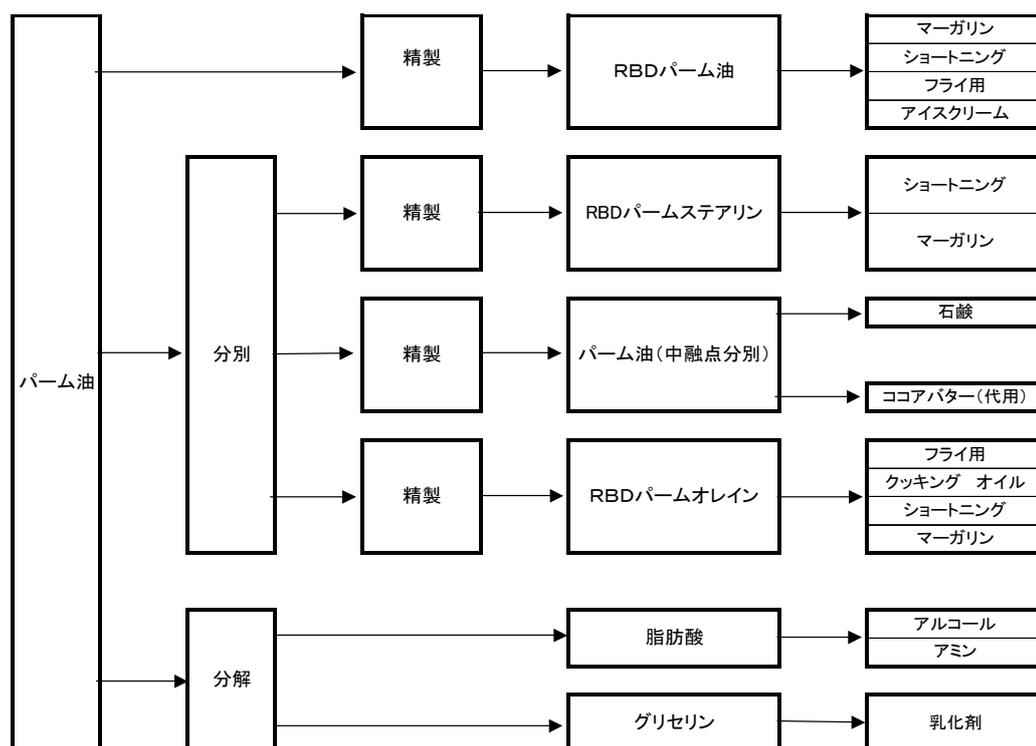
(出所) FELDA 資料

1-2-2 パーム油(CPO)の精製加工とその用途

図 2-7 に示すとおり、食用などに利用するためには、脱色、脱臭、脱ガムなど精製が必要となる。この精製されたパーム油をRBDパーム油と呼び、マーガリン、ショートニング、フライ用など食用に利用される。一方、パーム油(粗油)を蒸留により分別し、精製した

ものが、RBDパームステアリン（高融点留分）、中融点留分、RBDパームオレイン（低融点）となる。パーム油（エステル化合物）なので、加水分解すると、グリセリン（3価アルコール）と脂肪酸のエステル化合物（油脂）が得られ、各々工業用原料としても利用できる³。現在のところ概ね80%が食用に利用されている。

図 2-7 パーム油（粗油）の精製と加工品



1-2-3 ジャトロファの栽培と利用について

パーム油と同じ熱帯系作物であるジャトロファ⁴は果実に毒があり食用に適さない。主な特徴を記すと次の通りである。

- ①平均雨量 300-1000mm、熱帯の乾燥したやせた土地でも栽培可能
(荒廃地で栽培可能であるため、森林の減少や食糧用地への影響が少ない)
- ②基本的には熱帯、亜熱帯、高度 0-500m、平均気温 20-28℃
- ③寿命は約 40 年間、砂礫、塩分を含む土地でも栽培可能
- ④長期間の日照りにも耐性がある
- ⑤有毒植物のために家畜が食べず垣根として利用されている

³ バイマスである油脂から脂肪酸などを抽出して再生プラスチックを製造するなど利用価値が高い。

⁴ ナンヨウアブラギリともいう

図 2-8 ジャトロファの果実



ジャトロファは雨量の少ない痩せた土地で栽培が可能で、図 2-8 の写真に示すように、中央アフリカでは砂漠化防止のための植林として利用されている。さらに果実から搾油される油は、燃料や石鹼として利用できるため、農村地域では新たな収入源としても期待できる。インドでは（表 2-3）大規模なジャトロファ栽培による新たな雇用創出を目指している。このように、ジャトロファは「地産地消」を中心とした新たなバイオ燃料として発展していく可能性も高いと思われる。

しかしながら、栽培は機械化に適さないことや、油収率は 2 トン/ha 前後で、パーム油に比較して生産性が低く、「商業目的の大量生産には適さない」との評価もある。

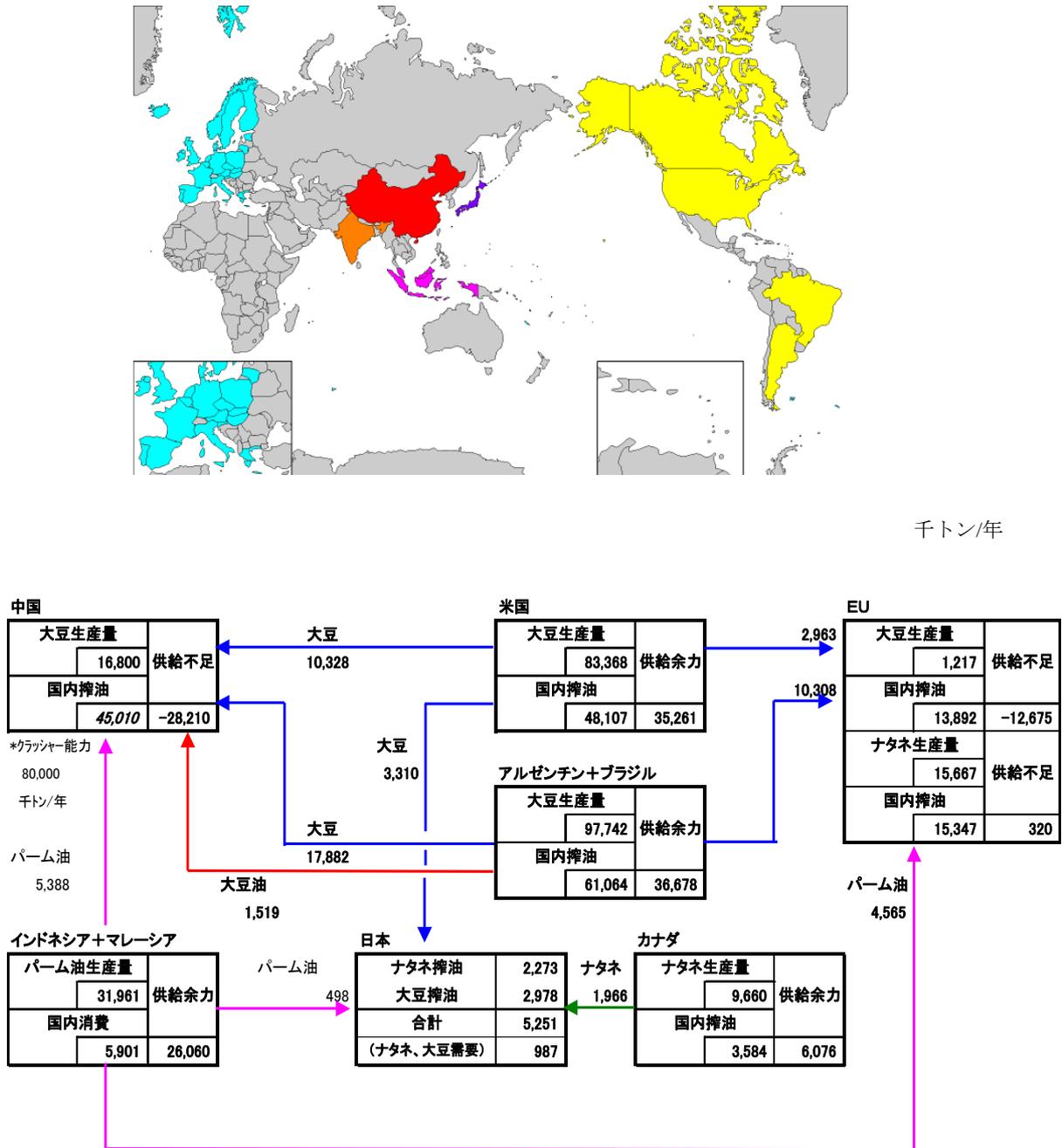
表 2-3 ジャトロファの取り組み状況

国名	ジャトロファのプランテーション及び利用形態
Cape Verde Islands	石鹼等の非燃料用の用途として使用
中国	2004年前半からバイオディーゼルオイル燃料のテスト実施中
インド	公営のプランテーションが2004年にAndhra Pradesh and Jaipur 州内の山陰の100万ha以上の規模で進行中。プロジェクトの目的は雇用創出
エジプト	800エーカー(約324ha)のプランテーション栽培を行い、2004年からバイオディーゼルオイルの生産開始、増設も計画中
タンザニア	Kakute社が年間1,000kgの石鹼を生産
ガーナ	100haのパイロットプランテーション実施中
マリ	10,000kmの垣根の植え付け完了
モザンビーク	SASOLの新設パイプラインに沿って植林
メキシコ	無毒の新品種がChiapas地域で発見
ニカラグア	1996年以来1000haのプランテーションとバイオディーゼルオイルパイロットプラントを運転

第2節 油糧種子（植物油）の需給バランス及び世界貿易バランス

大豆（及び大豆油）、ナタネ（及びナタネ油）及びパーム油の生産、輸出バランスを概略すると、図2-9の通りとなる。

図2-9 主要国間の油糧種子の貿易バランス(2006年)



(出所) WORLD OIL 誌より作成

2-1 大豆

(1) 米国

大豆の生産量は約 8,300 万トンで、約 4,800 万トンが国内搾油（クラッシャー）に回され、残りの約 3,500 万トンが輸出となる。このうち 1/3 にあたる約 1,000 万トンが中国向け輸出となる。その他、欧州、日本向けに約 300 万トンが輸出される。

(2) ブラジル、アルゼンチン

大豆の生産量は合計で約 9,800 万トン、大豆の輸出量は約 3,700 万トンでその半分の約 1,800 万トンが中国向けに、その他約 1,000 万トンが欧州へ輸出される。アルゼンチンからは大豆油で約 150 万トンが中国向けに輸出されているので、大豆とあわせて約 2,600 万トン（大豆換算）が中国へ輸出される勘定となる。

(3) 中国

大豆の生産量は約 1,700 万トン、輸入量が約 2,800 万トンで合計 4,500 万トンを国内で搾油（クラッシャー）して約 850 万トン大豆油を生産している。この他、大豆油を約 150 万トン輸入しているので国内需要は約 1,000 万トンとなる。国内のクラッシャー能力は約 8,000 万トンといわれているが、油粕の内需見合いで生産しているためクラッシャーの稼働率は 50%となっている⁵。

(4) 欧州

大豆の域内生産は約 100 万トンで、米国から約 300 万トン、ブラジル、アルゼンチンから約 1,000 万トンを輸入している。

2-2 ナタネ

(1) 欧州

ナタネの生産量は約 1,600 万トンで、全量を国内で搾油して域内のナタネ需要をほぼ充足させている。

(2) カナダ

生産量は約 970 万トンで約 600 万トンが輸出されている。そのうち約 200 万トンが日本へ輸出されている。

2-3 パーム油

インドネシア及びマレーシアでは、パーム油を約 3,200 万トン生産し、国内消費を除いた約 2,600 万トンを輸出している。そのうち 20%にあたる約 500 万トンが中国へと輸出されている。

⁵ 中国の大豆生産地域は東北部など内陸部が多く、沿海部に搬送されることは少なく内陸部で搾油され大豆油として消費され、一方、沿海部は、輸入大豆を沿海部に立地したクラッシャーで搾油するという 2 重構造となっている。

表 2-4 4大油脂の国別需給バランス比較 (2001年/2006年)

		植物油需要(千トン)						植物油生産(千トン)					
		ナタネ油	大豆油	ヒマワリ油	パーム油	合計	BDF(内数)	ナタネ油	大豆油	ヒマワリ油	パーム油	合計	
2001	EU27	4,043	2,268	2,662	2,996	11,970	810	4,167	3,156	2,510			9,832
	CIS	135	595	1,913	368	3,010	0	83	82	2,237			2,402
	米国	792	7,509	147	183	8,631	17	321	8,429	357			9,107
	カナダ	536	321	57	6	920	0	1,139	309	26			1,474
	ブラジル	24	2,935	96	100	3,156	0	15	4,430	58	110		4,613
	アルゼンチン	2	95	422		519	0	5	3,388	1,305			4,697
	日本	907	719	21	392	2,039	0	833	714				1,547
	中国	4,608	3,508	249	2,145	10,510	0	4,553	3,411	246			8,211
	インド	1,654	2,210	620	3,620	8,104	0	1,554	791	232	29		2,607
	インドネシア		13	4	2,857	2,874	0				4	8,030	8,034
	マレーシア	1	65	19	1,474	1,559	0		100			11,804	11,904
	小計	12,701	20,239	6,209	14,142	53,291	827	12,670	24,809	6,974	19,973		64,427
	世界計	13,981	27,350	8,688	23,742	73,762	847	13,691	27,788	8,145	23,920		73,544
2006	EU27	6,849	3,228	3,399	4,565	18,041	3,885	6,304	2,590	2,250	0		11,144
	CIS	125	250	2,808	768	3,951	0	195	165	4,719	0		5,079
	米国	905	8,247	171	570	9,893	750	495	9,262	258	0		10,015
	カナダ	377	354	74	35	839	40	1,546	275	22	0		1,843
	ブラジル	48	3,138	45	218	3,449	60	41	5,428	34	170		5,673
	アルゼンチン	1	331	295		626	30	8	6,161	1,580	0		7,749
	日本	987	631	22	498	2,138	0	973	576	0	0		1,549
	中国	4,669	7,426	238	5,430	17,762	60	4,750	6,001	220	0		10,971
	インド	2,383	2,756	584	3,074	8,796	30	2,448	1,226	497	49		4,220
	インドネシア		17	4	3,721	3,742	1	0	0	4	16,080		16,084
	マレーシア	19	53	62	2,180	2,313	120	0	67	0	15,881		15,948
	小計	16,363	26,430	7,700	21,060	71,552	4,976	16,760	31,751	9,584	32,180		90,275
	世界計	18,182	34,767	11,079	36,254	100,282	5,416	18,423	35,313	11,166	37,151		102,053

		油糧種子生産(千トン)				Crushing(千トン)			
		ナタネ	大豆	ヒマワリ	合計	ナタネ	大豆	ヒマワリ	合計
2001	EU27	11,141	1,258	4,840	17,239	10,070	17,040	6,050	33,160
	CIS	522	424	7,820	8,766	260	473	5,268	6,001
	米国	918	75,055	1,608	77,581	800	45,102	880	46,782
	カナダ	7,205	2,703	119	10,027	2,700	1,736	61	4,497
	ブラジル	41	39,058	158	39,257	40	23,104	149	23,293
	アルゼンチン	17	27,400	2,970	30,387	12	18,274	3,133	21,419
	日本		239		239	2,128	3,700		5,828
	中国	11,381	15,411	1,954	28,746	12,240	20,000	913	33,153
	インド	3,750	5,010	730	9,490	4,110	4,420	665	9,195
	インドネシア		1,019		1,019			9	9
	マレーシア				0		471		471
	小計	34,975	167,577	20,199	222,751	32,360	134,320	17,128	183,808
	世界計	37,533	175,265	23,140	235,938	34,964	151,484	19,979	206,427
2006	EU27	15,667	1,217	5,671	22,555	15,347	13,892	5,373	34,612
	CIS	767	1,312	12,055	14,134	477	953	10,951	12,381
	米国	719	83,368	1,720	85,807	1,231	48,107	641	49,979
	カナダ	9,660	3,161	89	12,910	3,584	1,477	53	5,114
	ブラジル	72	56,942	94	57,108	110	28,332	86	28,528
	アルゼンチン	30	40,800	3,840	44,670	19	32,732	3,755	36,506
	日本		225		225	2,273	2,978		5,251
	中国	13,048	16,800	1,830	31,678	12,700	34,250	807	47,757
	インド	6,900	7,380	1,490	15,770	6,460	6,850	1,400	14,710
	インドネシア		808		808			11	11
	マレーシア				0		380		380
	小計	46,863	212,013	26,789	285,665	42,201	169,951	23,077	235,229
	世界計	49,401	222,012	30,229	301,642	46,509	189,689	26,977	263,175

(出所) WORLD OIL 誌

(注) B D F に使用されている植物油脂は内数

第3節 主要国におけるバイオ燃料の導入状況と政策

3-1 主要国（地域）の導入状況

3-1-1 概況

2006年時点でバイオディーゼル燃料(BDF)は約540万トン生産されており、植物油脂需要の約1億トンのうち約5%を占める。地域別には欧州が約390万トン(約70%)でBDFの導入が最も進んでいる。次いで多いのが米国で、約75万トンのBDFが導入されている。BDFの原料は、欧州では主としてナタネ油(一部ひまわり油)、米国では大豆油が使用されている。

表2-5 4大油脂の国別需要とBDF需要

		植物油需要(千トン)					合計	BDF(内数)
		ナタネ油	大豆油	ヒマワリ油	パーム油			
2006	EU27	6,849	3,228	3,399	4,565	18,041	3,885	
	CIS	125	250	2,808	768	3,951	0	
	米国	905	8,247	171	570	9,893	750	
	カナダ	377	354	74	35	839	40	
	ブラジル	48	3,138	45	218	3,449	60	
	アルゼンチン	1	331	295		626	30	
	日本	987	631	22	498	2,138	0	
	中国	4,669	7,426	238	5,430	17,762	60	
	インド	2,383	2,756	584	3,074	8,796	30	
	インドネシア		17	4	3,721	3,742	1	
	マレーシア	19	53	62	2,180	2,313	120	
	小計	16,363	26,430	7,700	21,060	71,552	4,976	
	世界計	18,182	34,767	11,079	36,254	100,282	5,416	

(出所) WORLD OIL 誌より作成

表2-6 主要国（地域）の導入政策

地域	政策・計画内容	地域	政策・計画内容
EU	BEF、BDF双方の輸送用燃料全体に対する混合比(個別政策は各国で立案) 2010年 5.75% 2020年 10%	中国	BEF+BDF 2020年 非食料系バイオ燃料を1.2千万トン導入(=1+0.2)
アメリカ	2010年 68億ガロンをバイオ燃料で代替 2017年 ガソリンの10%をBEFで代替 2030年 2004年のガソリン実績の30%を、BEFで代替	韓国	BDF 2007年～ BDF0.5% 以降、毎年+0.5%混合率増加、2012年3.0%
カナダ	BEF 2010年 ガソリンの35%をE10化 BDF 2012年 2%混合	フィリピン	BEF 2010年～ BEF10%
ブラジル	BEF 現在のBDF混合率を維持 BDF 2015年から、BDF混合率5%	インド	BEF 2020年 BEF5%普及 (普及時期は推定)
		インドネシア	BDF 2008年から、BDF5を導入 (BDF10まで引き上げ目標)
		マレーシア	BDF 2008年から、BDF5を導入
		オーストラリア	BDF、BEF 2010年に35万klのバイオ燃料導入
		NZ	BDF 2015年にBDF3.5%

(出所)各国資料などから作成

3-1-2 米国における導入状況と今後の見通し

第2節で述べたように、米国は大豆の最大の生産国であるが、大豆ミールの副産物として大量に生産される余剰大豆油の処理が、過去からの課題となっていた。折からの環境問題への関心の高まりや原油価格の高騰もあって、軽油代替燃料としての大豆利用が脚光を浴びるようになった。1996年、大豆の生産業者によって、全米大豆開発協会が設立され、これが発展して全米バイオディーゼル協会（National Bio-diesel Board、NBB）となった。そのメンバーには穀物メジャー、大豆生産者やトラック業界などが名を連ねている。また陸海軍もバイオディーゼル燃料（BDF）⁶の利用について積極的に関与しているといわれている。BDFはバイオエタノールのように、不特定多数の消費者に供給する形態とは異なり、トラック、船舶などを中心とした大口利用者に供給されている。

今後の鍵を握るのは、生産コストの低減と補助金政策如何による。これまで州単位での補助金の実施や、B2（軽油に2%混合）程度の強制混合が実施されてきたが、連邦レベルでは2007年9月より、2005年に制定された包括エネルギー法で定めた「再生可能燃料基準(RFS)」の義務化を行った。概要は以下の通りである。

(概要)

- ①使用義務者：米国内のガソリン製造業者、輸入者
- ②使用義務量：ガソリン製造（輸入量）に対する一定割合
- ③管理方法：各社別にRIN（Renewable Identification Number）と呼ばれるコードが付与され、各社使用義務に応じたRINクレジット（マイナス）を取得することで、使用義務を達成（RINは市場での取引、前年からの繰越しも可能）。
- ④RIN：燃料の種類でクレジット量が異なる（コーン由来エタノール 1 ガロン=1RINs、セルロース系エタノール 1 ガロン=2.5RINs、バイオディーゼル 1 ガロン=1.5 RINs）

3-1-3 EUの導入状況と今後の政策

(1) EUの政策

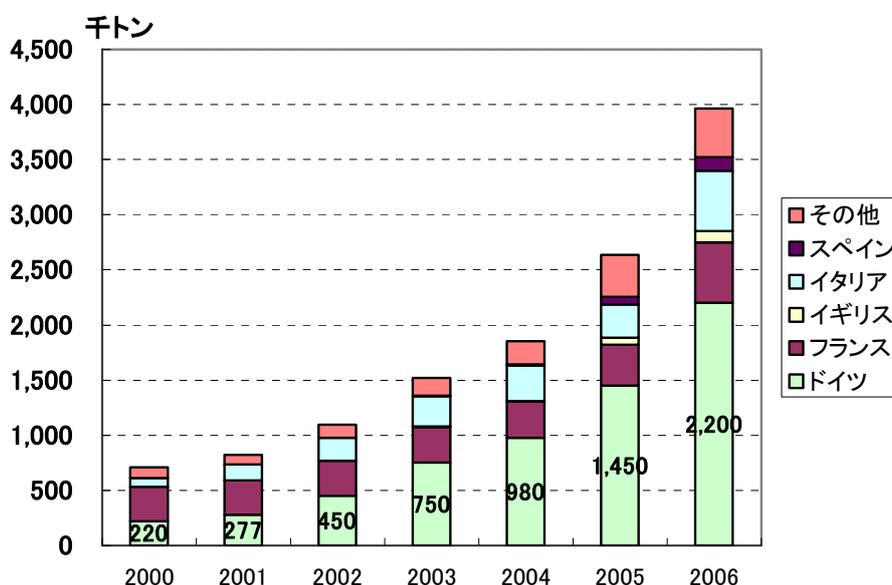
2003年、EUバイオ燃料指令により、EU各国の輸送用燃料へのバイオ燃料使用方針が示され、2005年には2%、2010年には5.75%の使用目標が示された。ただし、バイオ燃料はコスト高であるため、導入促進のためのエネルギー課税の枠組み（免税権限）は、各国

⁶ NBBなど積極的なロビー活動もあって、BDFの導入環境は整備されてきたと言ってよい。事実、1990年のClean Air Actに適合した代替燃料として認められており、代替燃料または燃料添加剤としてEPAにも認定されている。加州のCARB（California Air Resources Board）や運輸省にも代替燃料として指名されている。また米陸軍ではガイドライン(B20)が設定されている。

の権限に委ねられた。その後、バイオマスアクションプラン（2005年12月）、EUバイオ燃料戦略（2006年2月）などが発表され、次世代のバイオ燃料開発、バイオ燃料の導入義務化、バイオ燃料プラントの建設促進など、バイオ燃料の拡大策が提言された。

