

財団法人 油脂工業会館

第43回表彰

油脂産業優秀論文

優 秀 賞

生物多様性に貢献する油脂産業

未利用バイオマスのカスケード利用による
食糧油脂及びマテリアル変換産業の創出

花王株式会社

くまもと よしあき
熊本 吉晃

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| はじめに | 1 |
| 第1章 生物多様性に関わる油脂産業の現状 | 1 |
| 第2章 食糧と競合しない生物資源からの「油脂生産」研究の動向 | |
| 2-1 非食用植物からの油脂生産 | 2 |
| 2-2 藻類バイオマスからの油脂生産 | 3 |
| 第3章 未利用バイオマスの活用の現状 | |
| 3-1 パームオイル廃材の利用動向 | 4 |
| 3-2 日本における草本・木質系バイオマス廃材の利用動向 | 4 |
| 第4章 未利用バイオマスの「マテリアル変換」についての提案 | |
| 4-1 ヘミセルロースから「食糧油脂」への変換への可能性 | 5 |
| 4-2 パームオイル廃材から「食糧油脂」への変換 | 6 |
| 4-3 セルロースから「マテリアル」への変換 | 7 |
| 第5章 未利用バイオマスカスケード構想とグローバル展開 | |
| 5-1 最初の事業化に向けて | 8 |
| 5-2 油脂の生産量と栽培面積の削減効果 | 10 |
| おわりに | 11 |
| 参考文献 | 12 |

はじめに

21世紀は「環境の世紀」と呼ばれ、早10年が過ぎ去った。この10年で地球環境は果たして好転しているのか。残念ながら、その答えはNOといわざるを得ない。気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書によれば、地球温暖化、エネルギー資源の枯渇問題は深刻さを増し、急増している食糧ベースのバイオ燃料は穀物価格の高騰を引き起こすと共に途上国に食糧不足の危機を招いた。同時に穀物生産拡大のための森林伐採や砂漠化が進行し、これらは地球温暖化の原因とされる二酸化炭素の増加を引き起こし、生物多様性の損失に多大な影響を及ぼしている。

このように環境破壊に歯止めが効かない今こそ、我々人類の繁栄を支えてきた油脂産業界が先頭に立ち、地球からの最大の恵みである植物を原料として利用し、自然環境との共生を目指した新産業システムの構築を急ぐべきである。

本論文は、このような観点から、未利用のセルロースやヘミセルロースを主成分とするセルロース系バイオマス（パーム廃材や稲わら等）を多段的に食糧油脂及びマテリアルに有効変換する「カスケード利用法」によって新しい産業創出を提案したものである。ここでのカスケード利用法とは、最初に未利用のセルロース系バイオマスからヘミセルロースを酵素あるいはそれを産生する微生物で糖化して、さらに酵母で油脂変換する。次に残ったセルロースをエネルギー以外の付加価値の高いマテリアルに変換するというものである。なお、本システムは他分野異業界との連携が必須で、その中心には油脂産業界の存在があってこそ成り立つものである。

そこで最初に生物多様性と油脂産業の関わりについて考察したい。

第1章 生物多様性に関わる油脂産業の現状

世界の人口は2050年には90億人を突破すると予測されている。米国農務省の報告によれば、世界の2011～2012年度の穀物生産量は対前年度3.5%増の22億6,500万トンと予測され¹⁾、過去20年間に中国の豚肉消費は倍増し、鶏肉需要は4倍に拡大すると推測されている。さらに、経済活動の進展に伴い、エネルギー需要は増加の一途を辿り、化石燃料の増産が今後見込めない中で食糧資源からのバイオ燃料製造が急増している。特に、米国のエタノール向けトウモロコシの消費は10年前の7倍に拡大しており、今後の食糧生産に影響

響を及ぼすことが懸念されている。

このペースで穀物収穫面積の拡大が進行し、無作為な森林の伐採による耕作や放牧を繰り返すと、地球温暖化や砂漠化はさらに進行していく。環境白書によると、生物多様性の損失として2000年から2050年までに陸上の生物多様性の11%が失われ、さらに、2020年から2050年にかけて生じる自然地域の損失は750万Km²（オーストラリア大陸の面積に匹敵）にのぼると予測されている²⁾。

パーム油の2大生産国であるインドネシアとマレーシアでは、需要に伴う増産のため、インドネシアではパーム農園の7割は熱帯雨林を伐採して作られ、マレーシアでは1985年から2000年までの森林減少の約87%がパーム農園の開発によるものといわれている。その結果、野生生物の生息地の減少はもとより、生息地を奪われたオランウータン等の野生動物が絶滅の危機に陥り、さらには搾油工程で発生する廃液による水質汚染も深刻な問題となっている³⁾。

今後、人口増加による食糧（油脂）及び油脂工業品の増加、そして、エネルギー需要によるバイオ燃料や燃料用薪材の増加は、土地資源の劣化に繋がり、生物多様性が失われていくことは間違いない。油脂産業界としては、生物多様性の損失を引き起こす要因となる新たな耕作面積の増加や、食糧と競合する油脂生産植物の利用促進は断じて避けなければならない。すでに油脂産業界では、食糧と競合しない生物資源からの油脂生産の研究が加速度的に進められている。次章ではその研究動向について概観する。

第2章 食糧と競合しない生物資源からの「油脂生産」研究の動向

2-1 非食用植物からの油脂生産

バイオマス資源由来のBDF（バイオ・ディーゼル・フューエル）やバイオエタノール等のバイオ燃料が燃焼された際に発生する二酸化炭素は、植物の光合成によりその細胞内に固定化される。そのため、地球全体としての二酸化炭素量は長い目でみると変わらないというカーボンニュートラルの考え方に基づき、二酸化炭素排出量はゼロとみなされている。特に、米国では第1世代バイオ燃料として、食用植物（トウモロコシ等）由来のエタノール、第2世代として、非食用植物（トウモロコシの茎等）からのエタノール製造の研究が進められている。一方、欧州ではディーゼル車のシェアが高いため、菜種等からのBDF生産が拡大している。

現在、次世代バイオ燃料として有望視されているのは、有毒物質を含むため食用に適さないヤトロファ（和名：ナンヨウアブラギリ）という植物である。搾油量は大豆の約5倍、菜種の約3倍といわれ、重量比で約30%が搾油可能である。また、この植物は、痩せた土地でも栽培できるメリットから、熱帯雨林の伐採や食用植物の耕作面積の減少に繋がらないとされている⁴⁾。これら非食用植物は新たな耕作地の確保という観点からは、食糧と競合する可能性も将来的には否定できず、生物多様性の損失にも繋がる恐れがある。適切なプランテーション経営を行わなければ、同じ過ちを繰り返しかねない。

2-2 藻類バイオマスからの油脂生産

藻類は光合成能力の高さからバイオ燃料源として世界的規模で精力的に研究されている。藻類はその大きさによって微細藻類と大型藻類に分けられる。微細藻類はそのサイズが約数 μm であり、藻体乾燥重量当たり25~75%の油分を含有する。筑波大の渡邊信教授らの研究グループは、緑藻類「ボトリオコッカス」を用いた研究を行っており、今年に入ってから従来種と比べ、10倍以上の生産能力を有する藻類を発見したと報告した⁵⁾。

また、大型藻類に関しては、2011年4月には産学協力のもと事業化を目指すべく東工大の柏木孝夫教授をリーダーとする「海洋環境創生機構」が設立された。この機構では、海洋人工島や海洋いかだによる海洋工場での実現を目指しており、海藻からバイオ燃料やケミカルスへ変換する研究を行っている⁶⁾。

このように、国内においても藻類からの油脂生産研究が本格化してきたが、コスト面での課題が一番大きい。今後、ブレークスルーする革新的技術の出現の有無が本事業化の成功の鍵を握る。

そこで筆者は、未利用バイオマスからの油脂生産といった新たな視点で、拡大する食糧油脂確保を実現すると同時に、生物多様性の損失の一つの原因とされる森林伐採を抑制できないか考察してみた。

はじめに、油脂生産国や日本における未利用バイオマスの現状を整理する。

第3章 未利用バイオマスの活用の現状

3-1 パームオイル廃材の利用動向

世界の植物油生産量は、約1億3,800万トン(2008年)であり、そのうちパーム油は4,448万トンと約1/3を占める。生産量は2004年から2008年の5年間で約32%増加し、今後も途上国の経済発展に伴い増加すると予測されている。主な生産国は、インドネシア(2,025万トン)とマレーシア(1,776万トン)で、全体の85%を占めている。