図2-10に示すとおり、EU各国のBDF導入状況はドイツを中心として2004年以降、急速に拡大が進んだ。特にドイツでの急速な拡大は軽油税の控除など税制面からの支援が大きく貢献したのが原因と言える。図2-11に示すとおり、国別での進捗状況を見た場合、2005年のバイオ燃料導入比率⁷を達成したのは、ドイツ及びスウェーデンのみであり、各国間での濃淡は著しい。EU全体としては、2010年の目標値5.75%の達成は困難となっている。

図2-10 EU域内における国別のBDF導入の推移

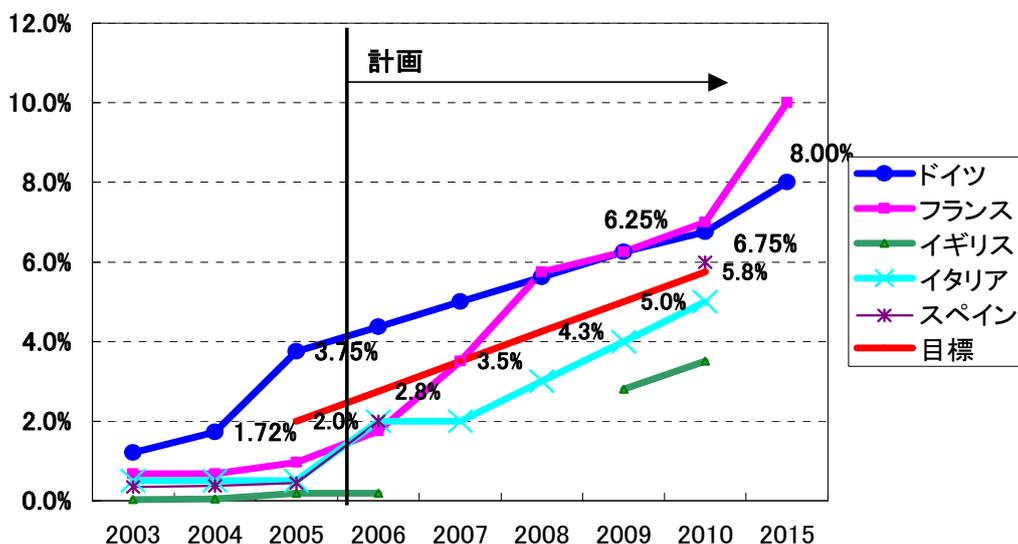


(出所) WORLD OIL

2007年1月、ヨーロッパエネルギー政策が発表され、EUの温暖化ガスを2020年に1999年比で△20%削減を目標とし、特に輸送用燃料のバイオ燃料導入は最低10%を義務化する提案が行われた。ただし、現状のままでは2010年の目標（5.75%）も未達成となる可能性が高いため、①未利用地の耕地化、②生産性、収率の向上、③2020年に向けて、第2世代のバイオ燃料導入の必要性などが同時に提言されている。また、2007年末までにEU委員会が新たな「代替燃料指令」を発表し、加盟国の目標、実現可能な手段、新技術のためのモデル事業の立ち上げなどを準備する予定となっている（EU議会の要請による）。

⁷ バイオエタノール、バイオディーゼル及びその他バイオ系燃料を含む。混合率は各燃料を熱量等価ベースで集計した値を用いている。

図 2-11 EU各国におけるバイオ燃料の混合率の推移



(出所) 各資料より作成

(2)今後の見通し

上述した欧州委員会の決定(2020年に10%)に基づいて、ECの農業・農村開発総局(DG AGRI)は2007年7月に、欧州の農業市場に与える影響を分析したレポートを発表した。当該レポートによれば、2020年におけるバイオ燃料は、バイオエタノールは約1,650万トン(toe)、バイオディーゼル燃料(BDF)は約1,920万トンとなっている。2006年時点では、BDFが約70%と示しているのに対して、2020年には45:55と、バランスのとれた比率を見込んでいる。

BDFの内訳を見ると、輸入、次世代(BTL)が各々約4分の1を占める構成となっている。東欧諸国の新加盟によりEU域内の耕地面積がある程度拡大されるものの、約1,920万トンを達成するには、木材系バイオマスを原料として軽油を製造する次世代(BTL)の導入が必要であることが分かる。BTLの本格的導入は2015年頃からとされているが、導入テンポが遅れた場合は輸入の拡大が必要となる⁸。

(2020年におけるバイオ燃料導入内訳)

①バイオエタノール：約1,650万トン

第1世代：1,170万トン

エタノール用地での生産：550万トン

穀物用地または輸出用作物地からの転換：約620万トン

輸入：約130万トン(食糧系)

次世代：約350万トン(セルロース系)

⁸ 「環境破壊の輸出」に繋がらない輸入とすると、輸入量は拡大せず目標達成が遅れることになる。

②バイオディーゼル：約1,920万トン

第1世代：880万トン

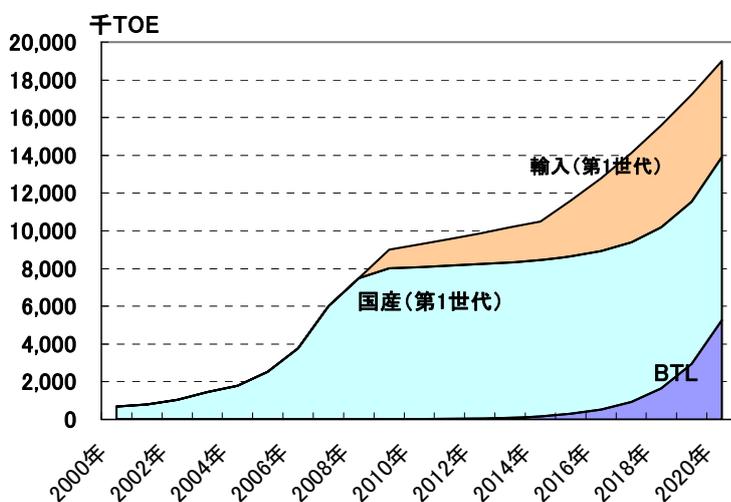
BDF用地での生産：340万トン

穀物用地または輸出用作物地からの転換：約540万トン

輸入：約510万トン（食糧系）

次世代：約530万トン（BTL）

図2-12 EUにおけるBDFの導入計画
(2020年：導入率10%)



(出所) DG AGRI レポートなどより作成 (BTL、輸入時期などについては筆者推定)

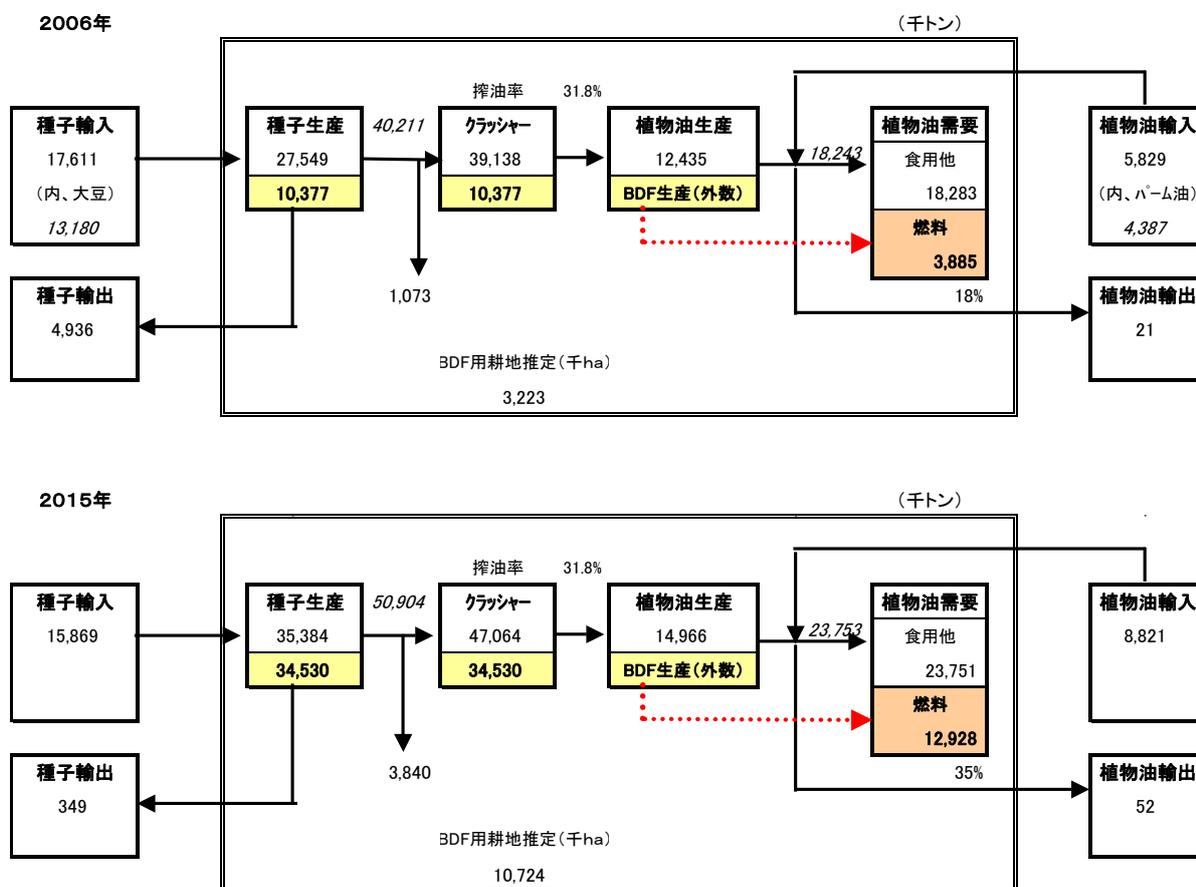
(3) EUにおける植物油脂の需給バランス

FAO が発表した「Agriculture Outlook (2006-2016年)」を基に、2015年のEUにおける植物油脂の需給バランスを整理すると図2-13の通りとなる。2006年のEU域内の植物油脂需要は約1,800万トン、BDF需要は約390万トンであり、全体で約18%を占める。2015年には植物油脂需要は約2,400万トンまで増加するが、上述の(DG AGRI)によれば、2015年のBDF需要は約1,300万トンとなるので、全体で約35%を占めることになる。

全量をEU域内で生産するには、BDF用の耕地面積は約1,000万haへと拡大する必要があり、2006年の約300万haの3倍以上の耕地面積が必要となる。EU域内の遊休地は約700万haと言われているので、これをほぼ使い切る形となる⁹。

⁹ EU域内の総耕地面積は約1億1,000万ヘクタール

図 2-13 EUにおけるBDFの植物油需給に与える影響について



(出所)FAO、但し斜体黒字はWORLD OIL誌、赤字は2006年はWORLD OIL雑誌、2015年はUFOP(油脂及びたんぱく質促進連合)

(注1)種子は大豆、ナタネ、ひまわり、植物油は大豆油、ナタネ油、ひまわり油及びパーム油をいう

(注2)EUにおけるナタネ、ひまわりの耕地面積(千ha、実績)－WORLD OIL誌

2006年	ナタネ	ひまわり
	48,630	35,810

(注3)EUにおけるナタネの収穫率、搾油率、精製歩留まり－WORLD OIL誌

ナタネ収穫率(3.2トン/ha)、搾油率(39%)、精製歩留まり96%

3-1-4 ドイツの政策転換

(1)政策の転換

ドイツにおけるBDFの目覚ましい伸びは、2004年1月から実施したバイオ燃料に対する課税の全額免除(鉱油税)¹⁰の影響が大きく、当初の目標であった2010年の5.75%を超えることは確実のようであり、BDFがそれなりに定着してきたと言える。今後の輸送用燃料需要(ガソリン、軽油)の見通しでは、ガソリンは引き続き減少し、軽油もその伸びは鈍化、2020年頃には減少に転じることになり、このままバイオ燃料の拡大と税免除が継続

¹⁰ 鉱油税 1Lあたり軽油で0.47EU、ガソリンで0.65EU

すれば、連邦政府の税収が大幅に減少する懸念が出てきた。こうした事情から、BDFの混合を義務付けるとともに、2009年まで実施予定であった、課税全額免除を2006年7月末で中止し、2007年8月から2012年末の間、段階的に課税免除額を削減していくことに方針転換を行った。関連法案は以下の通りである¹¹。

①エネルギー税法の修正 (Energy Tax Act)

2006年8月～2011年の期間に、税額控除を段階的に減額する

BDFへの課税 (EU/L)

2006～2007年	: 0.09
2008年	: 0.15
2009年	: 0.21
2010年	: 0.27
2011年	: 0.33
2012年～	: 0.45

②バイオ燃料導入割当法 (Bio-fuel Quota Act ; BQA)

2007年～2015年の期間に、ガソリン、軽油への導入ミニマム量 (段階的引き上げ)

(2) BDFの税額控除が税収に与える影響

2006年以降2009年末までBDFの課税全額控除を行った場合と、今回の段階的な課税控除の段階的減額の場合で税収の変化を以下の条件に基づいて試算を行った。

①需要の見通し

表 2-7 バイオ燃料のガソリン、軽油混合比率(前提)

	(熱量構成比)					
	2006	2007	2008	2009	2010	2015
バイオエタノール	0.92%	1.20%	2.00%	2.80%	3.60%	3.60%
BDF	5.69%	7.05%	7.90%	8.74%	8.99%	10.78%
合計	3.64%	4.51%	5.38%	6.25%	6.75%	8.00%

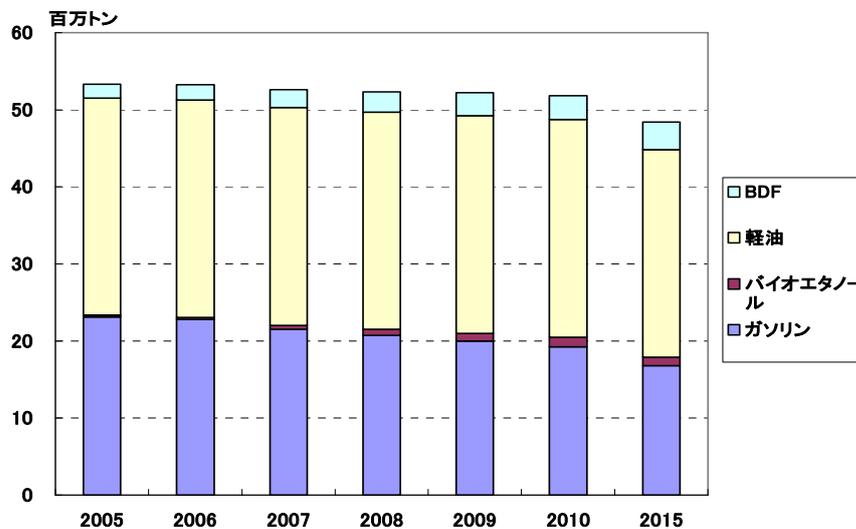
(注) 植物油、バイオガスは除く

バイオエタノールは対ガソリン総量比率、BDFは軽油総量比率

2009年、2010～2015年のバイオ燃料混合比率はBQAに定めるミニマム量

¹¹ フランスの場合は、バイオ燃料導入比率が低いため、燃料税減額に加えて2005年から最低混合比率を義務化した(2005年:1.2%、2006年:1.75%、2008年:5.75%、2010年:7%)。

図 2-14 ドイツにおけるガソリン、軽油需要の見通し（～2015年）



(出所) UFOP (油脂及びタンパク質促進連合)

②試算結果 (表 2-8)

鉱油税の免除額を段階的に減額した場合、2006年～2009年の累計で約 23 億ユーロ (約 3,700 億円) の税収増が見込まれる。

表 2-8 税制の変更に伴う連邦政府の税収変化
(百万ユーロ：累計)

	06～09年	06～15年
全額控除が継続した場合	6,849	15,730
控除額が減額する場合	4,508	5,316
税収の増分	2,341	10,414

3-2 日本におけるBDF導入可能量の見通し

3-2-1 国産ナタネの供給ポテンシャル

日本国内でのナタネの作付面積は、青森、北海道などを中心に約 420ha にすぎず、生産量はわずか 900 トン程度である。日本の遊休農地約 37 万 ha をすべてナタネ生産に回した場合、生産可能量 (ポテンシャル) は約 83 万トンとなる。搾油率を 39% と仮定すると、ナタネ油生産量で約 33 万トンとなる。

表 2-9 日本のナタネ生産量と供給ポテンシャル

	ナタネ生産量(トン)	作付面積(ha)	遊休農地(千ha)	ポテンシャル量(千トン)
青森	454	420	11	26
北海道	366		18	41
滋賀	45		7	15
鹿児島	14		8	18
富山	7		5	12
長野	3		7	15
その他	-		311	703
合計	889		367	829

(出所) 18年度調査(日本のエタノール導入について)、愛知県農林水産部資料に基づいて試算

(注)ナタネ収量は2.26トン/ha(主要県の実績)

表 2-10 に示すとおり、日本の製油生産量は約 190 万トンであるが、その原料となる油糧種子は大部分が輸入され(表 2-11、ナタネは約 230 万トン、大豆は約 440 万トン¹²)、国内で搾油され(原油処理量約 680 万トン)生産される。

表 2-10 日本の製油能力(2004年)

	1000トン以上	1000トン未満	合計
企業数	11	38	49
压榨能力(トン/日)	25,610	5,369	30,979
原料処理量(千トン/年)	5,770	1,000	6,770
原油生産量(千トン/年)	1,534	310	1,844
油粕生産量(千トン/年)	4,031	656	4,686
製油生産量*1(千トン/年)	1,646	269	1,915
年間稼働率	75.1%	62.1%	72.8%

*1 精製専門メーカー分含まず

*2 年間稼働日数(300日)

(出典)農水省総合食料局食品産業振興課

表 2-11 日本の油糧種子の輸入推移

(千トン)

年	大豆	ナタネ	その他	合計
2000	4,829	2,193	526	7,548
2001	4,832	2,150	474	7,456
2002	5,039	2,084	426	7,549
2003	5,173	2,084	394	7,651
2004	4,407	2,313	385	7,105
2005	4,155	2,295		
2006	4,028	2,272		
2007	2,465	1,248		

(注)2007年(1~7月)

3-3-2 廃食油の供給ポテンシャル

日本国内における廃食用油の発生量は、表 2-12 で示すとおり、家庭用約 18 万トン、外食産業約 20 万トン、食品工業、加工油脂約 10 万トン、合計で約 48 万トン程度と推計される。このうち家庭用を除く廃食油約 30 万トンは約 25 万トンが回収されて再利用される。

図 2-15 に示すとおり、再利用の用途は、飼料用油脂が約 70%、他に脂肪酸、石けん、塗料、インキといった工業用油脂が約 20%、燃料(BDF、ボイラー燃料)及び輸出が 10%

¹² 輸入された大豆のうち、一部は搾油されずにそのまま豆腐などの原料となる。

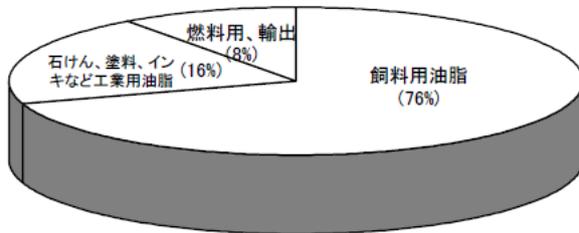
となっている。従って、今後新たにBDFへの利用が考えられるのは家庭用約18万トンが対象となる。京都市の廃食油回収例を表2-13に示したが、潜在量に対する回収率は約10%と低い。家庭用は少量で分散しているため回収率が低いのが欠点である。

表 2-12 廃食油の供給ポテンシャル

	供給量(千トン/年)	1人あたりの消費量(g/人、年)		廃食用油発生量(千トン/年)
		供給量	廃油量	
家庭	620	4,857	1,447	181
外食産業	672	5,262	1,579	201
食品工業	768	6,017	602	77
加工油脂	425	3,330	166	21
合計	2,484	19,466	3,794	480

(出所)バイオディーゼルハンドブック (改訂版)

図 2-15 廃食油の再利用について



(出所) UC オイルの飼料用油脂の安全性確保のためのガイドライン

平成 16 年 11 月 全国油脂事業協同組合連合会

表 2-13 京都市の廃食油回収(KL/年)

	潜在回収量	実回収量	利用率
家庭用	1,500	150	10.0%
事業者購入	3,000	1,460	48.7%
合計	4,500	1,610	35.8%

第4節 マレーシア及びインドネシアにおけるBDF輸出可能量の見通し

4-1 マレーシアにおけるBDF輸出量の見通し

4-1-1 概論

表 2-14 に 1990 年～2004 年にいたるパーム油の需給、軽油需要、GDP 等の推移を示した。マレーシアの人口は、1990 年から約 700 万人増加して、2004 年には約 2,500 万人となった。1 人あたりの GDP(2000 年価格米ドル)は 1.7 倍の約 4,300 ドルとなった。ディーゼル軽油の需要は 3 倍の約 650 万 KL に、パーム油の生産量は 2.3 倍の約 1,400 万トンに、パーム油の内需は 3.4 倍の約 180 万トン（1 人あたりの消費量は 72kg）に増加した。パーム油はゴム栽培に代替するプランテーション作物として成長してきた商品であり、生産量の大半が輸出（約 1,200 万トン）され、2004 年時点で、第 2 位のインドネシアを押さえて世界最大の生産量、輸出量を誇る。

パーム油の栽培面積は 2005 年時点で約 350 万ha、このうち半島が約 60%、カリマンタン島が約 40%を占める（図 2-16）。州別に見ると、第 1 位：サバ州（29%）、第 2 位：ジョホール州(18%)、第 3 位：バハン州（15%）、第 4 位：サラワク州（11%）、第 5 位：ベラ州（9%）となっている。半島での耕地面積は既に飽和しており、今後の拡大余地は、サバ州やサクワラ州などカリマンタン島が中心となる。表 2-15 にパーム以外の主要作物の需給状況を示した¹³。

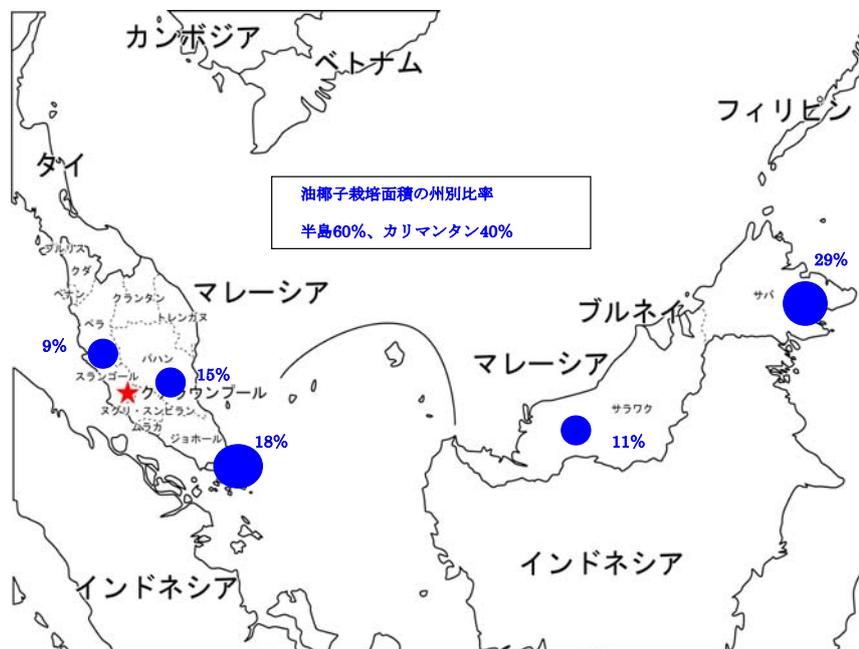
表 2-14 マレーシアにおけるパーム油の需給の推移（1990 年～2004 年）