そのパームオイル樹は樹幹、茎葉、果房部分から成り、高さは5~6m、高いものでは12mに達し、その果房部分からパーム油を搾油している(図1)。パームオイル樹から効率的にオイルを得ることができるサイクルは約25年といわれており、全栽培面積の約3%のパームオイル樹が毎年伐採され、新しいパームオイル樹に更新されている。その伐採された樹幹は水分を多く含んでいるため板材としての利用価値は低く、そのほとんどは農園内で放棄または焼却され環境汚染の引き金になっている。

また、パーム油を生産する過程で排出されるパーム油残渣である空果房(EFB: Empty Fruit Bunch)に着目すると、そのほとんどは利用されていない。パーム油1トンの生産で、EFBは1.07トン排出されることから、両国合わせると年間1,900万トンのEFBが廃棄されていることになる⁷⁾。EFBは後述の草本・木質系バイオマスと同じく、主成分はセルロースである。EFBの利用動向をまとめてみると、発電ボイラーとして利用する計画が多いことがわかる(図2)。未利用バイオマスの利用としては、燃焼して発電するか、または分解してバイオ燃料として用いるかに絞られてきているのが現状である。

3-2 日本における草本・木質系バイオマス廃材の利用動向

一方、日本においては農作物非食用部としての草本系(稲わら、もみ殻等)の年間発生量は約1,400万トンであり、約70%は利用されていない。また、林地残材も約800万トンであり、そのほとんどが利用されていないのが現状である(図3)。これらバイオマスの主成分はセルロースで分解するとグルコースとなり、さらに発酵によりエタノールが得られるため、現在、世界各国で第2世代としてのバイオ燃料への変換研究が盛んに進められている。

しかしながら、20世紀と同じように人類が欲望と繁栄のみを追求し、再生可能という建前だけでバイオマス資源をエネルギーとして利用ばかりしていくと、生物多様性の損失に繋がることは想像に難くない。

そこで筆者は、バイオマスによるエネルギー利用はあくまで最終的利用として最低限の役割を果たすものとし、可能な限り炭素ストック期間を考慮した、より高付加価値な「マテリアル」に変換をすべきだと考える。そのためにはバイオマス利用と経済性の両立が基本となるが、技術革新によってこれらをブレークスルーしていくことが、油脂産業界の使命ではないだろうか。次章では、これら未利用バイオマスの、エネルギーとは異なる「マテリアル」に変換する新たな提案を行いたい。

第4章 未利用バイオマスの「マテリアル変換」についての提案

4-1 ヘミセルロースから「食糧油脂」への変換への可能性

一般に草木や木材は、幅が数ナノのセルロースナノファイバー（50%）とヘミセルロース（20~30%）、リグニン（30~20%）の3成分から構成されている（図4）。セルロースはグルコース（ブドウ糖）が連結した直鎖状多糖類であり、約数十本が束となって結晶化し、ナノファイバーを形成している⁸⁾。そして、その結晶質のセルロースが非晶質のヘミセルロースやリグニンにより、さらに強固に固められているのが草木や木材の正体である。ところが、この強固な複合構造が、バイオマス有効利用のネックとなっている。以下で詳しく説明したい。

まず、バイオマスを油脂に変換するためには、一般には上述のセルロースを酵素によりグルコース（単糖）単位にまでバラバラに（糖化）する必要がある（図5）。しかしながら、セルロース自体の強固な分子構造に加え、そのもの同士の強い水素結合のため酵素がうまく働かず、糖化には多量の酵素が必要とされ技術的課題となっている。

他方、近年、上記の課題に対して極めて興味深い報告があった。酒類総合研究所の正木らは2010年、乾燥菌体当たり50%以上の油脂を蓄積する *Lipomyce* 属酵母を見出した。さらにこの酵母を用いればヘミセルロースの成分であるキシロースから油脂への変換率は15%以上であり、その主成分は食用に利用されるオレイン酸であることを報告している（表1）⁹⁾。

また同年、E. J. Steen らは、大腸菌に種々の改変を行った結果、ヘミセルロー

スを分解して取り込み、これを原料として油脂を直接生産できる大腸菌を作り出すことに成功したと発表した¹⁰⁾。このような微生物による油脂生産に関する研究が近年報告されており、日本のバイオテクノロジーのさらなる進歩により、ヘミセルロースからの油脂生産の実現も夢ではない。