	人口	GDP	軽油内需	パーム油内需		油脂生産量	油脂輸出量
	(百万人)	(ドル/人)	(千KL)	(kg/人)	(千トン)	(千トン)	(千トン)
1990	18.2	2,498	2,167	29.1	529	6,095	5,566
1991	18.7	2,669	2,304	36.7	685	6,141	5,456
1992	19.1	2,834	2,455	39.9	763	6,371	5,608
1993	19.6	3,039	2,316	44.9	880	7,403	6,523
1994	20.1	3,238	2,531	48.5	975	7,222	6,247
1995	20.6	3,468	2,573	53.3	1,099	7,811	6,712
1996	21.1	3,721	2,869	58.5	1,236	8,386	7,150
1997	21.7	3,894	3,687	55.0	1,191	9,057	7,866
1998	22.2	3,524	2,743	44.4	984	8,315	7,331
1999	22.7	3,653	3,767	52.0	1,180	9,250	8,070
2000	23.3	3,881	4,870	54.8	1,275	10,100	8,825
2001	23.8	3,807	5,382	61.9	1,474	11,804	10,330
2002	24.3	3,891	5,555	61.8	1,501	11,908	10,407
2003	24.8	4,024	5,958	63.3	1,568	13,354	11,786
2004	24.9	4,290	6,451	71.6	1,782	13,974	12,192

（出所）GDP、人口、軽油需要量は IEA、パーム油は OIL WORLD 誌

¹³ 小麦、とうもろこし、さとうきびはその大半を輸入に依存、主食である米も約 1/3 を輸入している。

図 2-16 マレーシアにおける油椰子（パーム）の栽培地域



(出所)MPOB 資料より作成

表 2-15 マレーシアにおける主な作物の需給バランス（2005年）

単位1,000トン	生産量	輸入量	輸出量	飼料・種子用	食用	その他
小麦		2,508	287	44	1,527	651
米	2,240	1,089	120	150	2,847	211
とうもろこし	75	2,852	86	2,408		433
キャッサバ	430	565	46	3	410	536
さとうきび	1,819	10,429	1,425	2,208	10,022	(1,407)
油脂作物	76,414	7,686	74,311	37	1,130	8,623
大豆	0	1,262	1,085	13	69	95
ヒマワリ		78	104			(26)
菜種		72	85		0	(13)
綿実		6	4		0	2
ココナッツ	642	2,167	1,498		264	1,047
パーム	75,650	4,005	71,501		626	7,529
油脂種子	120	10	17	24	99	(10)

出所:FAO Statistical Database

(注)パームは F F B ベース、搾油率を約 20%とするとパーム油換算で約 1,400 万トンとなる。

4-1-2 BDFの見通し

(1)前提条件及び試算方法（表 2-16、図 2-17）

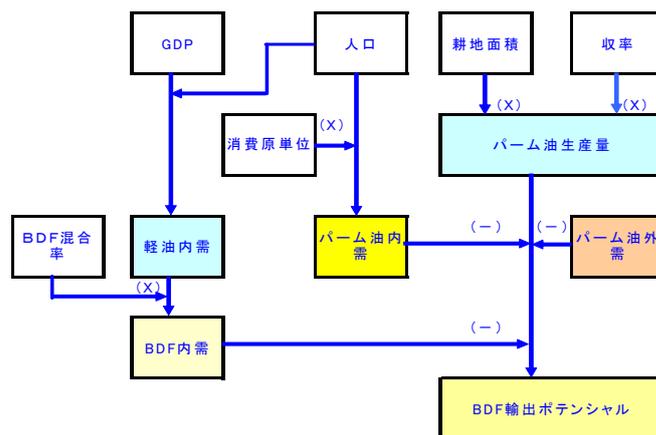
- ① 耕地面積は緩やかに増加し(約 1.5%/年)、概ね 500 万 ha を上限に頭打ちとなる。
- ② 品種改良などにより、油収率は 6 トン/ha¹⁴まで上昇する。
- ③ GDPは年率 4.5%、1 人あたりGDPは年率 3.1%¹⁵の伸びとした。
- ④ 輸送用燃料（ディーゼル軽油）は年率 3.4%¹⁶（GDP弾性値 0.75）の伸びとした。
- ⑤ パーム油の外需（非燃料）は FAO 予測（2006-2016 年）を参考に 2030 年まで外挿した。
- ⑥ 生産可能量を算出後、内需（BDF、油脂需要）と外需(油脂)を控除してBDF輸出ポテンシャルとし、BDFによる食糧へのしわ寄せが起こらないことを前提とした。

表 2-16 マレーシアにおけるBDFの需給見通しの前提条件

	耕地面積	油収率	GDP(1人当たり)	輸送用燃料
	(千ha)	(トン/ha)	US \$(2000年)	(千kl)
2005年	3,552	4.2	4,436	4,998
2010年	3,981	4.7	5,239	5,879
2015年	4,289	5.0	6,038	6,949
2020年	4,620	5.4	7,027	8,213
2025年	4,856	5.7	8,145	9,754
2030年	5,104	6.0	9,534	11,585
平均増加率	1.5%	1.4%	3.1%	3.4%

(注)BDF混合比率：2010年(5%)、2015年以降（10%）

図 2-17 BDF輸出ポテンシャル試算手順



¹⁴ マレーシアの実績は平均収率 4 トンであるが、最も高い収率を示す農園では 6~7 トンと言われているので、この収率が 2030 年にはマレーシア全体の平均値になると仮定した。

¹⁵ IEA の予測

¹⁶ エネ研のアジア/世界エネルギーアウトック 2007

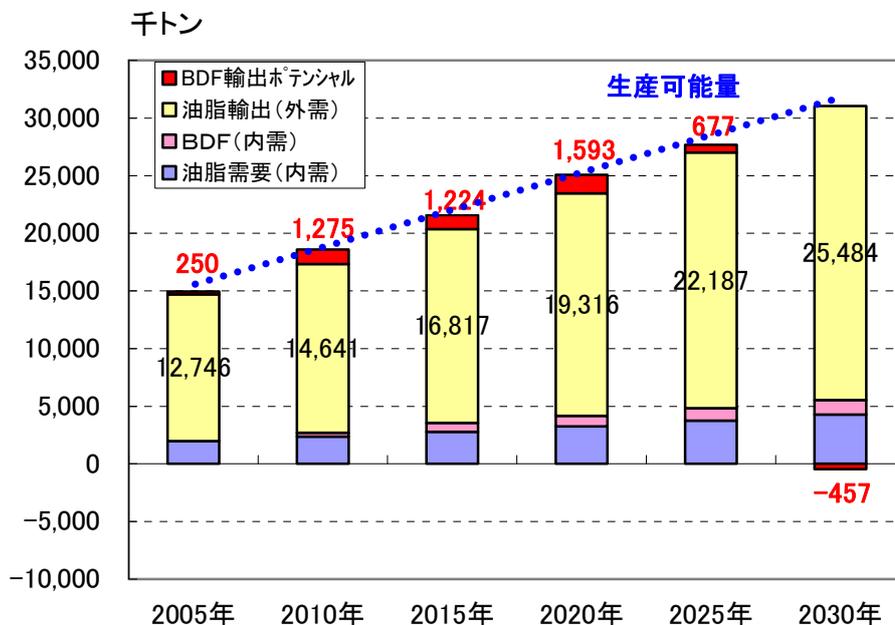
(2) 試算結果

試算結果を表 2-17、図 2-18 に示した。耕地面積の大幅な拡大が見込めないことから、生産可能量は次第に鈍化していく。2010年～2020年における輸出ポテンシャルは100万トン～150万トン程度あるものの、それ以降は国内需要の増大にともない輸出ポテンシャルは減少していくと予想される。マレーシアのパーム事業者は、今後、国内での耕地面積の拡大が困難なことから、インドネシアなどの海外へ進出して用地確保を図るか、品種改良などによる油収率の大幅アップを図る必要にせまられると考えられる。

表 2-17 マレーシアにおけるパーム油の需給見通し

	油脂生産可能量	油脂需要(内需)	BDF(内需)	油脂輸出(外需)	BDF輸出ポテンシャル
2005年	14,961	1,965	0	12,746	250
2010年	18,607	2,366	326	14,641	1,275
2015年	21,594	2,783	770	16,817	1,224
2020年	25,061	3,242	910	19,316	1,593
2025年	27,683	3,738	1,081	22,187	677
2030年	30,579	4,268	1,284	25,484	-457
平均増加率	2.9%	3.2%	13.8%	2.8%	

図 2-18 マレーシアにおけるBDF輸出ポテンシャルの推移



4-2 インドネシアにおけるBDF輸出量の見通し

4-2-1 概論

表 2-18 に 1990 年～2004 年のパーム油の需給、軽油需要、GDP等の推移を示した。インドネシアの人口は、1990 年から約 4,000 万人増加して、2004 年には約 2 億 2,000 万人となった。1 人あたりのGDP(2000 年価格米ドル)は 1.5 倍の約 910 ドルとなった。ディーゼル軽油の需要は 2 倍の約 1,300 万KL¹⁷に、パーム油の生産量は 5.1 倍の約 1,200 万トンに、パーム油の内需は 2.7 倍の約 350 万トン（1 人あたりの消費量は 16kg）に増加した。パーム油はマレーシア同様、生産量の大半が輸出されており（約 900 万トン）。2004 年時点で、マレーシアに次ぐ第 2 位の生産量、輸出量を誇る。

図 2-18 に栽培地域の分布(緑の部分)を示したが、パーム油の栽培面積は 2006 年時点で約 410 万 ha であり、その大半がスマトラ島及びカリマンタン島に集中している。今後の耕地面積の拡大余地は、スマトラ島、カリマンタン島、ニューギニア島などを想定すれば非常に大きなものがある。しかしながら、その大半が熱帯雨林の地域であり、熱帯雨林の不法伐採、森林火災とともに、パーム油栽培が環境破壊となるという反対が国の内外で強い。したがって、潜在能力とは別に、食料用や自国内での燃料代替を超えた BDF の輸出については政治的に難しい面もあると言える。

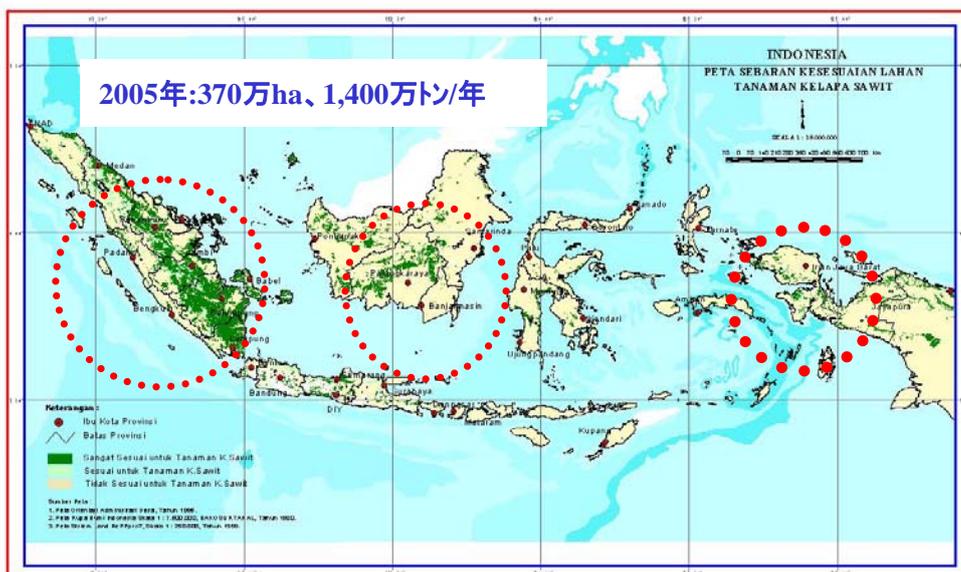
表 2-19 にパーム以外の食物生産を示したが、米、とうもろこし、キャッサバはほぼ自給、さとうきびは需要の約 1/3 を輸入に依存している。

表 2-18 インドネシアにおけるパーム油の需給の推移（1990 年～2004 年）

	人口	GDP	軽油需要	油脂内需		油脂生産量	油脂輸出量
	(百万人)	(ドル/人)	(千KL)	(kg/人)	(千トン)	(千トン)	(千トン)
1990	178	612	6094	6.9	1,237	2,413	1,176
1991	181	656	6681	7.0	1,269	2,658	1,389
1992	184	692	6957	9.4	1,731	2,970	1,239
1993	187	730	7569	9.6	1,795	3,421	1,626
1994	190	774	8500	10.7	2,030	3,860	1,830
1995	193	827	9240	11.2	2,159	4,220	2,061
1996	195	878	10344	12.9	2,528	4,540	2,012
1997	198	906	11482	14.3	2,841	5,380	2,539
1998	201	777	10868	13.8	2,763	5,006	2,243
1999	204	773	11010	13.8	2,810	5,600	2,790
2000	206	800	12139	13.3	2,750	6,700	3,950
2001	209	820	12854	13.7	2,857	8,030	5,173
2002	212	844	12701	14.3	3,027	9,370	6,343
2003	215	874	12142	14.8	3,170	10,600	7,431
2004	218	906	12675	15.4	3,347	12,380	9,033

¹⁷ インドネシアの石油精製能力は約 100 万 B/D で、国内需要を満たすには能力が不足している。特に軽油は内需量の約 50%を輸入に依存している。

図 2-19 インドネシアにおける油椰子（パーム）栽培地域（2005 年）



(出所) PEC 主催 (第 5 回アジア石油技術シンポジウム)

「インドネシアにおける代替エネルギーの開発状況について」(2007 年 1 月)

表 2-19 インドネシアにおける主な作物の需給バランス (2005 年)

単位1,000トン	生産量	輸入量	輸出量	飼料・種子用	食用	その他
小麦		5,201	228		4,002	971
米	53,985	990	185	1,145	45,488	8,155
とうもろこし	12,014	397	114	3,951	6,680	1,666
キャッサバ	19,459	628	1,471		12,398	6,218
さとうきび	29,505	15,412	1,322	6,596	26,216	10,782
油脂作物	83,099	1,709	61,797	59	20,772	2,181
大豆	797	1,313	15		1,953	142
ヒマワリ		4	0		3	0
菜種		15	1		8	5
綿実		6	4		2	0
ココナッツ	16,300	70	6,794		7,300	2,276
パーム	64,255	106	54,929		10,033	(601)
油脂種子	257	8	34			231

出所:FAO Statistical Database

4-2-2 BDFの見通し

(1)前提条件及び試算方法 (表 2-20)

- ① 耕地面積は順調に増加するが(約 3.2%/年)、現在の 2 倍の 800 万 ha を上限とする。
- ② 品種改良などにより、油収率は 5.3 トン/ha¹⁸まで上昇する。

¹⁸ マレーシアの油収率の年平均伸び率(1.3%)と同じ程度とした。マレーシアとインドネシアの 10%程度の生産性格差は今後も続くと仮定した。

- ③ GDPは年率4.6%、1人あたりGDPは年率3.6%¹⁹の伸びとした。
- ④ 輸送用燃料（ディーゼル軽油）は年率3.2%²⁰（GDP弾性値0.89）の伸びとした。
- ⑤ パーム油の外需（非燃料）はFAO予測（2006-2016年）を参考に2030年まで外挿した。
- ⑥ 試算方法はマレーシアと同様。

表 2-20 インドネシアにおけるBDFの需給見通しの前提条件

	耕地面積	油収率	GDP(1人当たり)	輸送用燃料
	(千ha)	(トン/ha)	US\$(2000年)	(千kl)
2005年	3,690	3.8	930	9,974
2010年	4,820	4.2	1,145	11,395
2015年	5,587	4.6	1,359	13,731
2020年	6,477	4.8	1,627	16,230
2025年	7,329	5.0	1,912	18,906
2030年	8,091	5.3	2,256	22,024
平均増加率	3.2%	1.3%	3.6%	3.2%

(注)BDF混合比率：2010年(5%)、2015年以降(10%)

(2) 試算結果

試算結果を表 2-21、図 2-20 に示した。投資が順調に進み、耕地面積が拡大していく場合には、2010年～2020年の輸出ポテンシャルとして、290万～490万トン程度が期待できる。しかしながら、農園開発、搾油工場、輸送インフラへの大規模投資が必要で、下記に示すような事態が生じた場合には、BDFへの投資が停滞して、輸出余力が顕在化しない状況も考えられる。したがって、パーム油を利用したBDFの生産には、持続可能なパーム油生産（RSPO）の観点から、長期的に取り組む必要がある（後述）。

(懸念事項)

- ①国内の石油製品(特に軽油)の供給不足が深刻化して、国内でのBDF利用が拡大する。
- ②熱帯雨林の伐採（不法伐採、森林火災など）に対する反対が高まる。
- ③国際市場でのパーム油価格の高騰が続き、BDFのコスト競争力が著しく低下する。

¹⁹ IEAの予測

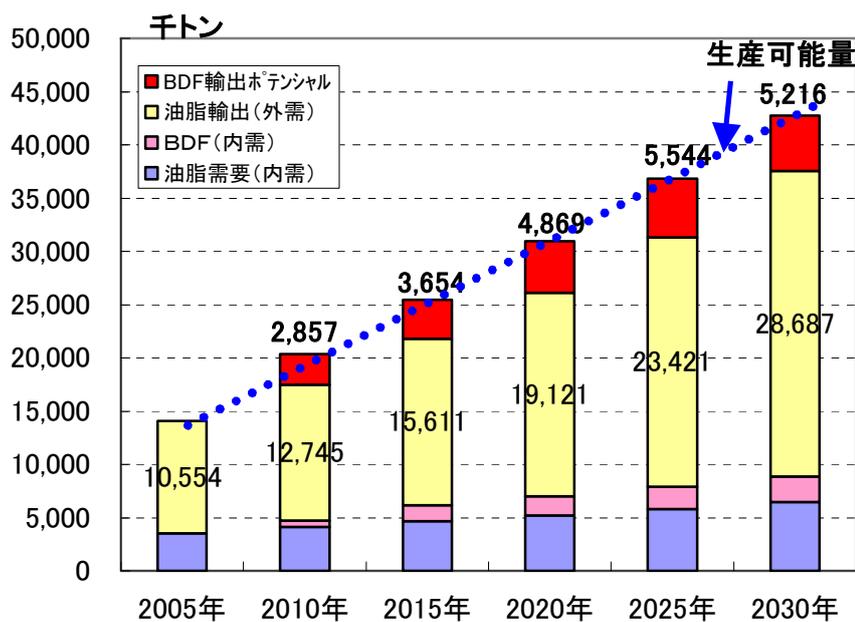
²⁰ エネ研のアジア/世界エネルギーアウトック 2007

表 2-21 インドネシアにおけるパーム油の需給見通し

(千トン)

	油脂生産可能量	油脂需要(内需)	BDF(内需)	油脂輸出(外需)	BDF輸出ポテンシャル
2005年	14,100	3,546	0	10,554	0
2010年	20,362	4,142	618	12,745	2,857
2015年	25,429	4,676	1,489	15,611	3,654
2020年	30,983	5,233	1,760	19,121	4,869
2025年	36,843	5,827	2,051	23,421	5,544
2030年	42,753	6,460	2,389	28,687	5,216
平均増加率	4.5%	3.2%	13.8%	2.8%	

図 2-20 インドネシアにおけるBDF輸出ポテンシャルの推移



第3章 燃料の製造プロセスと品質規格及び供給コストについて

第1節 植物油の特性と品質規格に与える影響

1-1 FAMEの品質がディーゼルエンジンの性能に与える影響

BDF¹は、様々な植物油脂を原料とすることから種類も多く、化学組成に由来する品質の差異が生じる。また、その製造方法は比較的容易なため、製造方法（精製度）の違いから不純物（微量成分）の含有量も千差万別である。こうしたBDFを軽油に混合して使用するとき、その品質のレベルによってはディーゼルエンジンに不具合が生じる可能性がある。表 3-1 に主要な不具合と品質上の要因を示した。製造工程上の不純物の残存によるものとしては、遊離メタノール、アルカリ系触媒、遊離水分、遊離グリセリンなどがある。一方、低温での高粘度や、重合物質、固形不純物などは、油脂の化学組成由来の低温流動性や酸化安定性から生じるものがある。

表 3-1 FAMEの品質上の要因とエンジントラブル

要因	影響	不具合状況
FAME	ゴムの軟化、硬化、亀裂	燃料フィルター目詰まり
遊離メタノール	アルミニウム、亜鉛材料の腐食 引火点低下	燃料噴射装置の腐食
製造工程の薬品	Ca、Na、アルカリ土類金属の混入 遊離脂肪酸による非鉄金属(Zn等)腐食 有機酸との反応による沈殿物析出	燃料噴射装置の腐食 燃料フィルター詰まり 摺動部の固着
遊離水分	加水分解(脂肪酸)による腐食 バクテリアの繁殖、電気伝導度の増加	燃料噴射装置の腐食 燃料フィルター詰まり
遊離グリセリン	非鉄金属の腐食、摺動部への沈積	燃料フィルター詰まり インジェクションのコーキング
低温での高粘度	ロータリー型分配ポンプでの局所的過熱	燃料供給ポンプの停止 寿命短縮
固形不純物、粒子状物質	潤滑性低下	寿命短縮、ノズルシート磨耗 ノズル閉鎖
重合物質	デポジット析出、燃料混合による凝集	燃料フィルター閉鎖
遊離脂肪酸、有機酸	非鉄金属腐食	燃料噴射装置の腐食

1-2 FAMEの品質を規定するもの

植物油油脂の化学構造に起因する代表的なものとして、低温流動性と酸化安定性があげられる。まず油脂の化学構造と化学反応について、概説を行うこととする。

¹ ここでいうBDFはバイオ第1世代のFAME（脂肪酸メチルエステル）をさす。糖質分（澱粉の糖化）を発酵させてエタノールを製造する「生化学反応」（酵素を触媒として目的物のみを生産）と異なり、酸塩基触媒などによるエステル交換反応「熱力学的化学反応」では、未反応物、中間物、副産物が生じる。

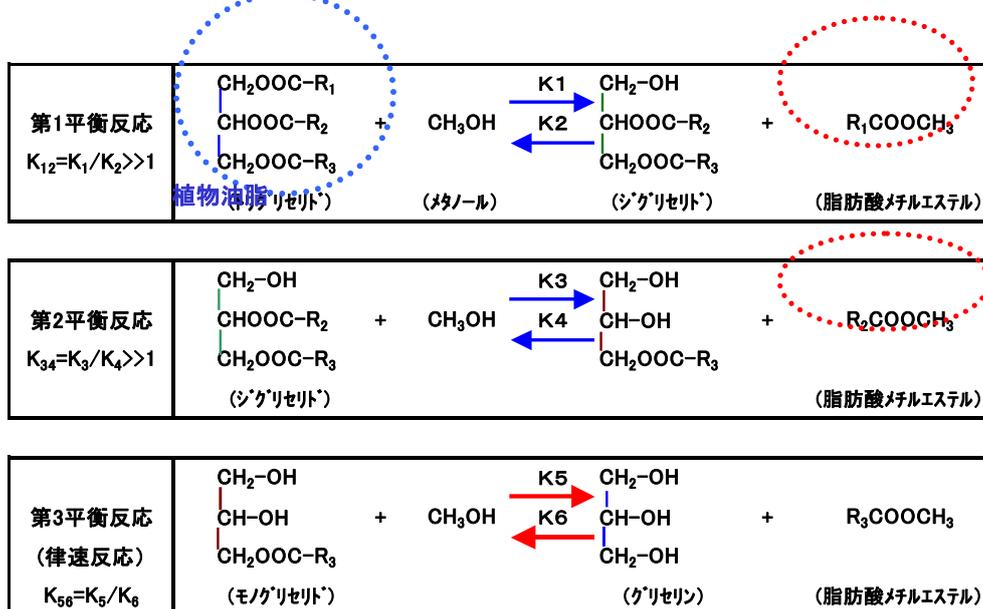
1-2-1 油脂の構造と化学反応

FAMEの原料となる植物油(油脂)は、1分子のグリセリン² (3価のアルコール) と3分子の脂肪酸がエステル結合³したものであり、トリグリセリドともいう。

脂肪酸 (CH₃CH₂CH₂...CH₂-COOH) は直鎖状のカルボン酸⁴であり、炭素数 (-COOHを除く) は16、18が中心である。脂肪酸分子3つがエステル結合しているトリグリセリドの平均分子量は約900程度と大きく、常温では固体で存在する。図3-1に示すように、油脂1分子にある、3つのエステル結合を段階的に加水分解して遊離脂肪酸とし、これがメタノールとエステル結合して、分子サイズが300程度の小さな脂肪酸メチルエステルに変換される。軽油留分に相当する (炭素数10~20)、常温で液体の製品となる。これがFAME、脂肪酸メチルエステル (**F**atty **A**cid **M**ethyl **E**ster) と呼ばれるものである。