そこで、筆者はこの3成分（セルロース、ヘミセルロース、リグニン）からなる強固な複合材料から、比較的抽出しやすいと考えられるヘミセルロースを酵素で糖化した後、前述の酵母で処理することで「油脂」を製造する方法、加えて、残渣として残ったセルロースはあえて分解してエネルギーに変換せずに種々の「マテリアル」へと変換する方法を提案したい。これによりバイオマスを余すことなく多段的（滝型）に有効利用できることから、「カスケード利用法」と呼ぶこととする（図6）。

4-2 パームオイル廃材から「食糧油脂」への変換

まず具体例として、油脂生産国で多量に廃棄される前述のパームオイル廃材から食糧油脂への変換の可能性について考察した。

以前から、パームオイル樹の樹幹中にデンプンが含まれているのは知られていたが、近年になってその詳細が明らかにされた。2009年の村井ら、または2010年の田中らの報告によれば、その樹幹には、驚くべきことに多量のグルコースが含まれていることが判明している。そこで村井らは樹幹を熱水抽出したところ、樹幹の絶乾重量の37%のグルコースが抽出されること¹¹⁾、田中らの報告でも、圧搾して得られた樹液中には最大10%のグルコースが含まれていることが明らかとなっている¹²⁾。村井らの試算をベースに、マレーシアとインドネシアで毎年廃棄されている樹幹の全量から抽出されるグルコース量を算出すると、約222万トンとなる（図7）。

そこで、筆者はさらに前述の酵母による油脂変換が可能な単糖（グルコースやキシロース等）の抽出量を向上させる方法として、伐採後の樹幹に酵素を産生する糸状菌等の植え付けを行い、中に含まれているヘミセルロース等を分解させて単糖への糖化を促進する方法の開発を提案したい。パームオイル樹幹の含水率は約70%と高く（木材は約50%）、加えて菌の活動に最適な気候（20～30℃）であるため、酵素分解による単糖の抽出量の増大が期待できる。それによって理論的には約3倍の抽出量が可能と見積もられ、約666万トンの単糖を抽出することが可能となる（図8）。

油脂生産酵母を利用して、全ての単糖から油脂を生産すると仮定した場合、変換率15%として最大約100万トンの油脂生産が可能となる。この生産量は、パーム油の栽培面積として約22万haに相当し、全パーム油栽培面積の約3%を占める。なんと、毎年廃棄されるパーム油栽培面積分（約25万ha）から得られると仮定される油脂とほぼ同じ量が、複雑な糖化プロセスを必要とせず、「樹幹に菌の植え付けを行い、一定期間放置して単糖に分解するのを待ち、その後樹幹を絞り、その絞り汁を微生物によって食糧油脂に変換する」といったシンプルなプロセスで得られるのである。

4-3 セルロースから「マテリアル」への変換

しかし、現実的には分解されにくいセルロースとリグニンが残ることになる。そこでセルロースからリグニンを分離することに関しては、既存の製紙産業の技術が活用できる。製紙産業では、木材チップから蒸解という方法で、リグニンとヘミセルロースを分解・可溶化させ、その分解液（黒液）を発電用の燃料として利用する技術を既に確立している¹³⁾。したがって製紙産業との連携により、セルロースのみをパルプとして取り出すことは容易である。本項ではセルロースのマテリアルへの変換として、1) 紙パルプ製品、2) セルロースナノファイバーを用いた機能材料、3) セルロース樹脂について考察する。

まず、紙製品については、経済発展している中国をはじめとするBRICsにおけるパルプとしての需要は年々増加の傾向を示している。例えば、マレーシアにおける紙・板紙の年間消費量は約290万トンであり、その7割は輸入に頼っている¹²⁾。したがって、パームオイル廃材の樹幹やEFBから得られるセルロースから紙を製造することで、完全自給が可能となる。