もとの油脂から脂肪酸1分子が加水分解して遊離したものをジグリセリド、2分子が遊離したものをモノグリセリドという。3分子が遊離するとグリセリンになる。このようにメタノールを用いて、エステル結合が1つの分子量の小さいエステルへと交換することをエステル交換という。3段階に分かれるエステル交換は平衡反応であるため、未反応物や中間生成物⁵が残存する。

図 3-1 FAMEの生成反応 (エステル交換)



² 水酸基(-OH)が3つあるものをいう。メタノールやエタノールは水酸基(-OH)が1つである。

³ エステル結合とは、水酸基 (-OH) とカルボン酸 (-COOH) から脱水 (H₂O) したものをいう。

⁴ 2重結合が1つ、2つ、3つ及び持たないものに分かれる。

⁵ 未反応物 (トリグリセリド、メタノール)、中間生成物 (モノグリセリド、ジグリセリド)

1-2-2 油脂の化学構造と品質の差異

油脂（トリグリセリド）中の脂肪酸としては、C18(炭素数 18)のステアリン酸（2重結合無し⁶）、オレイン酸（2重結合が1つ）、リノール酸（2重結合が2つ）、リノレン酸（2重結合が3つ）、C16のパルミチン酸（2重結合無し）などが大半を占める。その他、一部の油脂にはC14、C22の脂肪酸が含まれることがある⁷。図3-2、表3-2に代表的な動植物油脂の各脂肪酸比率を示した。4大油脂（大豆、なたね、ひまわり、パーム）の構成比には著しい相違がある。飽和脂肪酸比率が50%近くを占めるパーム油、不飽和脂肪酸比率が80%以上を占め、さらに、2重結合が2つ以上ある脂肪酸が50%以上を占める大豆油、ひまわり油と、2重結合が1つの不飽和脂肪酸が50%を占めるなたね油に分かれる。不飽和度が高い（ヨウ素価が高い）大豆油、ひまわり油は流動点が低いが、酸化安定性は悪い。酸化安定性は比較的良好であるが流動点が高いパーム油、そしてその中間を占めるなたね油に分かれる。

図 3-2 油脂別の各脂肪酸の比率

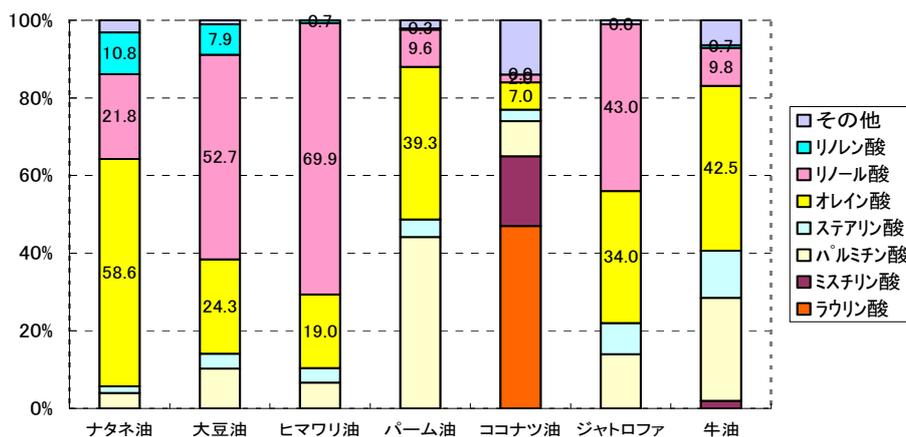


表 3-2 油脂別の各脂肪酸の比率

	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	その他
	ラウリン酸	ミスチリン酸	パルミチン酸	ステアリン酸	オレイン酸	リノール酸	リレン酸	
なたね油	0.0	0.0	4.0	1.7	58.6	21.8	10.8	3.1
大豆油	0.0	0.0	10.3	3.8	24.3	52.7	7.9	1.0
ひまわり油	0.0	0.0	6.7	3.7	19.0	69.9	0.7	0.0
パーム油	0.0	0.0	44.2	4.5	39.3	9.6	0.3	2.1
ジャトロファ	0.0	0.0	14.0	8.0	34.0	43.0	0.0	1.0

⁶ 2重結合や3重結合などの多重結合がない脂肪酸を飽和脂肪酸、多重結合が存在する脂肪酸を不飽和脂肪酸という。

⁷ 動植物油脂中の脂肪酸(生体が合成する)はごくまれな例外を除いて偶数の炭素数を持つ脂肪酸である。

1-2-3 酸化安定性

(1)定義

FAMEは不飽和結合(2重結合)を有する脂肪酸を含有するので酸化されやすい。2重結合の数が多いほど酸化傾向は顕著になる。酸化劣化物は不溶性の沈殿物や粘性物質となり、燃料噴射システムやフィルターの目詰まり生じさせる。FAMEの貯蔵安定性を評価するために、欧州の現状の燃料規格では酸化安定性試験(EN14112)を行い6時間以上を合格とする。本来、この試験法は食品関係のRancimat試験と呼ばれるものである。ドイツのAGQM(バイオディーゼル品質管理協会)によれば、給油段階での試験で6時間以上を維持するには、製造段階での試験で、10時間以上(酸化防止剤⁸を添加)とすることが必要とされる。

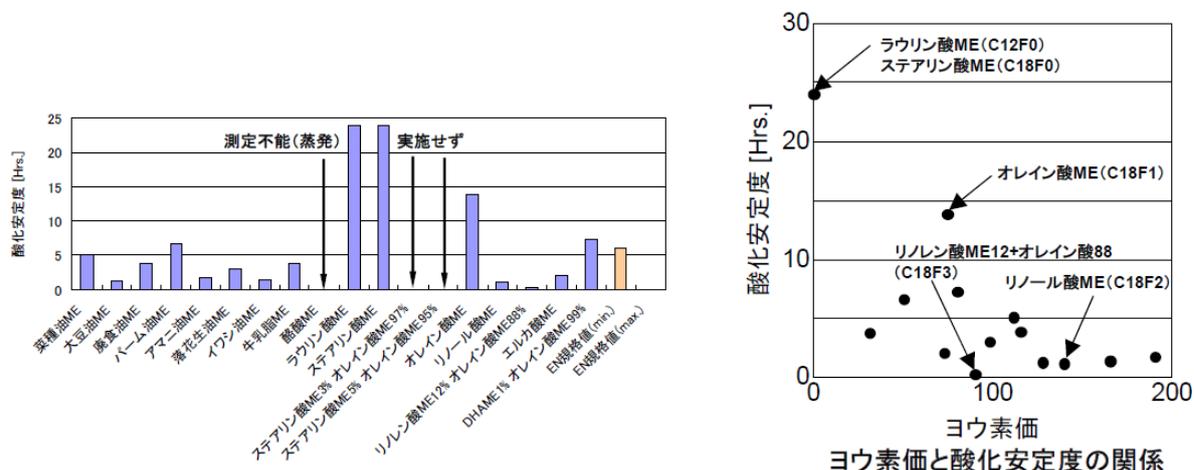
(2)試験法

試料 3g、加熱温度 110°C、清浄空気送分量 10L/hの条件下で、揮発性分解物(ギ酸や酢酸などの有機酸)を捕集し、捕集水 50mLの導電率が急激に変化する屈折点(0→200 μs/cm)までの時間を測定する。ヨウ素価⁹が高いと酸化安定性は悪くなる。

(3)酸化安定性とヨウ素価の相関

各脂肪酸のヨウ素価と酸化安定性を示したのが図 3-3 である。

図 3-3 酸化安定性と不飽和度(ヨウ素価)の関係



(出所)燃料政策小委員会資料

(注)ヨウ素価が高いほど不飽和度が高いことを示す。

⁸ フェノール系、アミン系酸化防止剤を 0.1%添加すると酸化安定時間は 10 時間となると言われている。

⁹ 油脂中の脂肪酸に存在する不飽和結合(2重結合)にヨウ素を付加させてその量を測定する。不飽和度が高くなるほどヨウ素価は高くなる。

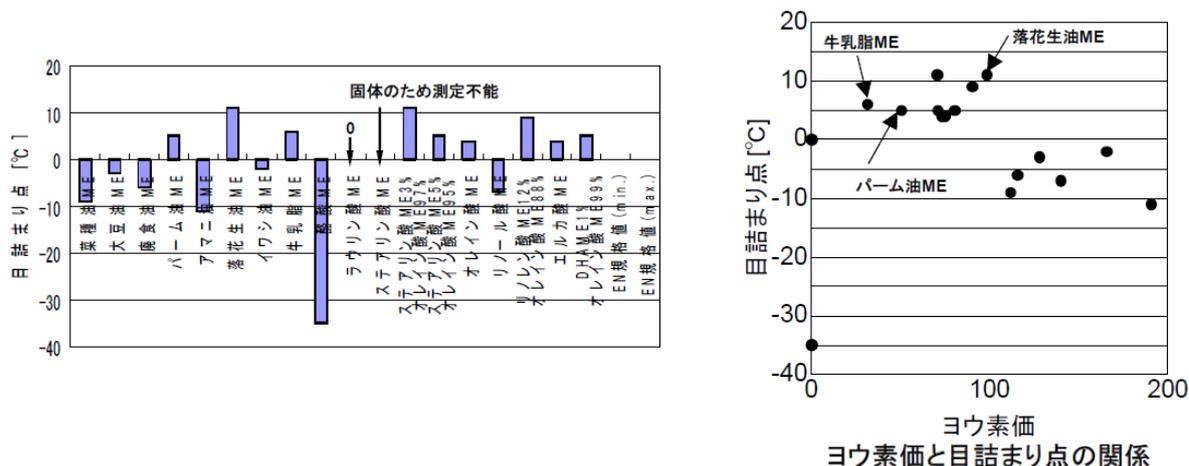
1-2-4 全酸価

油脂に元来存在する遊離脂肪酸、加水分解により発生する有機脂肪酸、さらに、経時劣化にともなう過酸化物の生成と分解により発生する有機脂肪酸などがあり、その含有量を水酸化カリウムで中和するのに必要な量で表示する。

1-2-5 低温流動性

流動点とは流動性をなくす温度を言い必ずしも固化する温度(融点)ではない。2.5℃ごとに表示する。その他に曇り点、燃料フィルターが目詰まりの基準となる目詰まり点 (CFPP) がある。ヨウ素価が低いと流動点 (または CFPP) は高くなる。原料により異なるが、概ね、曇り点>CFPP>流動点>融点の順に低くなる。

図 3-4 低温流動性と不飽和度 (ヨウ素価) の関係



(出所)燃料政策小委員会資料

1-2-6 原料別の FAME の品質

表 3-3 に原料別の品質を記載した。ヨウ素価が 59 のパーム油の酸化安定性が 10 時間に対して、ヨウ素価が 100 を超える大豆油やナタネ油は 3~4 時間に過ぎない。一方、流動点はパーム油が 12.5℃と高いのに対して、ナタネ油は-12.5℃と低い。

表 3-3 原料別の FAME の品質

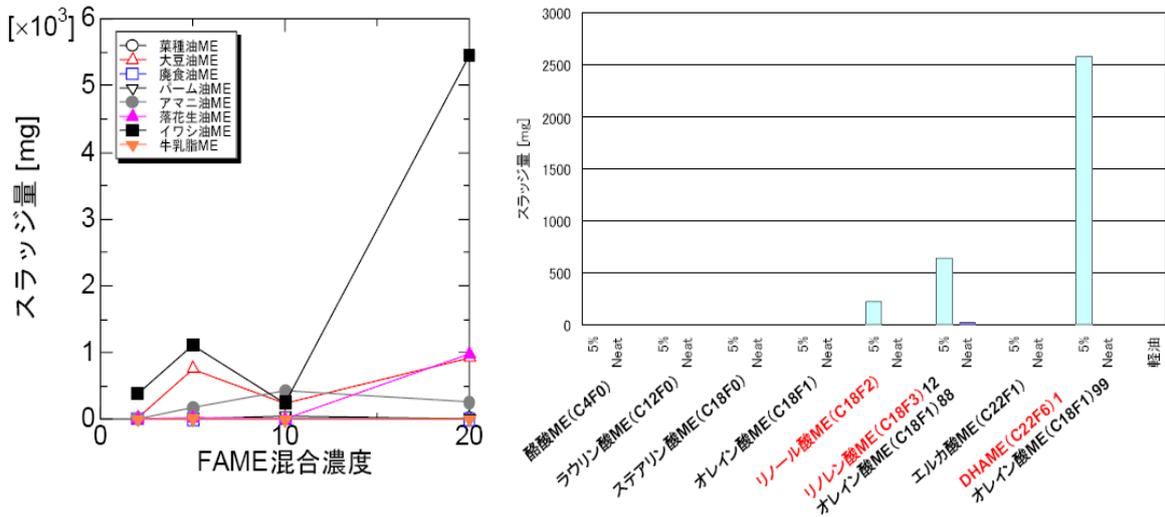
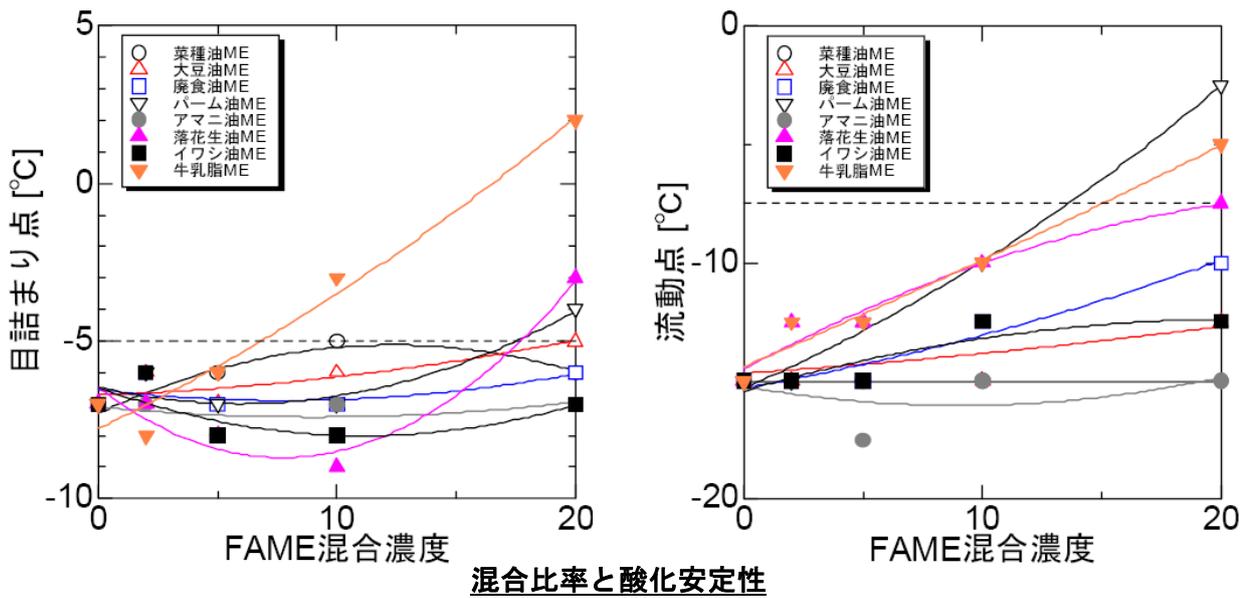
	大豆油	ナタネ油	パーム油	ひまわり油	ジャトロファ
密度	0.885	0.884	0.876	0.873	0.881
動粘度 (mm ² /s:30℃)	5.08	5.66	5.65		5.41
引火点 (°C)	174	164	178	182	174
流動点 (°C)	-2.5	-12.5	12.5	-5	2.5
全酸価 (mgKOH/g)	0.69	0.32	0.27		0.4
ヨウ素価	129	116	59	137	98
酸化安定性 (hr)	4.3	3.3	10		

(出所) ENEOS テクニカルレビュー、バイオディーゼル最前線

FAMEを軽油に混合した場合の低温流動性及び酸化安定性を検討したのが図3-5である。混合率が増加するに従い、目詰まり点や流動点は上昇する傾向が見られるが、原料によっては極値をとる。混合率が10%未満のところ、酸化安定性が極値をとる場合がある。

図3-5 原料別FAMEの混合軽油と低温流動性及び酸化安定性の関係

混合比率と低温流動性



(出所)燃料政策小委員会

第2節 バイオディーゼル燃料の製造工程と品質規格

2-1 BDF¹⁰の品質規格

(1) 欧州規格と品質管理

欧州はBDFを軽油の基材と位置づけて、表3-4に示すBDF規格（ニート：B100）と表3-5に示すBDF混合軽油規格（B5）の2本立てで品質を確保する方法を採用している。

表3-4 BDF規格（ニート）

		EN 14214(欧州)	ASTM D6751(米国)	任意規格案(日本)
エステル含有率	wt%	96.5以上	-	96.5以上
密度(15℃)		0.860-0.900	-	0.860-0.900
動粘度(40℃)	mm ² /s	3.0-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
引火点	℃	120以上	130以上	120以上
CFPP(目詰まり点)	℃	6グレード*	-	当事者の合意
流動点	℃	-	-	当事者の合意
曇り点	℃	-	-	-
硫黄分	ppm	10以下	15以下	10以下
残留炭素(10%)	wt%	0.3以下	0.05以下	0.3以下
硫酸灰分	wt%	0.02以下	0.02以下	0.02以下
セタン価		51以上	47以上	51以上(セタン指数)
水分	ppm	500以下	-	500以下
水泥分	vol%	-	0.05以下	-
総不純物	ppm	24以下	-	24以下
銅板腐食		クラス1	クラス3	1以下
酸化安定度	h	6以上	-	当事者の合意
酸価	mgKOH/g	0.5以下	0.8以下	0.5以下
ヨウ素価		120以下	-	120以下
リノレン酸メチルエステル	wt%	12以下	-	12以下
多価不飽和メチルエステル	wt%	1以下	-	1以下
残存メタノール	wt%	0.2以下	-	0.2以下
残存モノグリセリド	wt%	0.8以下	-	0.8以下
残存ジグリセリド	wt%	0.2以下	-	0.2以下
残存トリグリセリド	wt%	0.2以下	-	0.2以下
残存遊離グリセリン	wt%	0.02以下	0.02以下	0.02以下
残存全グリセリン	wt%	0.25以下	0.24以下	0.25以下
ナトリウム、カリウム	ppm	5以下	-	5以下
カルシウム、マグネシウム	ppm	5以下	-	5以下
リン	ppm	10以下	10以下	10以下
90%留出温度	℃	-	360以下	-

(注)欧州規格はナタネ油を想定、スペインはヒマワリ油のためヨウ素価を140以下としている

¹⁰ バイオディーゼル燃料は規格上、FAMEである必要がないので(例えば水素化油)、BDFという表記を用いる。

EN14214 はナタネ油を想定した規格であるため、パーム油を原料としたBDFは規格上合格しない。EN950 はEN14214 を合格したBDFを5%まで軽油に混合することを認めているが、混合軽油の試験だけでは、混合されたBDFがEN14214 規格に合格しているか確認ができないという問題点がある。BDFを製造販売している業界では、AGQM（バイオディーゼル品質管理協会）を組織して（BDF販売業者の約3/4が参加）、自主的に品質検査を実施し認証を行っており、自動車メーカーもAGQMの認証内で品質保証を行っている¹¹。2004年の実績（品質検査）では、30%が不合格（CFPP、酸化安定性）となった。

(2) 日本の規格と品質管理

日本では、軽油の品質は「品確法」によって規定されている。BDF混合軽油の品質を考える場合、使用される原料などが特定できないこともあり、品確法同様、最終段階で品質を規定することが妥当として、「品確法」で定める軽油の規格項目に追加することとした¹²。

表 3-5 BDF規格（混合軽油）

		EN 590(B5) (欧州)	BDF混合軽油(日本)
エステル含有率	wt%	-	5以下
密度(15°C)		0.820-0.845	-
動粘度(40°C)	mm ² /s	2.0-4.5	-
引火点	°C	55以上	-
CFPP(目詰まり点)	°C	6グレード*	-
硫黄分	ppm	50以下	10以下
残留炭素(10%)	wt%	0.3以下	-
硫酸灰分	wt%	-	-
セタン価		51(セタン指数46)以上	45以上(セタン指数)以上
水分	ppm	200以下	-
総不純物	ppm	24以下	-
銅板腐食		クラス1	-
酸化安定性	mgKOH/g	25以下(g/m ³)	0.12以下
酸価	mgKOH/g	-	0.13以下
ヨウ素価		-	-
蟻酸、酢酸、プロピオン酸	wt%		0.003以下
残存メタノール	wt%	-	0.01以下
残存トリグリセリド	wt%	-	0.01以下
蒸留性状(90%)	°C	360以下	360以下
多環芳香族水素		11以下	-
潤滑油性(60°C)		460以下	-

(注)酸化安定度：混合軽油では電気伝導度による測定ができない。

¹¹ 原料はナタネ油に限定している。

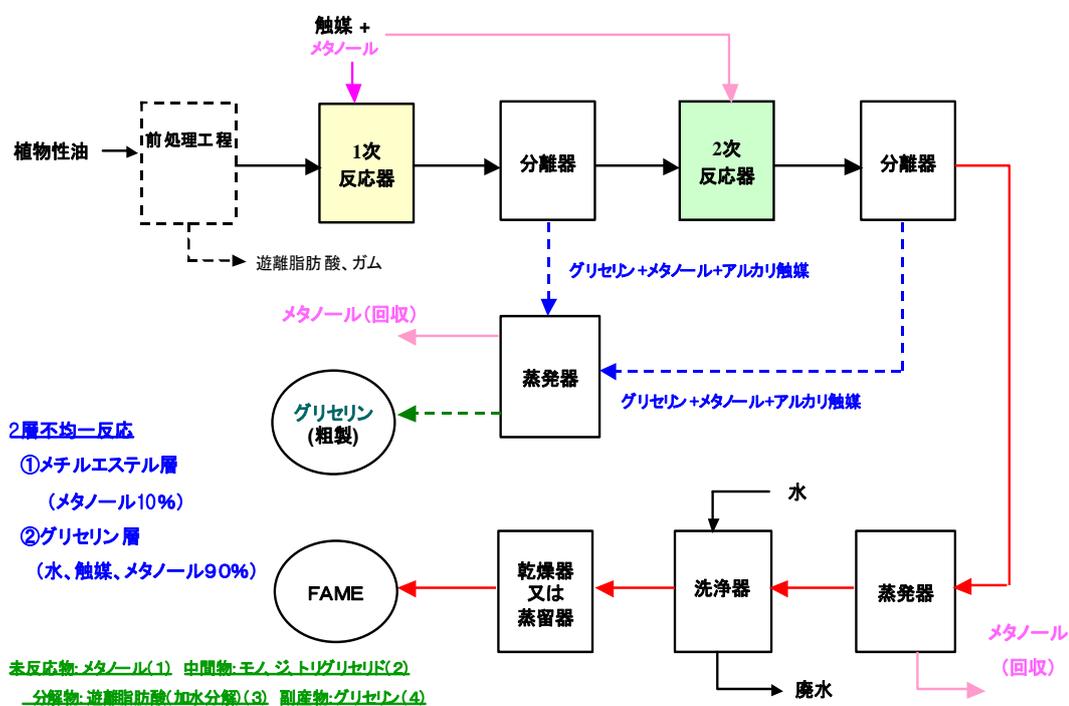
¹² 2007年3月に品確法が改正施行された。

2-2 FAMEの製造工程

(1) アルカリ触媒法

主反応はナトリウムまたはカリウム（塩基タイプ）を触媒として、メタノールと2段階で反応（不均一反応）を行う。前処理段階で遊離脂肪酸やガム成分を除去してから、主反応（エステル交換反応）に移行する。反応後、最終生成物のメチルエステル層（メタノールを含む）と副産物のグリセリン層（水、触媒、メタノールを含む）の2層に分かれるが、メチルエステルの分離、精製が十分でない場合、FAME中のメタノール、水分、アルカリ金属、グリセリン、モノ、ジグリセリドなどが高い濃度で混入する可能性がある。