また、2つ目のセルロースナノファイバーは、現在、世界的に注目されている新ナノ素材である（図9）。その理由として、先述の通り、剛直なセルロース分子の数十本が束となり結晶化されたものであるため、鋼鉄の1/5の軽さで5倍の高強度、ガラスの1/10の低熱線膨張係数、高耐熱性といった特徴を有する¹⁴⁾。現在、日本においては、東大の磯貝教授らや京大の矢野教授らの研究グループがNEDOのプロジェクトで高いガスバリア性を有するオールバイオマスの包装材料やディスプレイ用透明基盤等の機能性材料への応用研究を進めている。またSTFI-Packfrosk（スウェーデンの紙パルプ研究機関）では、ハイドロゲルの調製に成功したという報告もある¹⁵⁾。セルロースは生分解性素材であるので、生分解

の保水剤や土壌改良剤等としての展開が見込まれる。

そして、3つ目のセルロース樹脂の可能性について述べたい。今年に入って、バイオマス由来樹脂としてのバイオポリエチレンやポリ乳酸樹脂がいよいよ商業段階に入ってきた。バイオポリエチレンに関しては、ブラジルのブラスケンが20万トン、米国のダウケミカルが2015年には35万トンの量産に入ると発表した。樹脂のグローバル市場としては2億5,000万トンであるため¹⁶⁾、バイオマス由来樹脂としてのシェアはまだ低い、今後増加していくことは間違いない。これらのバイオマス由来樹脂は、バイオエタノールと同様に食用植物資源から得られているため、さらに穀物価格の高騰や食糧問題は深刻化してくるであろう。

そこで、グルコースからの樹脂への変換ではなく、セルロースの誘導体化による新規のセルロース樹脂の開発を行う必要がある。既報で堤氏が論じているように、既存の代表的なセルロース誘導体としては、セルロースの水酸基をアセチル化した酢酸セルロースがある¹⁷⁾。さらに近年では、セルロースの水酸基に嵩高のエステル側鎖を導入することで、熱可塑性のセルロース繊維の開発に成功した事例もある¹⁸⁾。

油脂産業界はこれまで種々の素材の誘導体化により、実に様々なマテリアルやケミカルを世に送り出してきた。筆者は、この油脂産業界保有の誘導体化技術と樹脂・繊維産業界が保有する技術との融合により、セルロースから直接的かつ効率的、そして低環境負荷の熱可塑性セルロース樹脂を製造することが必ず達成できると考える。

第5章 未利用バイオマスカスケード構想とグローバル展開

5-1 最初の事業化に向けて

バイオマス活用推進基本計画が2010年12月に閣議決定された。2020年までの目標として、バイオマスを活用する約5,000億円規模の新産業を創出すること、炭素量換算で約2,600万トンのバイオマスを活用することとある¹⁹⁾。

そこで、本システムを事業化するための最初の施策について提案したい。この構想を世の中で広く普及させるためには、低コスト化が必須となる。廃棄物の有効利用でコストアップの要因となるのは回収コストであるので、まず各工場を1

箇所に集約させる必要がある。そして、回収された廃材からはじめにヘミセルロースを糖化し、酵母による油脂変換を行う。ここで排出された残渣は一産業のみの場合では処理に膨大なコストがかかるので、本システムでは、その残渣は製紙産業が適正価格で引き取り、有用なセルロース原料として精製し、製紙用パルプ製品に導く。製紙産業は、回収コストの低減と、ヘミセルロースといった製紙産業から見れば不純物がない原料からセルロースが得られるため、高品質のセルロースを低コストで得られるメリットがある。そして、樹脂・繊維産業はこの高品質・低コストのセルロース原料からセルロース樹脂やセルロース繊維を製造することが可能となる。さらには油脂産業も技術開発を行うことでナノファイバー等の高付加価値品生産に参画することも可能となる。これが、筆者が提案する『未利用バイオマスカスケード構想』の全容である（図10）。

そして最初の事業化は東日本大震災の復興ビジョンのひとつである東北エコタウン構想の中に組み入れて、最初のモデルケースとして示すことを提案する（図11）。東北地方沿岸部には、大手の製紙工場のインフラが完備されていることと、セルロース系バイオマスの代表である稲わらが約360万トンと豊富に存在しており、回収コストの低減が図れる。

実際に稲わらを10万トン／年回収したと仮定し、コスト試算を行った。油脂への変換率を15%とすると、約4,500トン／年の油脂ができる。稲わらの回収コストを10円／kg、設備投資額として、ヘミセルロースの抽出及び油脂への変換設備を15億円、人件費1,000万／年、10人とすると固定費は70円／kgとなる。従って、油脂販売価格を100円／kgとした場合、変動費コスト（酵母等）としては、20円／kg以下が技術目標となる（図12）。

油脂産業としては、酵母株の選抜や酵母の培養プロセスの最適化等により、油脂への変換率を現状の2倍以上（30%以上）に向上させ、固定費を半分以下に減らし、かつ変動費を極力低減させることが最大の課題となる。また、本カスケード構想は、セルロースの販売等により、製紙産業等からの収益が見込まれるが、そこで得た利益は油脂製造における価格転換または本カスケード構想が事業として軌道に乗るまでの運用資金として有効に利用する。

現在、国内のバイオ燃料技術革新計画において、セルロースからバイオエタノールを酵素発酵により、40円／Lで作るプロジェクトが進められており、また、筑波大の渡邊教授が進めている藻類からの燃料油脂への製造コストも80円／Lといった試算結果も出ている。したがって、通常価格である100円／kgという酵母を利用した油脂製造コストも非現実的な数字ではないと筆者は考える。

将来的に東北地方沿岸部全体の稲わら全部（約360万トン）を変換したと仮定すると、約18万トンの油脂と130万トンのセルロース原料の生産が可能であり、事業規模は図11中の試算で示したように2,000億円と見積もることができる。この数字はバイオマス活用推進基本計画で掲げられた目標の4割に相当する。また、炭酸ガス削減効果としては、386万トンと試算され、京都議定書で定められた目標削減量の約5%に値する。本システムの構築により、油脂産業界としては油脂事業のみならず新しい市場領域（セルロース樹脂、セルロース繊維等）への事業展開も可能となる。

具体的なアクションプランとしては、まず、油脂産業界が中心となって製紙、樹脂・繊維産業に働きかけ、3産業によるコンソーシアムを設立する。そして、国に産学官連携の国家プロジェクト（5年間、総予算20億円程度）として、「稲わらを用いた未利用バイオマスカスケード利用モデル実証事業」を認めてもらい、基礎研究期間（2013～2015年）の後、実証プラント建設候補地を決定し、実用化研究を開始する（2016～2018年の3年間）。そして、2019年から2020年にかけての2年間で、3産業で投資を行って世界初のプラントを建設した後、東北地方の経済発展に貢献する。この事業は、未利用バイオマスを活用したオープンイノベーションの国内第1号となる。

その後、プロジェクトで培った技術をベースにアジア展開を行う。マレーシア、インドネシアには本論文で詳述した通り、豊富なパームオイル廃材が眠り、中国には日本の100倍以上の稲わら、麦わら（1.37億トン）が廃棄されている。自然環境との共生を目指した新産業システムの実現化が待たれている（図13）。

5-2 油脂の生産量と栽培面積の削減効果

それでは、グローバルに展開することでどの程度の効果が期待できるのだろうか。

2001年から2008年までの7年間で、パーム油の生産量は175%増加しており²⁰⁾、このペースで今後も需要が増加すると仮定すると年間約270万トンの増産（栽培面積として60万ha）が必要となる。そこで、マレーシアとインドネシアにおけるEFB、樹幹、茎葉を対象とし、それらの廃材からヘミセルロースを抽出し、酵母によって得られる油脂変換量を試算してみた（図14）。

全廃材量は約1億1,600万トン（乾燥重量）であり、その中でヘミセルロースは約33%を占めるため、収率90%として、約3,400万トンのヘミセルロースが抽出される。そして、ヘミセルロースから油脂への変換率15%を乗じ

ると520万トンの油脂が得られることになり、その量は今後のパーム油の需要予測の約2倍の油脂量に相当することが判る。

さらに栽培面積としては114万ha分（全パーム油栽培面積の14%）が新たな森林伐採を必要とせず確保されることになるため、パームプランテーションの拡大も大きく阻止することができる。

また、セルロースからのマテリアル変換に関しては、約3,600万トンのセルロースが得られることになる。この量は、マレーシアにおける紙パルプ国内需要の約1.2倍の量であり、完全自給を可能とし、パームオイル産業にもう一つの大きな産業が生まれることを意味する。

このように、未利用バイオマスをカスケード利用することにより、新たな栽培面積を必要とせず、生物多様性の保全を維持しながら、増大する食糧油脂の確保及びマテリアルとしての需要を満たすことが可能となる。