図 3-6 FAME 製造工程（一般）



(2) 京都市クリーンセンターの廃食油回収プラント（図 3-7）

京都市は平成9年に家庭用の廃食油の回収を始めた。当初は、回収した廃食油をBDF製造業者に委託していたが、平成16年にBDF製造プラントを建設して稼働させてからは、自らBDFの製造業者となった。年間の生産量は150KLで、ゴミ清掃車（B100）と市バス（B20）に燃料を供給している。運営者の話では、廃食油¹³の品質上の問題点、特に酸化安定性の関係から、ニート利用(B100)の場合には、燃料噴射系のトラブルが多く、EN14214の規格はクリアできないとのことである。実用上は軽油への混合使用が望ましいとしてい

¹³ 回収された原料の約70%はナタネ系である。

る。但し、軽油への混合利用の場合には、「軽油引取税の課税対象¹⁴」となることから、やむを得ず、ニート利用をしているようである。京都市に限らず、BDF製造業者の多くは、普及拡大のため免税措置を要望している。

図3-7 京都市クリーンセンターのBDFプラント

平成9年:家庭用廃食用油回収始める

バイオディーゼル導入

平成16年:バイオディーゼル製造プラント稼働

(建設コスト7.5億円(うち3.2億円は地盤改良)、補助金2.7億円)

バッチ処理(1工程=3日間)

前工程(1日=3時間)+反応工程(1日=7時間)

+精製工程(1日=5時間)=合計15時間

稼働日(150日)÷1工程(3日)*(10KL*3)=1,500KL/年

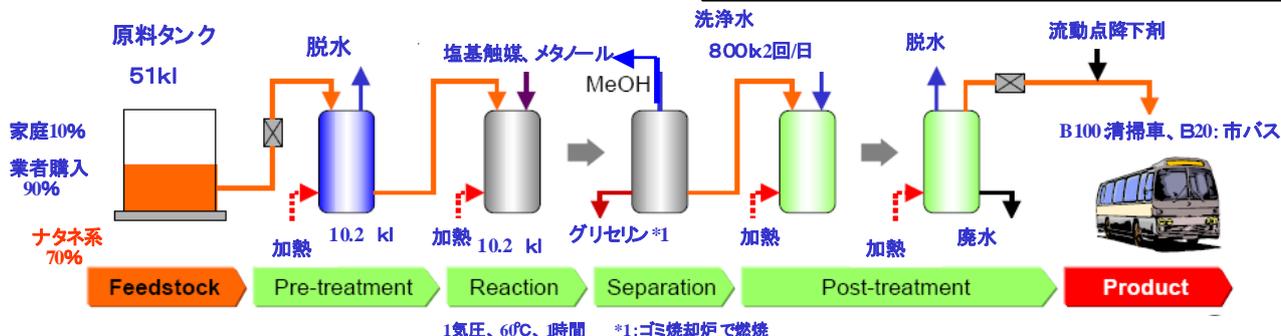


廃食用油回収(千KL/年)

	潜在回収量	実回収量	利用率
家庭用	1,500	150	10.0%
事業者購入	3,000	1,460	48.7%
合計	4,500	1,610	35.8%

製造コスト(円/L):軽油税抜き

廃食用油購入	メタノール触媒	電気(自家発)	蒸気、加熱費		
26	9	0	2		
品質検査	研究開発	その他	減価償却費	合計	
6	7	32	20	102	



京都市のBDFプラントは建設コスト7.5億円の大規模な設備であるが、小規模な家庭用の機器では数10万円から100万円程度のももあり、不純物の精製度を無視するならば、比較的簡単に製造が行える。

¹⁴ 軽油引取税(地方税法)によると、BDF100%のニートの場合は、鉱物油としての扱いを受けないので(鉱物油の含有率が1%以上)、軽油引取税の対象とならない。一方、軽油に混合した場合は、組成にかかわらず、全て軽油引取税の対象として課税される。

(3)新しい製造プロセス

塩基触媒を使用するプラントが商業用として確立しているが、高濃度の遊離脂肪酸を含有する油脂の前処理用として酸触媒を利用し、主反応には塩基触媒を利用する混合型のプロセスがある (図 3-8)。

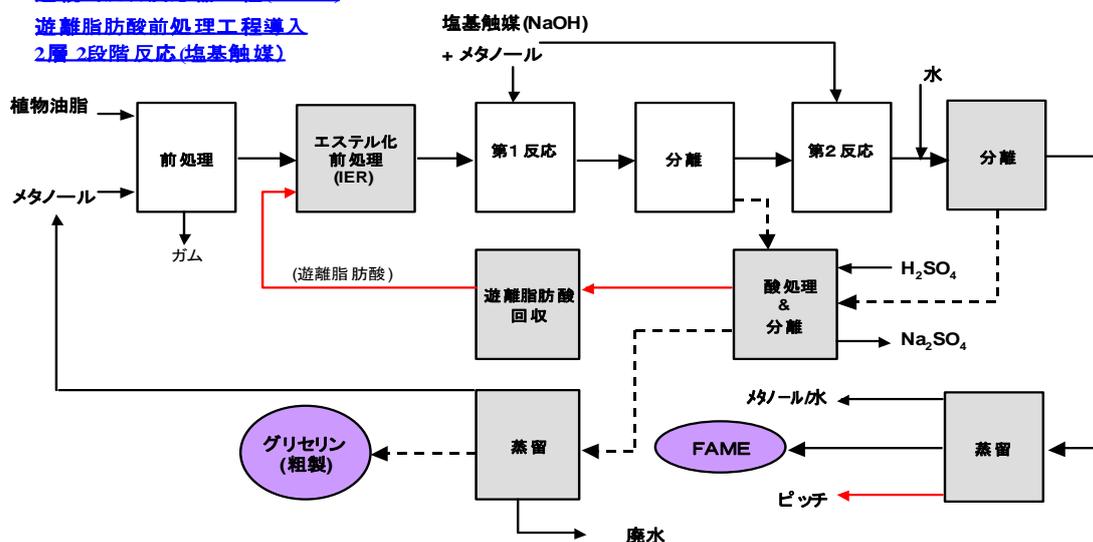
図 3-8 酸-塩基触媒を利用した新しいプロセス (ライオン)

ライオン

連続式混合反応器工程(CSTR)

遊離脂肪酸前処理工程導入

2層2段階反応(塩基触媒)



プロセス(企業)	国家	触媒	反応プロセス
ライオン	日本	酸(前処理)、塩基	連続式(CSTR* ¹)、二段階反応
Novance	フランス	塩基	バッチ式
Lurgi	オーストリア	酸(前処理)、塩基	連続式(PFR* ²)、二段階反応
ガヤエネジ	韓国	酸(前処理)、塩基	連続式(PFR)、二段階反応
Henkel	ドイツ	酸(前処理)、塩基	連続式(PFR)、二段階反応
Diester	フランス	酸(前処理)、塩基	連続式(PFR)、二段階反応
Axen	フランス	酸(前処理)、不均一固体触媒	連続式(PFR)、二段階反応

(注) *¹ CSTR (Continuous Stir Tank Reactor:連続攪拌式)

*² PFR (Plug Flow Reactor : 向流式反応)

2-3 水素化精製

2-3-1 添加剤について

(1) 酸化防止剤の効果

フェノール系の酸化防止剤を添加することにより酸化安定性は向上する。京都市のクリーンセンターの実験によれば、廃食油 FAME に 1,000PPM 程度添加すると、酸化安定性が 5 時間から 10 時間へと改善される。但し、添加量を増やしても 15 時間以上には改善されない。

(2) 流動点降下剤¹⁵の効果

ヨウ素価の高い油脂への添加効果は認められるが、パーム油への効果は認められない。

表 3-6 原料別 FAME への添加剤効果の比較

	大豆油		菜種油		ヒマワリ油		パーム油	
	無添加	1%添加	無添加	1%添加	無添加	1%添加	無添加	1%添加
密度	0.87	0.874	0.871	0.866	0.873	0.878	0.842	0.87
動粘度 (cst)	4.12	4.37	4.43	4.68	4.3	4.45	5.15	5.15
引火点 (°C)	186	159	178	155	182	162	179	154
流動点 (°C)	-2	-9	-13	-30	-5	-24	12	11
曇り点 (°C)	1	1	-4	-6	1	0	18	13

(出所) サンケアフェューエルズ(株)

2-3-2 水素化精製について

エステル交換による FAME は図 3-9 に示すとおり、油脂中の脂肪酸の化学構造は変化しないので、化学構造に起因する品質 (酸化安定性や低温流動性) の改善には限界がある。

最近では水素化処理を行って BDF を製造する方法が開発されている。この場合、図 3-9 に示すとおり、油脂は水素化、分解されて (脱炭酸、脱水を含む)、軽油相当留分¹⁶が生産される。FAME との相違は、分子中にエステル基 (-COO-) など酸素分子が含まれない、直鎖状の炭化水素 (CH) が中心となる。従って、FT法により合成される炭化水素 (BTL) と似た化学組成となる。

水素化精製には、表 3-7 に示すように、フィンランドのネステオイル社 (NExBTL)、ブラジルのペトロプラス社 (H-BIO) などがあるが、NExBTL 法は、油脂を水素化精製後、異性化を行い、イソパラフィン系化合物が生成するため、パーム油でも流動点は降下されると言われる。H-BIO 法は、石油精製プロセスの軽油脱硫装置に、FCC 軽油 (LCO) や重質軽油 (HGO) とともに油脂 (主として大豆油) を処理する方法である。その他、新日本石油がトヨタ自動車と共同研究開発中のプロセスがある。

¹⁵ 軽油用に市販されている流動点効果剤には、エチレン酢酸ビニル系共重合体 (ポリマー型)、長鎖ジカルボン酸アミド系 (油溶性分散剤) などがある。

¹⁶ 反応条件 (温度、圧力) により、油脂中の不飽和結合を一部水素化して飽和する (硬化油) 程度のマイルドな場合から、水素化分解してしまうハードな場合まで様々である。

FAMEと水素化精製のプロセス上の条件を比較してみると、前者は、圧力0.1MPa、温度60℃で、ほぼ常温常圧で反応を行う（触媒はアルカリ触媒で安価である）。但し、メタノールが必要となるので、天然ガスから製造されるエネルギーは大きい。一方、水素化精製の場合、圧力は4～6MPa、温度240℃～320℃と高温高压で反応を行い（触媒も高価である）、水素化精製に必要な水素製造が別途必要となる。

図_3-9 エステル交換反応と水素化精製

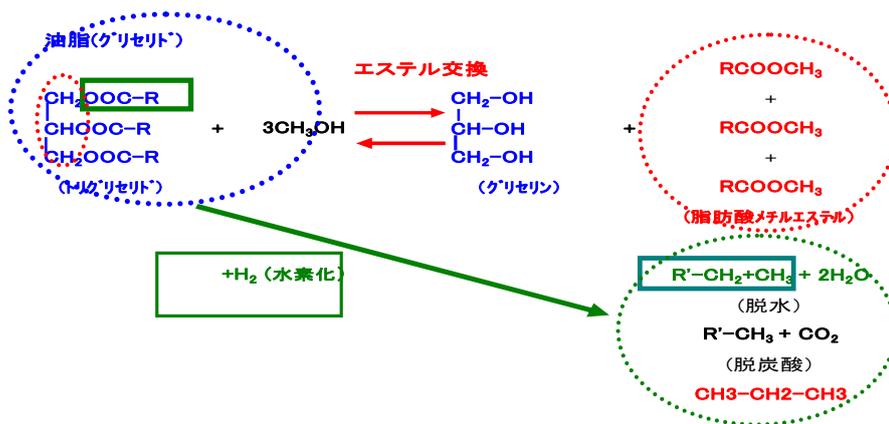


表 3-7 水素化精製プロセスの比較

会社名	プロセス	プラント	原料
ペトロプラス (ブラジル)	H-BIO 軽油脱硫装置で混合処理*1	2007年末稼働 26万KL/年(2007年) 43万KL/年(2008年)	大豆油
ネステオイル (フィンランド)	NExBTL 単独処理(水素化+異性化)	2007年秋稼働 45万KL/年(2009年末)	ナタネ油
新日石	BHD 単独処理(水素化処理)	2007年実証試験 (東京都、トヨタ)	パーム油

*1H-BID では重質軽油、FCC 軽油 (LCO)、コーカー軽油と油脂の混合処理

表 3-8 水素化精製油と FAME の性状比較

	新日石 (BHD)		ネステオイル (NExBTL)		GTL	一般軽油
	パーム油 (FAME)	パーム油 (水素化)	ナタネ油 (FAME)	NExBTL (水素化)		
密度 (15℃)	0.874	0.783	0.885	0.780	0.778	0.830
引火点 (℃)	180	116	—	—	—	70
セタン価	62	98	51	84~99	73~81	58
流動点 (℃)	20	20	—	—	—	-15
曇り点 (℃)	—	—	-5	-5~-30	-0~-15	-5
総発量 (MJ/kg)	40	47	—	—	—	46
低位発量 (MJ/kg)	—	—	38	44	43	43
硫黄分 (ppm)	1	1	<10	<1	<10	6
酸化安定性	10.14	0.06	—	—	—	0.06

(出所) パーム油/軽油の性状は ENEOS テクニカルレビュー、ナタネ油/GTL の性状は NESTE OIL 資料

第3節 BDFの供給コスト

3-1 植物油価格の動向

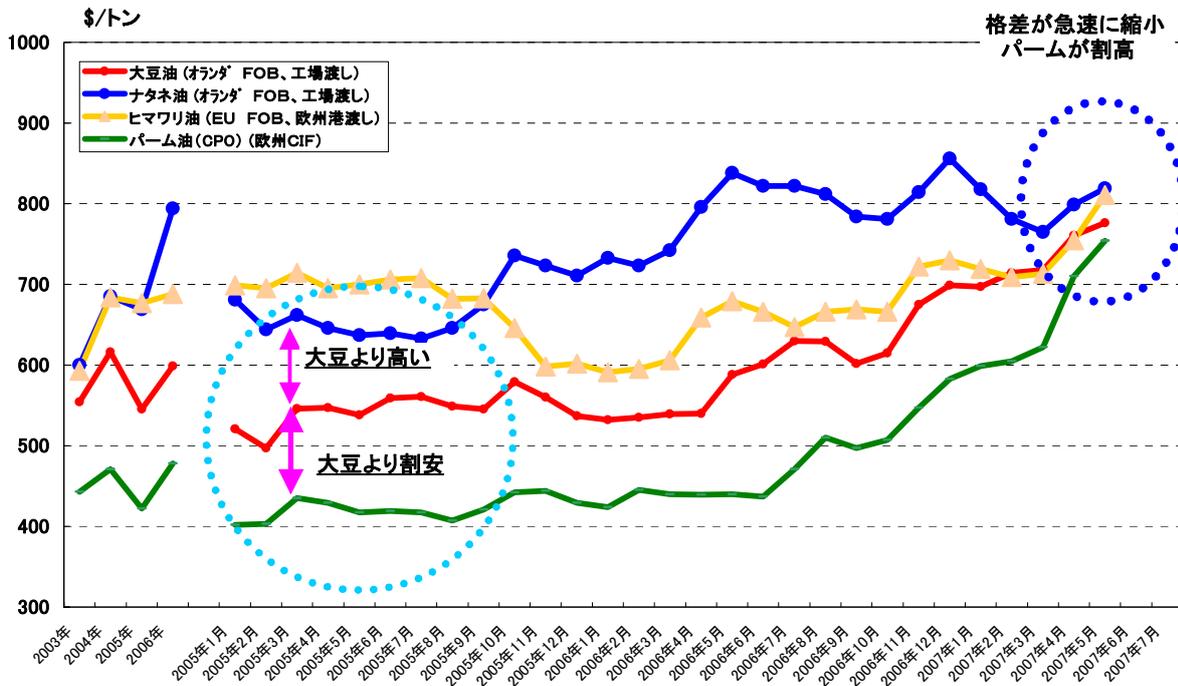
植物油の価格はシカゴ商品取引所における大豆油の先物価格¹⁷(図3-10)を基軸にして、ナタネ油やパーム油の価格が形成される仕組みとなっている。

図3-10 シカゴ大豆油先物価格の推移 (1997~2007年)



(注) 1ポンド=453.6グラム

図3-11 4大油脂価格の推移 (2003~2007年)

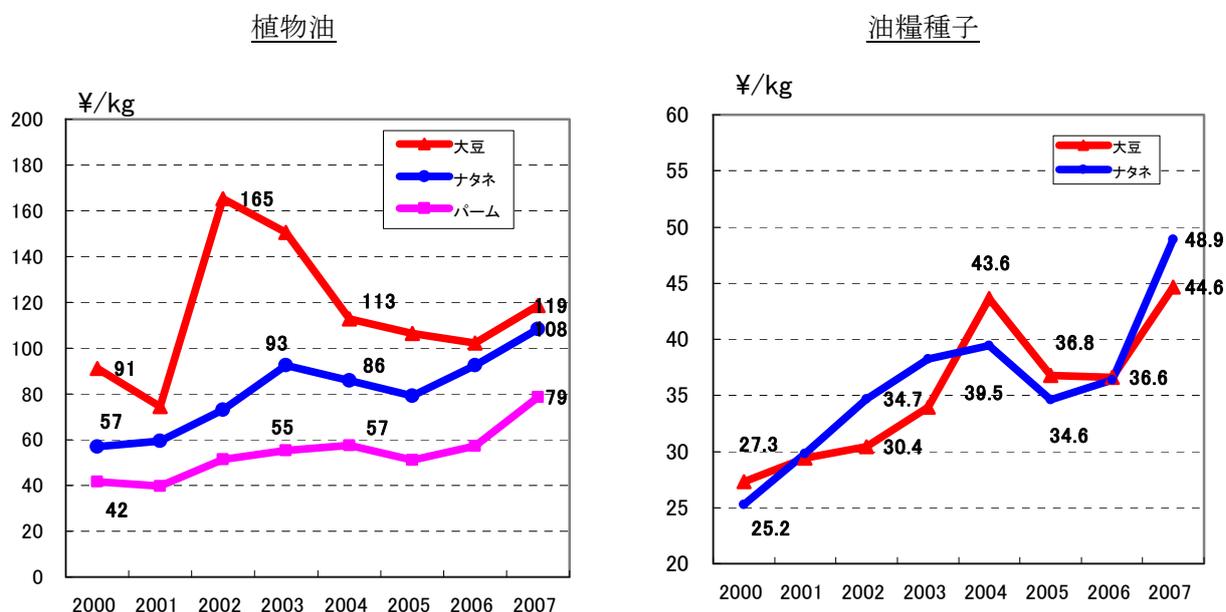


¹⁷ シカゴ郊外のデカウンターにある搾油工場の出荷価格

図 3-11 に、4大油脂の価格推移を示した。2005 年初頭では、大豆油価格は 550 ドル、パーム油価格は 450 ドル、およびナタネ油は 650 ドルというように、大豆を中心として、概ね (+/-) 15%~20%程度の値差がついていたが、それ以降価格は急騰し、2007 年 5 月時点で、大豆油、ナタネ油、パーム油¹⁸の価格は 750 ドル~800 ドル付近まで上昇し、油種間格差は 50 ドル程度と大幅に縮小した。

日本への輸入価格の推移を図 3-12 に示した。既に述べたように、日本は大半が油糧種子の形（パーム油を除き）で輸入して、国内の製油所で搾油を行っている。

図 3-12 4大油脂の日本への輸入価格の推移（2003~2007年）



	大豆		ナタネ		ひまわり		パーム	
	原料	大豆油	原料	ナタネ油	原料	ひまわり油	-	パーム油
2000	4,829	1	2,193	19	5	23	-	373
2001	4,832	3	2,150	22	5	21	-	393
2002	5,039	4	2,084	17	4	26	-	415
2003	5,173	17	2,084	17	3	23	-	428
2004	4,407	28	2,313	48	3	20	-	466
2005	4,180	52	2,295	63	2	23	-	479
2006	4,041	60	2,274	17	2	21	-	499
2007	2,465	30	1,248	12	2	11	-	307

(注)2007年（1~7月）、パーム油はCPO(粗油)、RBD（精製油）

¹⁸ 2007年7月には900ドル/トンまで上昇した結果、価格競争力は失われている。

3-2 国産BDFの生産コスト

3-2-1 国産ナタネを原料とした生産コスト

表 3-9 に、国産ナタネを原料（原料コスト 442 円/油 kg）として製油所等の大型の搾油機で搾油を行い、FAMEを製造した場合の生産コストを試算した。試算結果では 533 円/kg（485 円/L）であり、非常に割高なものとなる。

表 3-9 国産ナタネを原料としたFAME製造価格

(¥/油kg)			
ナタネ生産コスト	輸送費	搾油コスト	合計
442	3	15	460
ナタネ油輸送費	建設費	運転維持費	合計
2	26	45	73
BDF製造コスト		(¥/油kg)	533
		(¥/油L)	485

(出所) 政策小委員会資料「国内バイオマス資源活用によるBDF生産」に基づいて試算

(注) ①ナタネの搾油コストは国内製油メーカー（大量生産ベース）のコスト

生産能力（1.5KL/日）、建設費 0.9 億円、金利 2%、償却年数 10 年

②ナタネ油（FAME）の密度 0.91

参考までに、農水省情報統計部農業経営統計調査(H12) や、長野県農政部農村整備課 (H16) の資料に基づいて、搾油コストを試算すると 1kgあたり 164 円¹⁹となり、輸入価格(2007年1～7月、図 3-12) の 48.9 円に対して、少なくとも 3 倍以上のコストとなった。これを小型の搾油機で搾油しナタネ油までに仕上げると²⁰、ナタネ油の生産コストはトータルで 1kgあたり 1,292 円となる²¹。輸入品の 10～20 倍の価格である。

3-2-2 廃食油を原料とした場合の生産コスト

前述した京都市クリーンセンターの場合の生産コストを表 3-10 に示した。原料購入は、プラントの稼働率をあげるため、廃油回収業者から 1Lあたり約 30 円²²（家庭用 10%、業者購入 90%）で購入している。家庭からの回収はコストは 0 評価として、平均で約 26 円となっている。

廃食油による FAME 製造設備の建設コストは、7.5 億円（地盤改良に 3.2 億円、補助金が 2.7 億円）である。ユーティリティーコストのうち、電力については隣接するゴミ焼却場からの自家発供給によるものとして、コストは 0 評価となっている。副産物である粗グ

¹⁹ 作付面積 10a が基準。ナタネの販売価格は 84 円/kg で、生産コスト 164 円に対し補助金 83 円/kg が支出されている。

²⁰ 搾油コスト：「ナタネ循環システム検討会」（長野県農政部農村整備課（H16））

²¹ 地域特産品として販売されている価格は 1,200～2,400 円/kg となっている。

²² 廃食油回収業者は消費者に対して 3 円程度の費用を払っている。

リセリンは、コスト0ベースで、ゴミ焼却炉で焼却している。

以上に基づいて、年間約1,500KLベースで、BDF1Lあたりの生産コストは約102円という結果が報告されている²³。

表 3-10 廃食油を原料とした生産コスト

廃食油購入	メタノール触媒	電気(自家発)	蒸気、加熱費		
26	9	0	2		
品質検査	研究開発	その他	減価償却費	合計	
6	7	32	20	102	

(出所) 京都市クリーンセンター

(注) 建設コスト7.5億円(うち3.2億円は地盤改良)、補助金2.7億円)