おわりに

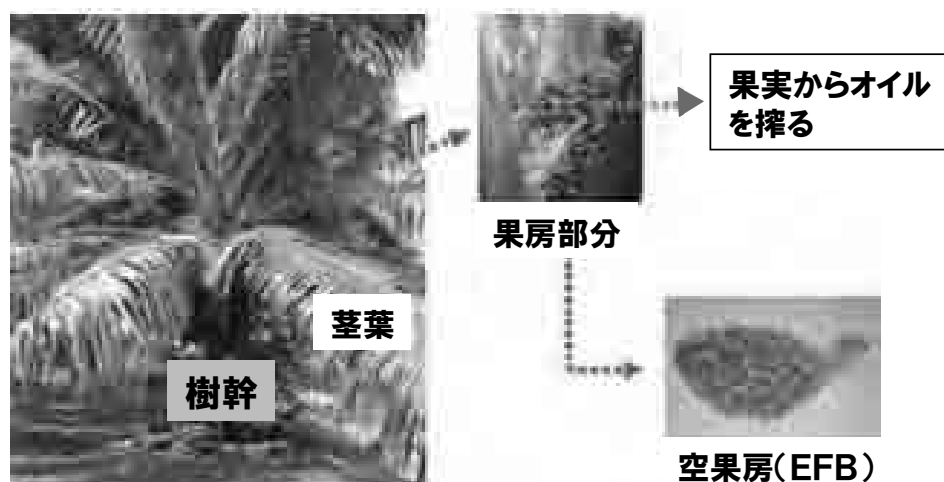
古来より人類はバイオマスを燃やして豊かな生活を得て、化石燃料の出現から近代文明を構築してきた。そして今、再びバイオマスへと舵を切り始めた。我々、油脂産業界に託された課題は、いかにしてこの自然界からの最大の恵みであるバイオマスを効率的に高付加価値な原料へと変換し、自然との共存を図りながら豊かな社会を構築していくかである。本論文は、そうした観点からパームオイル廃材に着目して、その有効利用について最新の技術をピックアップし、エネルギー以外のより付加価値の高い製品への応用について考察を行った。

その結果、最新技術の融合によって、本来捨てられるはずの廃材から驚くべき量の食糧油脂や紙パルプ製品等のマテリアルに変換することが可能であることが判った。ただし、バイオマス利用と経済性を両立させるためには一産業だけでは困難なので、他産業との連携による高度なカスケード利用が必須であると結論した。本論文をきっかけに、油脂産業界が立ち上がり、他の産業界と共に、このプロジェクトが発足され、被災地復興に貢献することを切に願いたい。さらに本提案のグローバル展開が、生物多様性の保全に繋がり、緑の地球を永続的に守ることになると強く確信している。

参 考 文 献

- 1) 米国農務省穀物等需給報告（2011年6月9日発表）
- 2) 環境白書、循環型社会白書、生物多様性白書（平成22年度版）
- 3) 生物多様性読本（日経エコロジー編、2011年）
- 4) <http://www.biomassjapan.jp/bio27.html>
- 5) 日本経済新聞（2010年12月15日、12版）
- 6) 日経産業新聞（2011年6月29日、9版）
- 7) http://www.asiabiomass.jp/topics/1001_03/html
- 8) 高部圭司 繊維組織構造のセルロース、(セルロースの事典、セルロース学会編者、2000年)
- 9) 正木和夫 「セルロース系バイオマスからの軽油代替燃料油の生産」
Cellulose Commun. Vol.17, No.4 (2010)
- 10) Eric J. Steen et al, “Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass” *Nature*, Vol.463, p.559-562, 28 January (2010)
- 11) 村井宏輔ら「オイルパーム材のバイオエタノール製造原料としての特性」、
木材学会誌、Vol.55, No.6, p.346-355 (2009)
- 12) 田中良平「オイルパーム 木質バイオマス資源としての新展開」 繊維と工業、Vol.66, No.8 (2010)
- 13) バイオマスハンドブック 17章、廃棄物－黒液（日本エネルギー学会、平成21年）
- 14) 矢野浩之「セルロースナノファイバーの製造と利用」WEB Journal, No.112, p.6-10 (2010)
- 15) Beyond #3/2008, “Bio(Nano) composites taking the forest industry into new markets” Current awareness from the STFI-Packforsk Group
- 16) プラスチックエージ, 21, 51, (2005)
- 17) 堤武弘「アグリファイナリー技術を利用したグローバル展開」
(財)油脂工業会館 第42回油脂産業優秀論文
- 18) 山田博之ら「熱可塑性セルロース系繊維“フォレッセ”の展開」
Cellulose commun. vol.17, No.1 (2010)
- 19) バイオマス活用推進基本計画（平成22年12月、農林水産省）
- 20) (財)油脂工業会館、油脂原料確保研究会「油脂原料をどうする」平成21年4月