3-3 パーム油を輸入した場合の供給コスト

3-3-1 前提条件

- (1) インドネシアからパーム油(CPOまたはRBD)の形で輸出する。
- (2) 日本へ輸入されたパーム油は、石油精製の製油所相当の大規模な設備でエステル化処理がなされ、軽油と混合されて出荷される。以降は、日本国内の石油流通システムに沿って消費者に供給されるものとする。
- (3) 試算時点は2004年と2007年11月とする。
- (4) 原料価格
 - ① 原油価格(FOB:ドバイ)は2004年:33.6\$/bbl、2007年:85\$/bbl
 - ② パーム油(FOB)は、2004年:450\$/トン、2007年:900\$/トン
- (5) 為替レートは115円/\$
- (6) エステル化プラント
 - ① 投資額(10万トン/年)²⁴は2004年:40億円、2007年:60億円とした。
 - ② 定額8年、金利(2004年:5%、2007年:7%)
 - ③ ユーティリティコストは、大豆を原料としたエステル化の場合の自家燃焼消費量(FAME1GJあたり70.2MJ、表4-8参照)を使用して、製油所受入原油価格でコスト評価を行った。
 - ④ メタノールは輸入価格とし、2004年:28円/L、2007年:57円/Lとした。投入量は油脂に対し15wt%、粗グリセリン評価は廃棄処分見あいで0評価とした。
- (7) フレートはケミカル船5,000トン級(日本~インドネシア)とし、2004年:35\$/トン、2007年:50\$/トンとした。

²³ 2007年7月にエネ研のヒヤリングした結果に基づく。

²⁴ 2004年の建設コストは、PEC調査報告書(2004年)に基づいて試算。

3-3-2 F A M Eの供給コスト(日本国内)

F A M Eの国内製油所(精油工場他)出荷価格は2004年時点の1Lあたり65.3円から、2007年11月時点では124.8円までほぼ2倍に高騰する。

表 3-11 F A M E供給価格

		2004	2007.11
生産コスト(工場出荷)	(\$/MT)	200	200
パーム油(fob)	(\$/MT)	450	900
フレート	(\$/MT)	35	50
保険	(\$/MT)	1.8	3.6
CIF価格	(\$/MT)	486	954
	(¥/KL)	50,907	99,794
製油所(精油工場)受入価格	(¥/KL)	50,912	99,804
受入費	(¥/KL)	500	500
精製費(化工費)	(¥/KL)	11,914	22,510
一般管理費	(¥/KL)	2,000	2,000
製油所(精油工場)出荷価格	(¥/KL)	65,327	124,814
	(¥/L)	65.3	124.8

(F A M E設備投資)

		2004	2007.11
(固定費)			
設備投資額(10万トン/年)	(百万円)	4,000	6,000
償却金利他	(百万円)	700	1,170
	(¥/L)	6.4	10.6
(変動費)			
メタノール、触媒費用	(¥/L)	3.8	7.8
ユーティリティ(電力、蒸気)	(¥/L)	1.7	4.1
小計	(¥/L)	5.5	11.9
合計	(¥/L)	11.9	22.5

3-4 F A M Eと軽油価格の比較(末端小売価格)

F A M Eの原料別の供給コストと軽油の供給コストを末端小売価格で比較整理したのが、表 3-12 である。2004年時点で、パーム油ベースのF A M E価格は1Lあたり120.6円(軽油引取税、消費税込み)に対して、軽油価格は89円と32.2円割高となる。原油価格、パーム油価格が高騰した2007年の現時点では、F A M Eは184.2円となる一方、軽油は132.5円で、格差は51.7円と拡大した。国産ナタネの場合は562.4円と高コストとなり、事実上、経済的合理性を有しない。

廃食油利用の場合は、2007年時点で159.2円となり、軽油に対し26.7円の割高にとどまるので、軽油引取税の免税等を行えば競争力のある水準となる。但し、量的な制約があり、大規模な全国展開ベースでの供給を前提にしたコスト(数値)とはならない。

表 3-12 F A M E と軽油価格の比較（末端小売価格）

		FAME価格				軽油価格	
		(パーム輸入)		(廃食油) ^{*5}	(国産ナタネ) ^{*6}	2004	2007.11
		2004	2007.11	2007.6	2004		
基準原油(ドバイ:fob)	(\$/bbl)	-	-			33.6	85.0
生産コスト(工場出荷 ^{*1})	(\$/MT)	200	200			-	-
パーム油(fob) ^{*2}	(\$/MT)	450	900			-	-
フレート	(\$/MT)	35	50			-	-
保険	(\$/MT)	1.8	3.6			-	-
CIF価格	(\$/MT)	486	954			35.4	87.9
	(¥/KL)	50,907	99,794			25,637	63,568
製油所(精油工場)受入価格	(¥/KL)	50,912	99,804	26,000	420,420	27,680	65,615
受入費	(¥/KL)	500	500	0	0	500	500
精製費(化工費) ^{*3}	(¥/KL)	11,914	22,510	44,000	64,610	4,500	7,500
一般管理費 ^{*4}	(¥/KL)	2,000	2,000	32,000	0	2,000	2,000
製油所(精油工場)出荷価格	(¥/KL)	65,327	124,814	102,000	485,030	34,680	75,615
	(¥/L)	65.3	124.8	102.0	485.0	34.7	75.6
転送費	(¥/L)	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0
輸槽所管理費	(¥/L)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
配送費	(¥/L)	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5
SSマージン	(¥/L)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
軽油引取税	(¥/L)	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1
小売価格(消費税抜き)	(¥/L)	116.4	176.9	153.1	537.1	85.8	127.7
小売価格(消費税込み)	(¥/L)	120.6	184.2	159.2	562.4	88.5	132.5
(軽油価格比)	(¥/L)	32.2	51.7	26.7	473.9	-	-

(注) 1、2：2007年11月現地調査、3：F A M E の製造費用、5、6：表 3-9、表 3-10

第4章 LCA評価と環境問題

第1節 LCA評価

1-1 FAMEのLCA評価

1-1-1 既存文献での比較

表 4-1、表 4-2 に、大豆（米国）、ナタネ（国産）、パーム（マレーシア）に関する LCA 評価の調査結果を比較した。投入エネルギー（GJ-fuel あたり）は、軽油の 94MJ に対し、230～620MJ 程度、ライフサイクル CO₂ 排出量（MJ-fuel あたり）は軽油の 80.7g-CO₂ に対し、20.6～40.6g-CO₂ となり、削減率は 50～75%となる。パーム油のライフサイクル CO₂ 排出量（MJ-fuel あたり）は 20.6～23.6 g-CO₂ である。

エタノールの LCA 評価と異なり、FAME の評価は原料ごとに大きく差があり、特にエステル化を中心とした燃料製造過程ではその差が著しい。これは第 3 章で述べたように、メタノールの消費量や、遊離脂肪酸や微量成分の除去（精製）に要するエネルギーの差に起因するものと考えられる。

表 4-1 BDFにおけるLCA比較（投入エネルギー）

原料	ナタネ(国産)		パーム油		大豆	軽油
	トヨタ・みずほ	燃料政策	トヨタ・みずほ	燃料政策	USDA	トヨタ・みずほ
原料生産	107.0	87.5	128.0	72.6	92.0	18.0
燃料製造(搾油)	223.0	363.9	68.0	134.5	101.0	
(エステル化)	280.0		76.0		163.0	
海外輸送(日本まで)			11.0	20.9	17.1	12.0
精製						59.0
国内輸送	6.0	9.8	6.0	3.8	6.0	5.0
合計	616.0	461.2	289.0	231.8	379.1	94.0

(MJ/GJ)

表 4-2 BDFにおけるLCA比較（CO₂排出量）

原料	ナタネ(国産)		パーム油		大豆	軽油
	トヨタ・みずほ	燃料政策	トヨタ・みずほ	燃料政策	USDA	トヨタ・みずほ
原料生産	13.9	12.0	14.4	11.7	5.3	1.5
燃料製造(搾油)	8.9	28.0	3.9	7.1	5.8	
(エステル化)	2.0		3.7		5.0	
海外輸送(日本まで)			0.8	1.5	1.2	0.9
精製						3.6
国内輸送	0.4	0.6	0.4	0.3	0.4	0.4
合計	25.2	40.6	23.2	20.6	17.7	6.4
直接燃焼	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.3
再計	25.2	40.6	23.2	20.6	17.7	80.7

(g-CO₂/MJ)

(出所)「輸送用燃料の Well to Wheel 評価」(トヨタ・みずほ、H16 年 11 月)、燃料政策小委員会[2003]、

「LCI of Bio-diesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus」(DOA & DOE)

(注) 原料輸送(パーム油): 東南アジア～日本の輸送距離(片道)を 5,000 km として算出。

(大豆): ロサンゼルス～日本の輸送距離(片道)を 4,849 マイル として算出。

1-1-2 残渣物を有効利用した場合のパーム油のLCA評価

(1) パーム油における残渣物

大豆やナタネ油と異なり、果房(FFB) (図4-1) からパーム油を絞りとった残渣物は、商品価値がなく、そのまま廃棄されている(地表に放置¹)。図4-2に示すように、空房 (EFB) や果実の繊維部分、殻、皮など (FFBに対して40%) は、蒸気として回収し発電するなど、ユーティリティへの効率的な利用 (将来的には、セルロース系エタノールの製造) を行えば、エネルギー効率は高められ、CO₂排出量がより少なくなると考えられる。

図4-1 搾油工場と工場に搬送される油椰子の果房

搾油工場に搬送される FFB



搾油工場 (クラッシャー)



図4-2 果房のマテリアルバランス (図2-6再掲載)

果房(FFB)								
100								
空房	果実							水分
23	67							
	内果皮		種子(Nut)			中果皮(粗製油)		
	13		11			43		
	繊維	水分	核	水分	殻	CPO	水分	固形分
11.5	2.5	4.5	1.5	5.5	21.5	17.5	2.5	

蒸気、電力

パーム核油

パーム油

残渣物の組成を表4-3に示したが、セルロースやリグニン成分が高い草木系バイオマスと異なり、油椰子(パーム)は比較的エタノール化しやすいヘミセルロースの比率が高い。

¹ マレーシアでは、パーム油を抽出した空房(EFB)の焼却は煙害が発生するとして禁止されている。果実中の繊維や殻の部分は、一部、蒸気などで回収して搾油工場のユーティリティとして利用されているが、EFBは殆ど利用されていない。

表 4-3 残渣物の組成

	空房 (EFB)	皮	葉	殻
組成 (wt% dry)				
灰分	5.0%	3.8%	2.9%	7.9%
二酸化ケイ素	1.1%	2.6%	0.6%	5.6%
抽出物	4.1%	4.9%	1.5%	4.8%
ヘミセルロース	47.8%	42.7%	52.5%	35.0%
リグニン	16.0%	22.2%	15.3%	22.6%
セルロース	26.0%	23.9%	27.1%	24.1%
元素分析 (wt% dry)				
炭素	45.1	47.8	43.6	50.7
水素	5.5	5.5	5.1	6.1
窒素	0.1	0.7	0.2	0.6
酸素	42.5	40.6	47.1	38.0
発熱量 (MJ/kg-dry)	18.5	19.9	18.2	20.5

(出所)産業技術総合研究所バイオマス研究センター

(2) 残渣物を回収して電力利用した場合の LCA 評価

残渣物からの利用可能エネルギー量²を試算した結果を表 4-4 に示した。FFB1kgあたりで 3.2MJ (パーム油 1kgあたりでは 15.2MJ) となる。パーム油 1kgあたりの発熱量は 40MJ なので、最大量で 38%の投入エネルギーの節約が可能となる。

表 4-4 残渣物の利用可能エネルギー

	FFB中の含有量	総熱量	利用済	利用可能熱量	パーム油 1kgあたり
空房	23%	1.4	0.0	1.4	
繊維	12%	1.3	0.3	1.8	15.2
殻	6%	0.9			
計	40%	3.5	0.3	3.2	

表 4-4 に記した利用可能エネルギーを電力に転換した場合の発電量と CO₂ 排出削減量を表 4-5 に示した。発電効率 20%で計算すると、パーム油 1 トンあたり 827kWh の発電が行え、CO₂ 排出削減量は 1 MJ-fuel あたり 7.86g 削減(パーム油のライフサイクル CO₂ 排出量の約 35%に相当)することができる。

表 4-5 の結果に基づいて、表 4-1、表 4-2 (パーム油) の LCA 評価を修正すると、表 4-6 の通りとなる。パーム油の CO₂ 排出量は MJ あたりの 20.6~23.2g (平均 21.9g) から、12.7~15.3g(平均 14g)へと減少することになる。

² 表 4-3 の各成分の発熱量から試算した熱量は 7.7MJ/kg(FFB)であるので、実際の利用効率は約 41%。

表 4-5 残渣物を利用して発電をした場合のCO₂削減量

	発電	CO ₂ 削減量※
	パーム油1トンあたりの 残渣発電量 (kWh/t)	CO ₂ 削減量 (g-CO ₂ /MJ)
空房	357	3.39
繊維 殻	471	4.47
計	827	7.86

(注)発電効率は20%、買電のCO₂排出原単位を0.38kg-CO₂/kWhとする

仮に、BDF（パーム油）を、2004年度の日本国内軽油販売数量3,820万KLに対して5%混合した場合のCO₂排出削減量を計算したものが表4-7である。残渣物未利用で約400万トン、残渣物を利用する場合で約450万トンの削減が可能となる。

表 4-6 残渣物を有効利用した場合のLCA評価

原料	投入エネルギー (MJ/GJ)			CO ₂ 排出量 (geq-CO ₂ /MJ)		
	パーム油		軽油	パーム油		軽油
	トヨタ-みずほ	燃料政策	トヨタ-みずほ	トヨタ-みずほ	燃料政策	トヨタ-みずほ
原料生産	128.0	72.6	18.0	14.4	11.7	1.5
燃料製造(搾油)	68.0	134.5		3.9	7.1	
(エステル化)	76.0			3.7		
海外輸送(日本まで)	11.0	20.9	12.0	0.8	1.5	0.9
精製			59.0			3.6
国内輸送	6.0	3.8	5.0	0.4	0.3	0.4
残渣利用(電力代替)*1	(74.4) 26%	(7.9) 32%		(7.9) 34%	(7.9) 38%	
合計	214.6	157.4	94.0	15.3	12.7	6.4
直接燃焼	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.3
再計	214.6	157.4	94.0	15.3	12.7	80.7

(注)パーセンテージは電力代替によるCO₂削減率

表 4-7 残渣物を有効利用した場合のCO₂排出量

	軽油	パーム油	
		残渣未利用	残渣利用
BDF(千KL)	1,910	1,910	
密度(15°C)	0.83	0.88	
発熱量(MJ/kg)	42.8	40.0	
CO ₂ 排出量			
(geq-CO ₂ /MJ)	80.7	21.9	14.0
(千トン-CO ₂)	5,476	1,472	941
(削減量)		▲ 4,004	▲ 4,535

(注)軽油販売数量約 3,820 万 KL に 5% の B D F を混合

1-1-3 廃食油の LCA 評価

(1) 製造過程における LCA 評価

廃食油には、様々な種類の油脂や、酸化(劣化)が進行している油が混合されているので、単一かつ使用前の純生油と比較して、メタノール投入量は多くなる。表 4-8 に示すように、米国のDOA/DOEの調査では、メタノールの投入量は、油脂(大豆油)1 トンあたり 89.5g(84.6MJ/GJ)が必要³とされる。それは、工程全体に投入されるエネルギーの半分を占めることがわかる。一方、京都市のクリーンセンターでは、廃食油(大豆油が70%)1 トンに対して、約2倍の190kg(165MJ/GJ)が投入されている。メタノール投入量が増加すると、メタノールの回収量が増加するので、電力、蒸気も増加する。表 4-9 に、代表的なプラントの電力、蒸気の使用実績を示した。

表 4-8 エステル交換プロセスにおける L C A 比較

		電力	蒸気	メタノール	その他	合計
大豆	投入エネルギー (MJ/GJ)	8.5	42.7	84.6	27.4	154.8
	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /MJ)	0.53	2.42	1.05	0.96	4.42
廃食油	投入エネルギー (MJ/GJ)	16.5	83.5	165.5	27.4	292.9
	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /MJ)	1.04	4.73	2.04	0.96	8.78

(出所)大豆：LCI of Bio-diesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus (DOA & DOE)

廃食油：京都市クリーンセンター(2007年7月ヒヤリング)

(注)クリーンセンターはゴミ焼却の自家発電供給を受けているので0であるが、ここでは平均的使用とした。メタノール投入量と電力、蒸気消費量の増加は必ずしも比例しないが比例するとした。

³ メタノールの分子量は32、油脂の平均分子量は約900、化学式上は油脂1モル、メタノール3モル(油脂に対して約10wt%)であるが、平衡反応なので未反応油脂を少なくするには、12~15%の投入が必要である。メタノール投入比が高くなると、FAME収率は遞減的に増加するので、メタノール量の残存比率は増加する。

表 4-9 エステル交換プロセスにおける電力、蒸気消費量の比較

	技術	ユーティリティ		合計
		蒸気	電力	
		(MJ/GJ)		
欧州系	Ballestra※1	11.7	3.1	14.8
	Florys	20.3	4.2	24.3
	Insitut Francais du Petrole※2	28.9	0.9	29.7
	De Smet	44.6	—	44.3
	Fina	60.4	—	60.1
米国	NREL Model Results	40.0	3.0	42.8
	Kansas City Plant	75.3	—	74.9

(出所)LCI of Bio-diesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus (DOA & DOE)

※1：ナタネ油、ひまわり油、※2：ナタネ油

(2) 廃食油の LCA 評価

廃食油の LCA 評価を表 4-10、表 4-11 に示した。FAME を製造するエステル交換では、不純物がどの程度除去されるか（純度、精製度をあげる）によって、投入エネルギー量は大きく変化し、LCA 評価が左右される。したがって、ローカルな「地産地消」とどまる限り、FAME の品質規格は厳格に考える必要がない。この場合は、CO₂ の排出量は比較的小さな値となる（トヨタみずほの試算の場合「1MJ あたり 2.9g」）。一方、京都市の例のように、比較的規模が大きく（1日 5KL を生産）、品質規格の維持に留意する場合は、投入エネルギーが多くなり、CO₂ は「1MJ あたり 10g」程度の排出量となる（場合によっては更に大きな値）。

表 4-10 廃食油利用における LCA 評価（投入エネルギー）

原料	(MJ/GJ)		
	廃食油(国内)		軽油
	トヨタみずほ	京都市	トヨタみずほ
原料生産	1.0	1.0	18.0
燃料製造(搾油)			
(エステル化)	55.0	292.9	
海外輸送(日本まで)			12.0
精製			59.0
国内輸送	6.0	5.0	5.0
合計	62.0	298.9	94.0

表 4-11 廃食油利用におけるLCA評価 (CO₂排出量)(g-CO₂/MJ)

原料	廃食油(国内)		軽油
	トヨタみずほ	京都市	トヨタみずほ
原料生産	0.1	0.1	1.5
燃料製造(搾油)			
(エステル化)	2.4	8.8	
海外輸送(日本まで)			0.9
精製			3.6
国内輸送	0.4	0.4	0.4
合計	2.9	9.3	6.4
直接燃焼	0.0	0.0	74.3
再計	2.9	9.3	80.7

(出所)京都市クリーンセンターへのヒヤリング及びエネ研推定

1-2 水素化精製とFAMEのLCA評価の比較

水素化精製とFAMEにおけるLCA評価の差異は、大まかに言えば、精製工程の自家燃消費量とエステル交換に要するエネルギー消費量の大小で決まる⁴。

水素化精製の工程とは、

- ①脱硫装置に投入するエネルギー (燃料燃焼による加熱、蒸気、電力の利用)、
- ②水素化精製に使用する水素の製造エネルギー

の2つに分かれる。水素化精製はマイルド⁵なものから、水素化分解に近いハードな反応条件まで存在するが、ペトロブラスの軽油脱硫技術(H-BIO)⁶と同等と仮定して、以下の条件下で、精製工程のエネルギー消費量を計算した。

(1) 脱硫条件⁷

原料 : パーム油 1 KL (比重 0.91、発熱量 40MJ/kg)

水素消費量 : 100Nm³/パーム油 1 KL

自家燃消費量 : ①脱硫装置分 18.5 L / KL (FOE 換算、10,000kcal/L)

②水素製造 11.0 L / KL (同上)

合計 29.5 L / KL (同上)

自家燃の原料 : LPG (46.2 MJ/kg、63.6 g-CO₂/MJ)

⁴ 現地でFAMEにして日本に運ぶか、パーム油をCPO(粗油)またはRBD(精製油)のまま日本まで運び、製油所等で水素化精製するかで、輸送などの工程が若干異なるが、ここではその差異は捨象する。

⁵ 油脂中の2重結合を一部飽和化して製造する食用油(「硬化油」)は、基本的な化学組成を変化させない。

⁶ 接触分解軽油、熱分解軽油および重質軽油(A重油留分)を脱硫する「軽油脱硫装置」と同程度。

⁷ 石油精製における平均的な装置(蒸気ボイラータービンによる発電及び蒸気抽出(中圧))によりユーティリティの供給を行うものとした。装置原単位は石油精製プロセスハンドブック等を参考に設定。

(2) 計算結果⁸

投入エネルギー 66.3 MJ/GJ、CO₂ 排出量 4.2 g-CO₂/MJ⁹

試算結果では、水素化精製の過程での CO₂ 排出量は 4.2 g-CO₂/MJ となったが、エステル交換過程での CO₂ 排出量 2.0~5.0g-CO₂ と比較して、顕著な差はないと言える。

表 4-12 に、パーム油起源の FAME と水素化精製油の LCA 評価の比較をおこなったが、参考として、ナタネ油起源（欧州）の FAME と Neste-OIL 社の NExBTL プロセスによる水素化精製油の LCA 評価の比較¹⁰ もあわせて記載した。

NExBTL と FAME の比較も同様な結果を示していると思われるが、2007 年末以降、水素化精製の商業プラントの稼動がはじまるので、詳細が次第に明らかになってくると思われる。

表 4-12 水素化精製油と FAME の LCA 評価比較

原料	(g-CO ₂ /MJ)				
	パーム油		ナタネ油 (EU 域内)		軽油
	FAME	水素化精製	FAME	水素化精製 (NExBTL)	トヨタ-みずほ
原料生産	14.4	14.4	31.0	31.0	1.5
燃料製造(搾油)	3.9	3.9			
(エステル化)	3.7		7.1~23.8		
海外輸送	1.2	1.2			0.9
精製		4.2		5.3~13.6	3.6
国内輸送	0.4	0.4			0.4
合計	23.5	24.1	38.1~54.8	36.3~44.6	6.4
直接燃焼	0.0	0.0	0.0	0.0	74.3
再計	23.5	24.1	38.1~54.8	36.3~44.6	80.7

(出所) ナタネ油は Neste-OIL、パーム油はトヨタ-みずほ

(注) パーム油の水素化精製の精製以外の工程は FAME と同じとした。

パーム油の FAME の各工程はトヨタ-みずほの数値

⁸ 水素化精製の得率を 94.3vol% として、水素化精製油、比重 0.73、発熱量 47MJ/kg の総熱量とパーム油の総熱量が等価になるようにした。

⁹ 水素消費量が 2 倍になると CO₂ 排出量は 7.2 g-CO₂/MJ まで増加する。

¹⁰ Neste-OIL 社の発表資料

第2節 環境問題

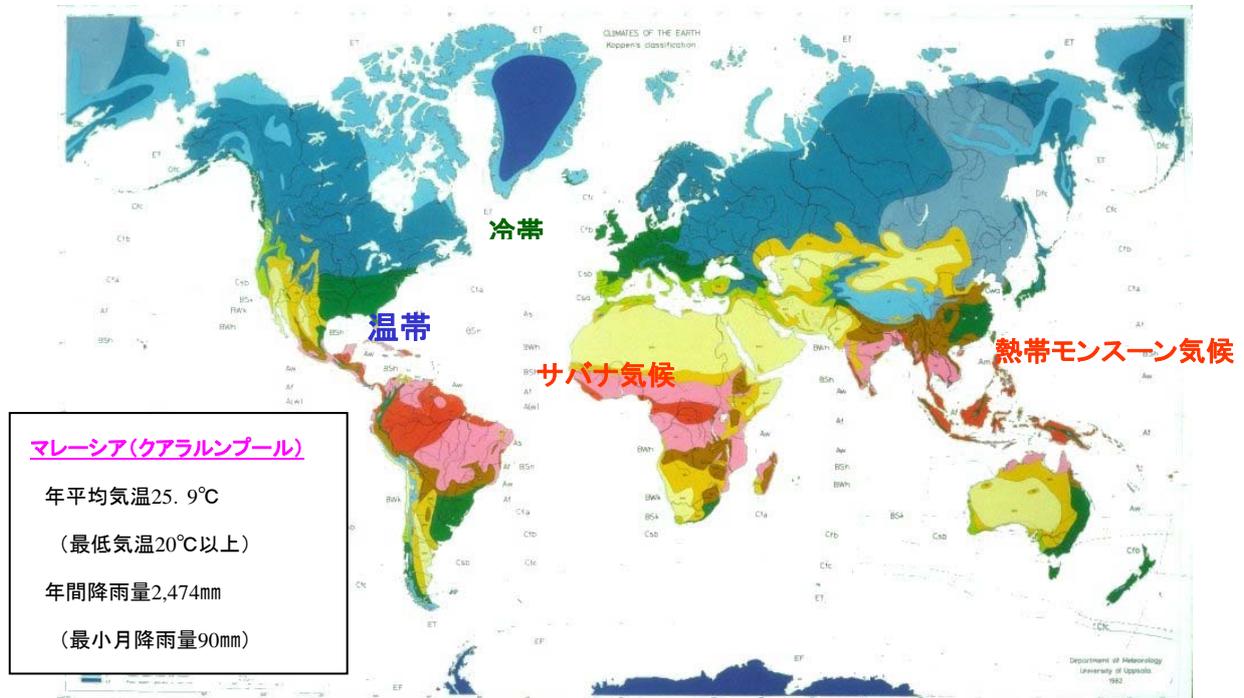
バイオマスの燃焼により排出するCO₂は「カーボンニュートラル」という定義がある。これは、大気中に存在するCO₂を吸収して光合成を行い蓄積した炭素を、再度燃焼して、大気に還元するという過程（=フロー）であるので、CO₂の量は変化しないというロジックである。しかし、新しく作付けを行い生育させた、追加的なバイオマス分に限り成立する論理なので注意を要する。例えば、既に存在するバイオマス(例えば、森林)を伐採して取り除き、新たなバイオマスを栽培する場合には、既にストックとして存在している炭素が大気中に放出されるので、CO₂は必ず増加して「0」ではない。砂漠や草原のような炭素固定量が少ないところでは、ここで述べたストック分の影響は比較的小さくて済むが、熱帯雨林での話となると無視できず、このストック分の評価を組み入れる¹¹べきである。

2-1 地球規模における炭素循環とバイオマスによる炭素固定量

2-1-1 地球上のバイオマスによる炭素固定量

図4-3に世界の気候区分図を示した。熱帯雨林気候は、ブラジルのアマゾン川流域、アフリカの赤道直下の地域、赤道直下の東南アジア地域（インドネシア、マレーシア、ニューギニア）の3地域に分かれる。

図4-3 世界の気候区分



(注) 熱帯雨林気候：月平均気温 18°C以上、最小月降雨量 60mm 以上

¹¹ LCAにおけるバウンダリー(評価範囲)を拡張する。

表4-13はAjtay, G.L.らが試算したものである。地球の表面積は約5億1,000万km²であり、このうち約30%の1億5,000万km²が陸地である。熱帯雨林はわずか2.9%の約1,500万km²(15億ヘクタール)にすぎないが、炭素量は2,440億トン¹²で、地球上のバイオマスに固定されている炭素の約43%が熱帯雨林に蓄積されている。1平方キロ中の炭素蓄積量は約1万6,500トンで、草原などの地域と比較して約16倍の密度で蓄積していることによる。

成長中のバイオマスは光合成で大気中のCO₂を取り入れる。一方で、呼吸を行ってCO₂を放出する。成長過程にあるバイオマスは、差し引きで、炭素を体内に蓄積していく。これを炭素の「1次純生産」と定義している。熱帯雨林の場合、生育20年～60年の頃が最も成長が早い、その後、次第に成長速度は落ちて(1次純生産量は減少)、やがて平衡に達して成熟した森林となる(炭素蓄積増加量=0)。

例えば、日本の軽油需要の5%にあたる、約190万KLを燃焼した場合のCO₂排出量は約550万トンである(炭素換算で約150万トン)(P57表4-7)。従って、成長の早い熱帯雨林で吸収するには、炭素の1次純生産量は、年間で926トン/km²であるので、約1,600km²(16万ヘクタール)の植林¹³を行えば、大気中の二酸化炭素は差し引き0になる勘定となる。

表 4-13 地球上のバイオマスによる炭素固定量

	面積		植物現存量				1次純生産量			
			乾燥重量		炭素量		乾燥重量		炭素量	
	(10 ⁶ km ²)	(構成比)	(10億トン)	(10億トン)	(構成比)	(千トン/km ²)	(10億トン/年)	(10億トン/年)	(構成比)	(トン/km ² ,年)
森林	31.3	6.1%	951	428	76.2%	13.7	48.7	21.9	25.9%	700
熱帯林	(14.8)	2.9%	(542)	(244)	43.4%	(16.5)	(30.5)	(13.7)	16.2%	(926)
温帯林	(6.0)	1.2%	(174)	(78)	13.9%	(13.1)	(8.4)	(3.8)	4.5%	(633)
亜寒帯林	(9.0)	1.8%	(205)	(92)	16.4%	(10.3)	(7.2)	(3.2)	3.8%	(356)
植林	(1.5)	0.3%	(30)	(14)	2.4%	(9.0)	(2.6)	(1.2)	1.4%	(800)
その他陸上生態系	117.6	23.1%	293	132	23.5%	1.1	84.3	38.0	44.9%	323
陸地計	148.9	29.2%	1,244	560	99.7%	3.8	133.0	59.9	70.8%	402
海洋計	361.1	70.8%	4	2	0.3%	0.0	55.0	24.8	29.2%	69
陸海合計	510.0	100.0%	1,248	562	100.0%	1.1	188.0	84.7	100.0%	166

(出典) Ajtay, G.L. et al (1979) "Terrestrial primary production and photo-mass"

2-1-2 地球規模の炭素循環

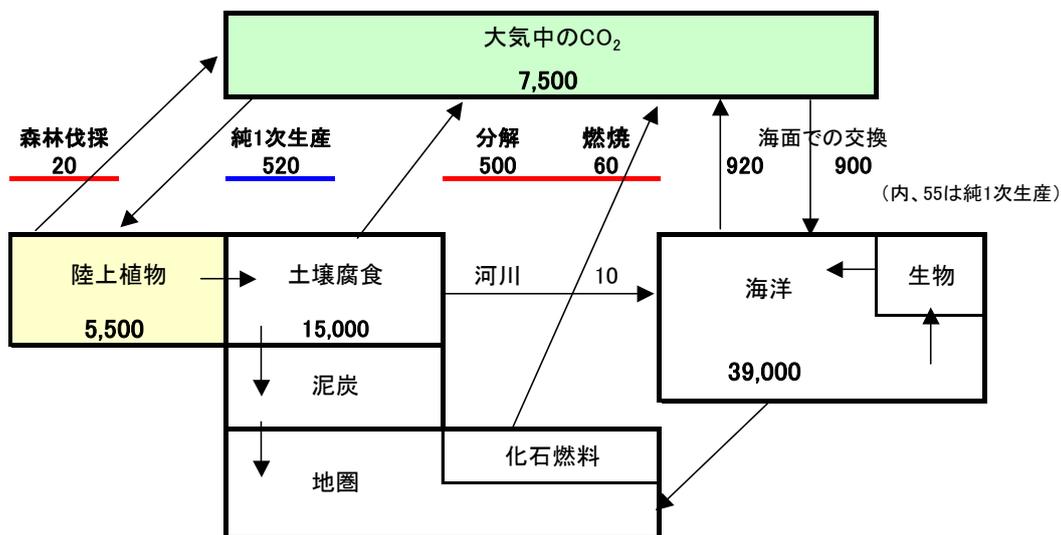
¹² バイオマスの炭素比を45%として計算。

¹³ 日本の陸地面積は約37万km²なので、約0.4%にあたる。軽油需要の全量を温帯林で植林すると、日本の陸地面積の約12.76%に相当する面積を必要とする。

地球規模での炭素循環がどのようになっているかについて、Houghton, J. T.(1990年)らが試算した数値に基づいて、図式化したのが図4-4である。

図4-4 地球規模における炭素循環

(単位:炭素億トン)



(出所) 吉良竜夫「森林の環境、森林と環境」(2001)

1次出所 : Houghton, J. T. et al (1990) "Climate Change-The IPCC Scientific Assessment"

全体のバランスを概略すると、大気中の二酸化炭素は、年間で約80億トン(炭素換算)増加する。詳細は以下の通り。

(1)人間の経済活動以外のもの

- ① バイオマスの成長により、年間約520億トン(炭素換算)の二酸化炭素を大気中から吸収する(1次純生産量)。
- ② バイオマスの死滅により、死滅した分は土壤中に腐食して堆積する。このうちの大部分が分解して、大気中に年間約500億トン(炭素換算)の二酸化炭素が放出される。
- ③ ①と②の差し引き、約20億トン(炭素換算)の二酸化炭素が大気中から吸収される。
- ④ 海洋から大気中へ二酸化炭素が約920億トン(炭素換算)放出される一方、大気中から海洋へ900億トン(炭素換算)の二酸化炭素が吸収¹⁴されるので、差し引き、約20億トン(炭素換算)の二酸化炭素が大気中に放出されることになる。
- ⑤ 以上、①~④を総括すると、差し引き0で、大気中の二酸化炭素は変化しない。

(2)人間の経済活動

¹⁴ 海洋は深度平均4,000m、大気と比較してCO₂の貯蔵能力は約50倍である。但し、大気に接している表面積は限られているため、大量かつ急速に吸収するのは困難である。大気と海洋の間で、新たな平衡に達するのは約1000年かかると言われている。

- ① 森林伐採等で約 20 億トン（炭素換算）の二酸化炭素が大気に放出される。
- ② 化石燃料の燃焼で約 60 億トン¹⁵（炭素換算）の二酸化炭素が放出される。
- ③ ①と②の合計で、大気中には毎年約 80 億トン（炭素換算）の二酸化炭素が放出されるが、大気中に存在する約 7,500 億トン（炭素換算）の二酸化炭素に加算され、濃度が上昇していくことになる。

仮に、1990 年の大気中の二酸化炭素濃度を 350ppm、蓄積量は約 7,500 億トン（炭素換算）、大気への放出量は 1990 年時点で 80 億トンとし、以降、年率 1%で増加すると仮定すれば、2050 年には、年間放出量は約 145 億トン(炭素換算)となり、大気濃度は約 640 ppm まで上昇することになる。

2-2 熱帯雨林伐採による炭素固定量の喪失と L C A 評価の再検討

2-2-1 熱帯雨林の伐採と炭素固定の喪失量

(1) 熱帯雨林の伐採と耕地化

図 4-5 に、熱帯雨林①、伐採後②、油椰子の栽培③の写真を示した。熱帯雨林には様々な木々があり、必ずしも木材に適した木ばかりでない。木材として大木が切り出された跡地には多数の草木が残り(②)、巷間言われるような「丸裸」状態にはならない。図 4-6 に示すとおり、再生力の高い熱帯地域では、放置しておけば数 10 年で元の状態を回復し始める(赤字の太線)¹⁶。しかし、油椰子農園をつくるには、残っている草木をすべて刈り取り(焼き払い)、油椰子の植え付けが必要である。このように耕地化(③)をしてしまうと¹⁷、元の熱帯雨林には二度と戻らなくなる(青字の太線)。熱帯雨林と油椰子によって固定される炭素量(蓄積量)¹⁸は、 $18.5\text{kg}/\text{m}^2$ であるが、耕地化により作付けされるバイオマスの炭素固定量ははるかに小さいので、その差は喪失分となる。

油椰子の成長、成熟過程を蓄積される炭素量で示したのが図 4-7 である。ナタネなどの 1 年作と異なり多年作であるので、果房には毎年、実がなり収穫ができる。植え付け後、成木になるまでに 4 年程度を要し、以降、成長して成熟していく。20 年をすぎると、果房(果実)の収穫率が低下しはじめ、凡そ 25 年程度で、油椰子の植え替えを行う。油椰子を伐採する手間を簡略化するために焼き払う場合が多い¹⁹。

¹⁵ 「World Energy Outlook 2006」では、2004 年の世界の CO₂ 排出量は 71 億トン/年(炭素換算)

¹⁶ 完全にもとの状態になるには 100 年近くかかる。

¹⁷ 牧草地として放牧してしまうと、耕地化と同様、熱帯雨林は永久に戻らなくなる。

¹⁸ NEDO「アセアン諸国における新エネルギー技術実証可能研究調査(1993 年)」

¹⁹ 失火となって制御できないような森林火災に発展する可能性がある(1997 年のスマトラ大火災)。最近では農薬(枯葉剤)により油椰子をたち枯れさせる方法がとられているとの報告もある(NGO)。

図 4-5 熱帯雨林の伐採と油椰子プランテーション



①熱帯雨林



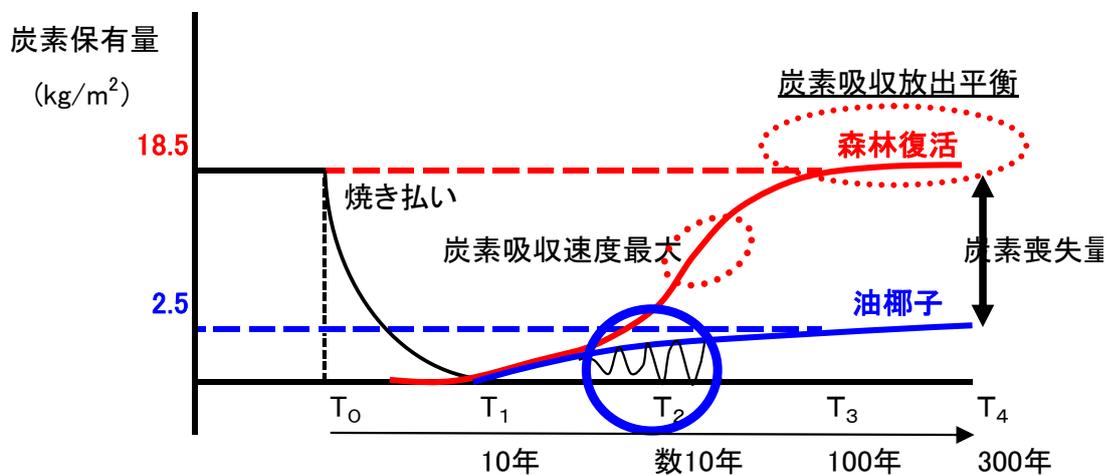
②伐採後



③油椰子のプランテーション

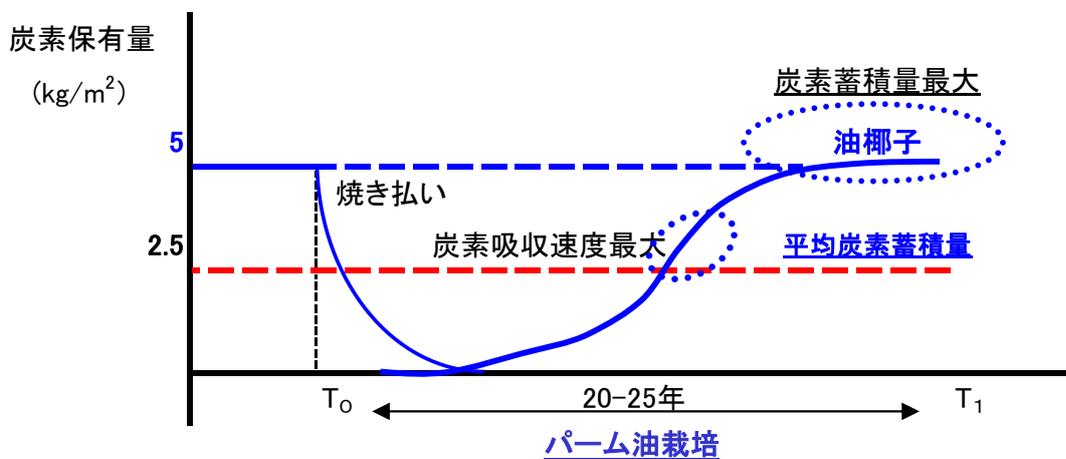
油椰子伐採時の炭素蓄積量は最大となり、 1m^2 あたり 5.0kg となるが、1サイクル全体で平均すると、 2.5kg の炭素蓄積があることになる。毎年収穫される果房（果実）をそのまま放置しておけば、朽ちて分解し、やがて大気に放出されることになる。また動物がその果実を摂取しエネルギーとして利用（呼吸）しても、最終的には大気中に放出されるわけであるから、同じであると言える。以上のことから、熱帯雨林と油椰子の炭素蓄積量の差は $16.0\text{kg}/\text{m}^2$ ということになる。

図4-6 熱帯雨林の再生と耕地化(油椰子)の過程



(出所) NEDO 「アセアン諸国における新エネルギー技術実証可能研究調査(1993年)」等に基づき作成

図4-7 油椰子の生長-成熟サイクル



(2) 熱帯雨林の伐採と耕地化

熱帯雨林を丸ごと焼き払えば、正味として 18.5kg/m^2 の炭素が二酸化炭素という形で放出されるが、実際には木材として切り出す部分も多いので、この値をストレートに使用して計算するのは過大評価となろう。実際には、住居用などに木材として利用され、少なくとも40~50年は保存される(炭素固定)場合もあれば、比較的の短期間で廃材として放棄され分解するのもある。例えば、50年という単位で考えた場合、住宅用に利用されている木材は炭素固定としてよいであろう。以上を整理すると、

①熱帯雨林の炭素蓄積量 * (1 - 木材利用率 (α))

②熱帯雨林の炭素蓄積量 * (木材利用率 (α)) * (50年未満の廃棄比率 (β))

となり、①+②が50年という単位で見た、正味の「熱帯雨林伐採による固定炭素量喪失」と定義できよう。 α 、 β の比率に関する統計的数値がないので、いささか乱暴な論議になるが、 $\alpha=70\%$ 、 $\beta=30\%$ とすれば、熱帯雨林の炭素蓄積量のうち、約50%の炭素が喪失することになり、その値は $9\text{kg}/\text{m}^2$ となる。油椰子の固定量を控除すれば $6.5\text{kg}/\text{m}^2$ となる。50年間で尺度として1年あたりに換算すると $0.13\text{kg}/\text{m}^2$ となる。

2-2-2 LCA評価の修正

(1) 熱帯雨林喪失によるCO₂排出のLCA評価

前節で用いた前提を用いて、熱帯雨林の炭素固定の喪失量を、1年あたりのパーム油熱量(MJ)あたりで評価し直したのが表4-14である。炭素喪失量は50年(油椰子の成長サイクル2回分)で割りかえして1年あたりとしている。熱帯雨林を丸ごと焼き払うケースと、木材などの有効利用したケースを示した。

表 4-14 熱帯雨林喪失によるCO₂排出量の評価

	熱帯雨林を焼き払う	熱帯雨林から伐採した木材の有効利用
1. 熱帯雨林の炭素蓄積量(kg-C/m ²)	18.5	18.5
(木材利用率)	0%	70%
(木材の50年未満の廃棄率)	0%	30%
未利用の炭素蓄積量	18.5	9.4
2. 油椰子の炭素蓄積量(kg-C/m ²)	2.5	2.5
3. 熱帯雨林の炭素固定量喪失分	16.0	6.9
(1年当たりの喪失分(50年))	0.32	0.14
パーム油MJ当たりの炭素喪失量(g-C/MJ)	21.6	9.4
(g-CO ₂ /MJ)	79.3	34.4

(注) 利用率等については前節参照

(2) LCA評価の修正

表4-2に示したパーム油のLCA評価(トヨタ-みずほ)を、表4-14に基づいて修正を行ったものが表4-15である。熱帯雨林を焼き払った場合は、軽油利用よりも多くなる。これは50年では回収できないということを示している。一方、熱帯雨林中、木材として利用できるものは利用するという立場にたてば、従来ケースの $23.5\text{g}/\text{MJ}$ に対し $57.9\text{g}/\text{MJ}$ となり、CO₂排出量は軽油に対して約30%の減少する。日本の軽油需要量の5%として計算すれば、従来ケース($23.5\text{g}/\text{MJ}$)のCO₂削減量約390万トンから約230万トン減少するものの、約160万トンの削減効果が残る。

計算の前提が荒いので、より詳細な検討が必要であるが、パーム油をBDFに利用する場合でも、熱帯雨林の伐採やその有効利用に十分な注意を払い、燃料製造過程でのエネルギー効率を高めることができれば、LCA評価としてポジティブな結果が出ることを示している。次節で述べるが、何が「再生可能なパーム油生産（環境にやさしい）」かという議論をすることが肝要である。

表 4-15 熱帯雨林喪失を考慮したBDF（パーム油）のLCA評価

(g-CO₂/MJ)

原料	通常ケース	熱帯雨林の排出分を計上		軽油
		熱帯雨林を焼き払う場合	木材等を有効利用する場合	
熱帯雨林喪失		79.3	34.4	
原料生産	14.4	14.4	14.4	1.5
燃料製造(搾油)	3.9	3.9	3.9	
(エステル化)	3.7	3.7	3.7	
海外輸送(日本まで)	1.2	1.2	1.2	0.9
精製				3.6
国内輸送	0.4	0.4	0.4	0.4
合計	23.5	102.8	57.9	6.4
直接燃焼	0.0	0.0	0.0	74.3
再計	23.5	102.8	57.9	80.7
(増減)	-57.2	22.1	-22.8	-

2-3 生態系への影響について

2-3-1 森林破壊の影響について

2004年、インドネシアの林業大臣が報告したところでは、熱帯雨林の喪失は、累積で4,900万ha（世界の熱帯雨林の3.3%）に及ぶ。喪失理由としては、①材木を目的とした森林伐採によるもの（不法伐採を含む）、②耕地化によるもの、③森林火災、④焼畑農業などがあげられる。1997年から1998年に発生したスマトラ島の森林火災では約81万haの熱帯雨林が焼失した²⁰とされているが、この火災では750万人の人々の健康に被害を及ぼし、その被害は隣国のシンガポール、マレーシアにまで及ぶ国際問題となった²¹。この問題を契機に、NGOが環境問題として、パーム油を取り上げるようになった。

熱帯雨林の消滅は、二酸化炭素の問題ばかりでなく様々な問題を惹起すると考えられる。

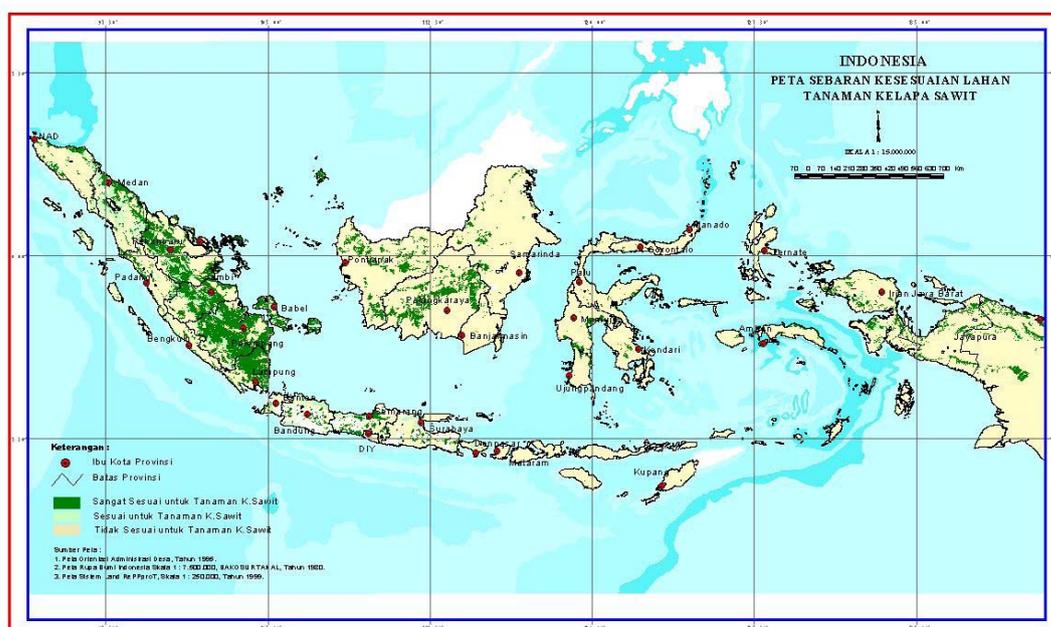
²⁰ ドイツ技術協力公社（GTZ）によれば、1997年のスマトラ島、2005年のカリマンタン島の森林火災で合計333万haの森林が焼失した。

²¹ 国際林業研究センター（CIFRO 2001）らによる、衛星写真を使用した調査では、多くの森林火災がパーム油企業の位置と一致している。

熱帯地域の降雨量の 70%は、熱帯雨林を經由して蒸発されている²²。熱帯雨林の伐採により、森林が保有する水が河川へ放流されて洪水の多発の原因にもなる。さらに、科学的に定量化できているわけではないが、森林からの水の蒸発潜熱の減少は、太陽からの輻射熱による温度上昇の緩和を少なくすると考えられ、地域の気温上昇をもたらすとも言われている。

その他、熱帯雨林には、哺乳類、鳥類、爬虫類、昆虫類など様々な動物が生息しているが、パーム油栽培に転換されると、少なくとも 80%以上はいなくなると言われる。一見、地表には青々とした油椰子が生い茂っているように思われるが、生息する生物の多様性は著しく減少しており、生態学的な影響はやはり無視できないであろう²³。

図 4-8 インドネシアにおけるパーム油栽培地域 (図 2-19 再掲)



2-3-2 持続可能なパーム油生産(R S P O)

(1) 経緯

1997 年のスマトラ島の森林火災を契機として、パーム油に対する世界的な批判が高まってきた。しかしながら、生産国であるマレーシアやインドネシアにとっては、パーム油産業は上流から下流に至るまで、様々な事業の展開がなされており、多くの雇用機会を生み出す戦略的な輸出産業として存在している。その意味では、典型的な「途上国の経済成長」と「世界的な環境問題」という軋轢が存在することも事実である。

²² 吉良竜夫「森林の環境、森林と環境」(2001)

²³ Webster, R., Rimmer, "Greasy Palm Oil, The Environment and Big Business"

こうした状況の中で、WWF（世界野生動物基金）は、「持続可能なパーム油生産のための円卓会議」（RSPO）を設立して、経済成長と環境問題の調和を目指す枠組み作り（RSPO8原則、下記に示す）をはじめた。現在、14社のプランテーション企業²⁴が、自主的に、RSPO8原則の実施を表明して、その実践活動（2007～2008年）を実施中である。

今後、パーム油を燃料として利用する場合にも、こうしたRSPO原則に適合した活動が必要とされるであろう。

RSPOの開催及び参加者

- ① 第1回：2003年8月（クアラルンプール）
16カ国200人（生産者、加工業者、消費者、商社²⁵、小売業者、金融機関、NGO）
- ② 第2回：2004年10月（ジャカルタ）
基本原則の作成(作業部会の設置)
- ③ 第3回：2005年11月（シンガポール）
基本原則の承認

RSPOの原則

- 原則1：透明性へのコミットメント
- 原則2：適用法令と規則の遵守
- 原則3：長期的な経済的、財政的実行可能性へのコミットメント
- 原則4：生産者および加工業者（搾油、精製）によるベストプラクティスの利用
- 原則5：環境に関する責任と自然資源及び生物多様性の保全
- 原則6：生産者や工場によって影響を受ける従業員及び個人やコミュニティに関する責任ある配慮
- 原則7：新規プランテーションの責任ある開発
- 原則8：主要な活動分野における継続的な改善へのコミットメント

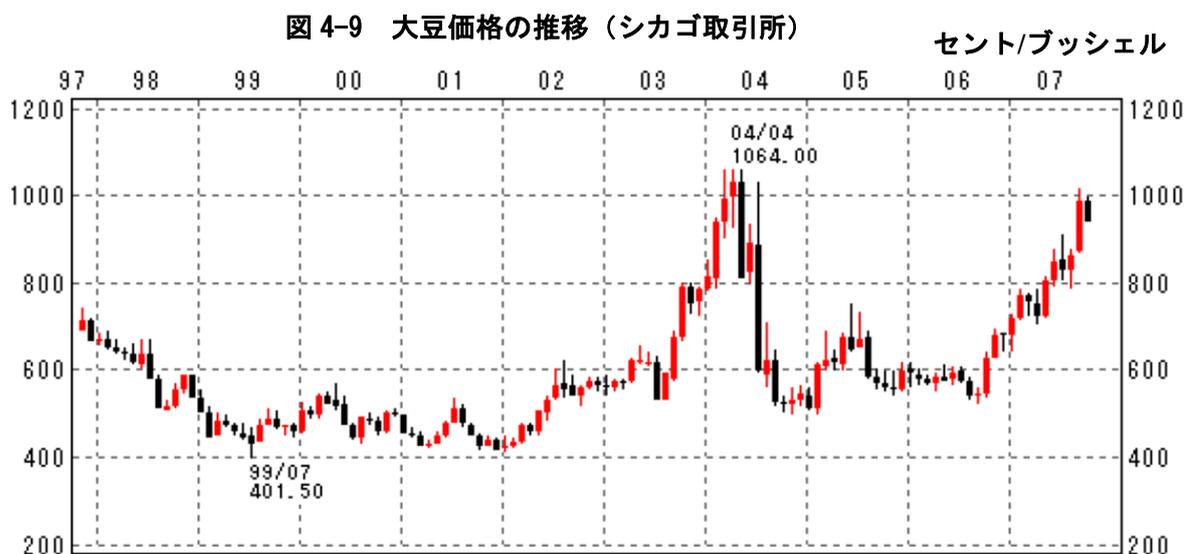
²⁴ マレーシア7社、インドネシア3社、ブラジル1社、コロンビア1社、ベルギー1社、パプアニューギニア1社

²⁵ 不二製油、三菱商事などの日本企業が参加。フィンランドのNeste Oil社も参加。

第3節 バイオ燃料と食糧の競合

3-1 最近の食糧価格の高騰について

バイオ燃料のうちエタノールは2005年時点で、米国が1,620万KL、ブラジルが1,610万KLの生産を行っており、両国で全世界の約70%を占める。将来的な輸出ポテンシャルはブラジルにあり、米国は国内自給型を進めることになろうが、今後の原油や食糧価格の世界的な動向は、米国国内のエタノールなどの需給や価格動向により大きく左右されることになろう。2006年から2007年にかけて、米国内では、エタノール増産を見込んでトウモロコシの価格が高騰した。農家がエタノールの増産を念頭に、トウモロコシの増産に動いたからであるが、大豆などの他作物からの転作も拡大して、大豆の作付け面積は減少、生産量も減少したからである。この結果、大豆価格や大豆油価格が急騰²⁶、他の植物油や飼料（肥料）へ価格高騰が波及していくこととなった。当然のことであるが、もう一つのバイオ燃料であるBDFにも大きな影響を与える結果となった。



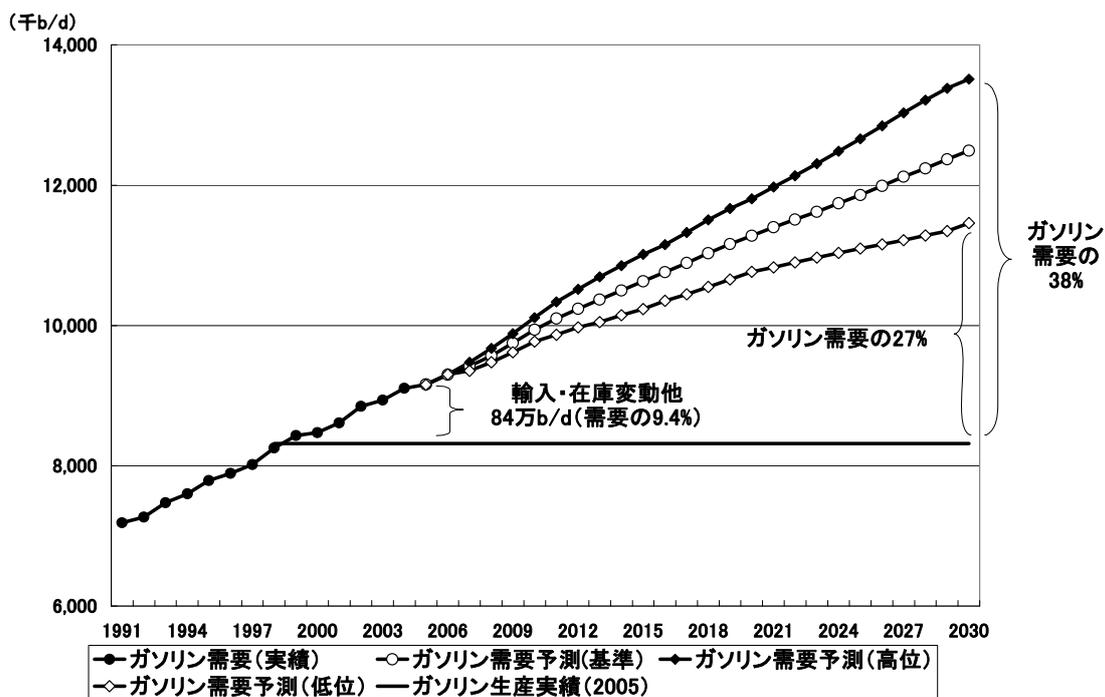
3-2 米国の石油製品の需給ギャップとバイオ燃料

3-1で述べた、短期的な変動とは別に、長期的に見た場合、米国におけるバイオ燃料（エタノール）の拡大政策の背景には、米国における石油製品の需給アンバランス、とりわけガソリンの製品、半製品（基材を含む）の輸入依存の低減を図りたいという、安全保障上の問題が存在している。図4-10に示すとおり、2005年のガソリン需要は約920万B/Dであるのに対し、生産量は約830万B/Dで、この需給ギャップを、ガソリンの製品、半製品の輸入（約90万B/D）で補填している構造がある。輸入量は、内需の約10%を占めてお

²⁶ 大豆油はなたね油、ヒマワリ油、パーム油など植物油価格の基準となっており、植物油全般の価格変動をもたらす。

り、エタノール換算で約7,500万KL以上にも達する。DOEの見通しでは、ガソリン需要は、今後、年率1~2%の伸びを示すとしており、既存製油所の能力拡張が継続しているものの、この需給ギャップは拡大している。

図 4-10 米国のガソリン需給の推移



(出所) 米 EIA, "Annual Energy Outlook 2006", ホームページ (石油製品需給データ)

国内資源 100%であるバイオマス燃料 (エタノール) の導入により、このギャップを低減し海外依存度の縮小を図るとことは、安全保障上の政策として重要なものと言える。

今後、エタノールの導入が拡大するにつれ、需要に対する供給の遅れ (食糧系国内生産の制約とセルロース系バイオマス由来のエタノール生産の遅れ) が生じる可能性は高い。そのギャップは海外から、特に高い供給力を持つブラジルからの輸入で賄い、米国国内の価格変動を安定化することが望ましいと思われる。しかし、実際には国内の農業生産者保護の観点から、高い輸入関税と補助金が課されており、海外からのアクセスは難しいのが現状である。従って、米国内でのエタノールを取り巻く需給環境や価格動向が、そのまま全世界的な食糧価格の変動をもたらす可能性は、今後も続くと考えねばならないであろう。

第5章 まとめと今後の検討課題

第1節 まとめ

1-1 油糧種子及び油脂の生産動向

1-1-1 世界の油脂生産量

- ① 2006年における世界の油脂生産量は約1億5,000万トンで、動物油脂が約10%、植物油脂が90%を占める。
- ② 植物油脂の生産量は約1億3,500万トン、4大油脂と呼ばれる、大豆油、ナタネ油、ひまわり油、パーム油の生産量は合計で約1億トン（70%）である。

1-1-2 油糧種子の生産

(1)大豆（種子）の生産量と輸出量

- ① 米国は約8,300万トンを生産しており世界最大である。そのうち約3,500万トンが輸出されている。
- ② ブラジル、アルゼンチン両国で約9,800万トンが生産し、約3,700万トンを輸出している。
- ③ 輸出先は、中国が約2,800万トン、欧州が約1,300万トンで、今後中国の輸入量はさらに増加する見通しである。

(2)ナタネの生産量と輸出量

- ① EU約1,600万トン、中国約1,300万トン、インド約700万トン、カナダ約1,000万トンの生産量となっているが、カナダを除いて自国(域内)消費である。
- ② カナダの輸出量は約600万トンで、このうち約200万トンが、食用油原料として、日本に輸出されている。

(3)パーム油の生産量と輸出量

- ① マレーシア、インドネシアは、両国で約3,200万トンと、世界の約3,700万トンの大半を生産している。
- ② 約2,600万トンが輸出されており、中国の輸入量は約500万トンで、今後も拡大する見通しである。

1-2 各国におけるBDFの導入状況

BDF（バイオディーゼル燃料）の導入量は、2006年で約540万トン（約600万KL）で、そのうち約70%の約390万トンがEU域内で導入されている。

(1) ドイツの場合

- ① 2004年から実施した税制優遇策（鉱油税の全額控除）が大きなインセンティブとなって導入は急速に進み、2005年には2%（バイオ燃料合計）の目標値を超える3.75%を達成した。

- ② 将来の税収不足が見込まれることから、2006年8月以降は、混合比率を直接規制(段階的)する方針に転換し、税額の控除も2012年を目途に段階的に削減することとした。

(2) EUの2020年の目標値

- ① バイオ燃料の導入比率は、各国の取り組みに濃淡があることから、2010年の目標値5.75%の達成は困難となった。
- ② 2007年、EUは新たに2020年の目標値10%を設定した。バイオ燃料のうち、バイオエタノールが約1,650万トン、バイオディーゼル燃料(BDF)は約1,920万トンを見込んでいる。
- ③ BDF1,920万トンについては、ナタネを原料としたBDFが約880万トン、輸入が約510万トン、および次世代の技術であるBTLを約530万トン見込んでいる。

(3) 米国の場合

バス、トラック、船舶への導入について取り組みがなされているが、バイオマス燃料としてはエタノールに的が絞られている。

(4) 中国やインドの場合

- ① 大豆やナタネの大生産国であるが、国内消費が大きく不足分を輸入している。
- ② 従って、食糧と競合する形でのBDFの導入は行わない。
- ③ インドでは、農村地域の所得向上、薪や灯油の燃料代替の観点から、非食糧系のジャトロファの栽培を進めている。

1-3 日本へのBDFの供給ポテンシャル

(1) 国産原料によるBDFの供給ポテンシャル

- ① 遊休地を利用したナタネ 約33万トン(約36万KL)
- ② 家庭用から回収した廃食油 約18万トン(約20万KL)
- ③ 合計で約51万トン(約56万KL)

(2) BDFの原料確保

- ① 2004年における日本の軽油販売量は約3,820万KLであるので、軽油に対する5%混合(B5)を考えた場合、BDFは約190万KL(約174万トン)必要となる。
- ② 従って、少なくとも約135万KLは海外からの輸入が必要となるが、大豆は中国との競合、ナタネはカナダなど海外の供給先が限られていること、また国内油脂業界との競合が発生することが考えられ、最も現実的な選択が、パーム油の輸入ということになる。

(3) マレーシアの輸出ポテンシャル

- ① 現在の作付面積は約400万haを超えており、耕地面積の拡大余地はボルネオ島にしか残されていない。

- ② 従って、パーム油の輸出ポテンシャルは、当面（2010年～2020年）は約100万～150万KLと確保される可能性はあるが、2020年以降の量的確保は難しい。
- (4) インドネシアの輸出ポテンシャル
 - ① スマトラ島、カリマンタン島（ボルネオ島）、イリアンジャ（ニューギニア島）など、耕地面積の拡大余地は大きく、少なくとも、現在の約2倍にあたる800万ha程度までは拡大すると考えられる。
 - ② 従って、当面（2010年～2020年）の輸出ポテンシャルは250万～450万トンが見込まれ、それ以降も十分な量の確保が可能という試算結果が得られた。
 - ③ 但し、今後の不確定要素としては、
 - a. 国内石油製品需要(特に軽油)代替の拡大
 - b. 熱帯雨林伐採に関する内外の反対運動の高揚
 - c. パーム油の国際価格高騰に拠るBDF投資への意欲減退などが考えられ、パーム油の輸出ポテンシャルが大幅に低下するリスクがある。
 - ④ ジャトロファの栽培により、パーム油と同程度の規模の生産を見込む計画が立案されているが、パーム油と比較して収率がかなり低いことや、パーム油以上に労働集約的作業で大量生産に向かないことから、生産は小規模にとどまる。

1-4 BDFの品質規格及び供給コスト

1-4-1 品質規格

- (1) 品質を規定するもの
 - 商業生産されているバイオ燃料の大半は、FAME（脂肪酸メチルエステル）と呼ばれるBDFであり、その品質は、原料（C16、C18を中心とした脂肪酸）の化学組成に起因するものと、製造過程で発生する不純物により生じるものに分かれる。
- (2) 4大油脂の品質
 - 不飽和結合を持つ脂肪酸の比率が高い大豆油やひまわり油と、飽和脂肪酸の比率が高いパーム油、そして、その中間の性質を持つナタネ油に分かれる。
- (3) 酸化安定性と低温流動性
 - ① 不飽和結合の多い(ヨウ素価が高い)大豆油やヒマワリ油は、酸化安定性が悪く、過酸化物によるスラッジや高分子化合物の生成が起りやすく、燃料噴射ポンプ系に不具合が生じやすい。
 - ② 一方、飽和結合の多いパーム油では流動点が高く、寒冷地や冬場の使用では、燃料フィルターの詰まりなど生じやすい。
 - ③ 酸化安定剤や流動点降下剤の添加は、一定の品質改善に効果があるが、それには限界があり、パーム油起源のBDFの流動性の改善には殆ど効果がない。
- (4) 水素化精製
 - ① FAMEは原料の基本構造が維持されるので、品質上の改善には一定の制約があ

るが、高温高压下で水素を添加して処理すると、原料中の2重結合の水素化、脱炭酸、脱水、分解などが生じて、炭化水素を中心とした高品質の軽油留分となる。

- ② 従って、今後、小規模な地産地消の場合を除いて、大規模な全国展開を行う際の品質維持には、水素化精製が適していると考えられる。

1-4-2 供給コスト

(1) 国産原料

国産ナタネを原料とした場合（BDF製造工場出荷段階）は約490円/L、廃食油を原料とした場合は約102円/Lとなる。

(2) インドネシアからパーム油輸入

パーム油の輸出価格（FOB）を900\$/トンで試算した場合、BDFの製造工場出荷段階での価格は約131円/Lとなる。

(3) 軽油との比較(小売段階)

原油85\$/バレルで試算した場合、軽油の小売末端価格は133円/L（軽油引取税、消費税込み）となるが、BDFは、いずれの場合も割高で採算には乗らない。

- ① 国産BDF：約562円/L
- ② 廃食油BDF：約159円/L
- ③ パーム油輸入：約184円/L

1-5 LCA 評価と環境問題

1-5-1 LCA 評価

(1) LCA 評価

- ① ライフサイクルCO₂排出量は軽油MJ-fuelあたり80.7gに対して、パーム油起源のBDF利用では20.6~23.2gとなり約70%~75%削減が可能となる。
- ② パーム油の残渣物（空房を含む）を利用して発電した場合は、LCA評価上のCO₂排出量は約30%減少して12.7~15.3gとなる。
- ③ B5を前提とすれば、残渣未利用の場合で、年間約400万トン、利用した場合で年間約450万トンのCO₂排出量削減が可能となる。

(2) 水素化精製のLCA評価

分解軽油の水素化脱硫を前提とした場合では、LCA評価上のCO₂排出量はMJ-fuelあたり24.1gとなり、FAMEのLCA評価23.5gと大差がない結果となる。

1-5-2 熱帯雨林の伐採とLCAの再評価

(1) 熱帯雨林と生態系

- ① 熱帯雨林の地球上に占める割合はわずか3%にすぎないが、炭素の固定量は約2,440億トンで、全体の43%を占めている。

- ② 熱帯雨林の伐採は固定炭素量の喪失にとどまらず、森林に生息する動植物の減少、保有水分の喪失による洪水の多発など、生態系への様々な影響が懸念される。
- (2) 熱帯雨林の伐採による炭素の喪失量
 - ① 全てを焼き払い、油椰子（パーム）の作付を行った場合、失われる炭素量は1 m²あたり 16kg（二酸化炭素 59kg）となる。
 - ② 50年間で回収する場合には、熱帯雨林伐採による、1年あたり、パーム油 1MJあたりのCO₂排出量は79.3gとなり、これを織り込むとLCA評価では102.8gとなり、軽油の82.2gを上回ることになる。
- (3) 持続可能なパーム油生産とその利用
 - ① 現実には、熱帯雨林を焼き払うのではなく、木材の伐採など可能な限りその炭素源を住宅など固定した形で利用を行うことから、仮に熱帯雨林に蓄積する炭素の50%しか放出されないとすれば、二酸化炭素の排出量は57.9gとなり、軽油の排出量を大きく下回る。
 - ② いずれにしても、熱帯雨林の伐採と耕地化にともなう様々な問題点については、科学的かつ客観的な検討が必要で、短兵急な判断は回避しなければならない。
 - ③ 1997年～1998年のスマトラ島で発生した森林火災を契機として、生産者、消費者、政府関係者、及びNGO関係者など、様々な利害関係者が一堂に集まり、RSPO（持続可能なパーム油生産のための会議）が設立された。この会議で、環境に配慮したパーム油生産のための8原則が制定され、その指針は活動の際のコンセンサスとなりつつある。
 - ④ 以上のことから、パーム油生産を燃料に利用する場合も、こうし動きと歩調を合わせる必要がある。既にフィンランドのネステオイル社はRSPOに参加している。

第2節 結論と今後の課題

以上のことから、BDF導入に関するポイントを下記の通り整理した。BDFを取り巻く状況は流動的で厳しいのが現状である。また、今後、詳細かつ慎重に検討する必要がある課題も多い。

BDF（FAME）導入について

- (1) 供給可能性
 - B5相当の供給量確保はインドネシアと中心として可能であるがリスクもある。
- (2) コスト
 - ① 軽油に比較してコストは割高で、商業ベースとしては採算に乗らない。
 - ② 原油価格が高騰しているが、それ以上にパーム油価格が高騰している。
- (3) 品質

- ① FAMEによるBDF製造は、原料が多様なため高品質を統一的に維持するのは難しい。
 - ② 大規模な全国展開では水素化精製などが好ましいが商業段階ではない。
- (4) 環境問題
- ① 熱帯雨林の固定する炭素の放出量を考慮に入れたLCA評価が必要である。
 - ② その他、熱帯雨林伐採による生態系への影響も考慮する必要がある。
 - ③ RSPOの8原則に則った活動が必要となる。

地産地消をベースとしたローカルな取り組みを除き、全国展開を想定したBDF導入は、当面、困難を伴うと考えられると結論できる。寧ろ、将来を展望するならば、食糧と競合しない木材系バイオマスによるガス化、FT合成(BTL)などの技術開発に、積極的に取り組む必要性が高まってきていると考えられる。

以上

お問い合わせ：report@tky.ieej.or.jp