パームオイル樹は高さ5～6m、高いものでは12m



www.ffpri.affrc.go.jp/.../11biomass/index.html

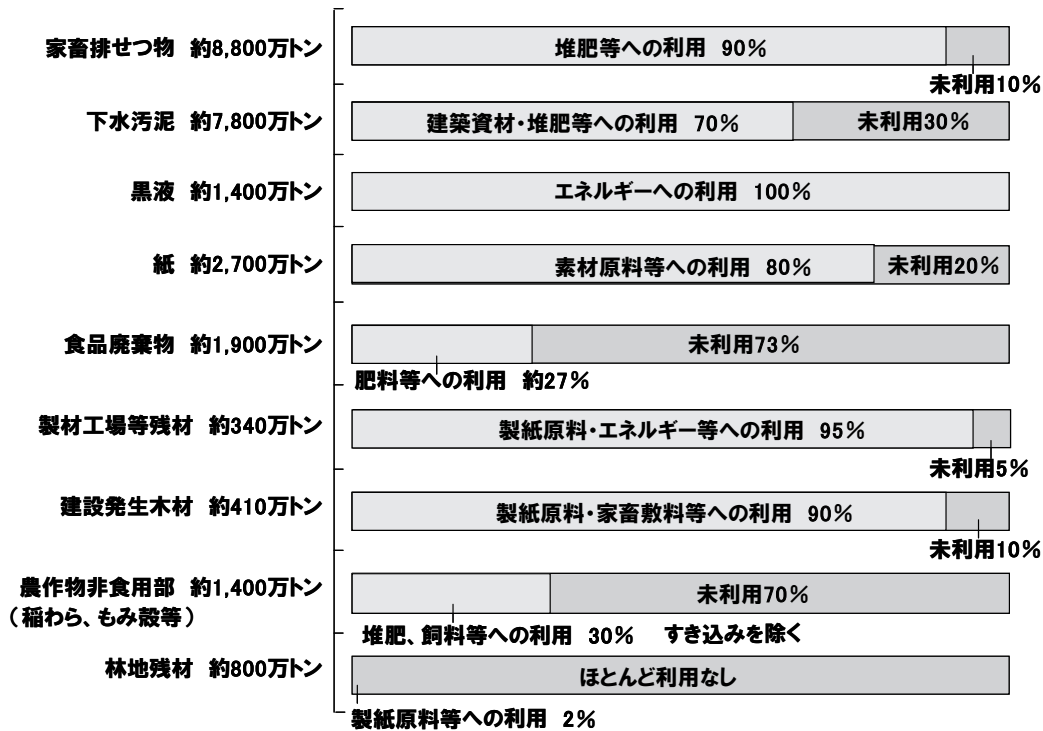
- ・樹幹はオイル収率が低下するため、約25年周期で伐採
- ・全栽培面積の約3%が毎年更新

図一1 パームオイル樹の構成

| メーカー | 利用内容 |
|-----------------|--|
| トクヤマ | 2009年より、石炭にEFBを10%混合し、発電ボイラー燃料として利用開始。年間3～4万トン使用し、年間7万トンのCO2削減効果 |
| オリックス | EFB50万トンの調達枠を確保。発電ボイラー燃料として、2010年4月から、電力、製紙会社に年間10～20万トン納入し、10～20億の売り上げを見込む。今後は100万トンまで拡大する。 |
| 伊藤忠商事 | パーム油最大手のフェルダ・パーム・インダストリーと合併で、マレーシアにEFBから、固形燃料を製造する会社を設立。年間生産量は2万4000トンで、日本に輸入し2012年から東京電力で利用。今後、生産量を12万トンに上げる予定。 |
| 三井造船 | EFBからエタノールを生産する技術の実証試験をマレーシアで開始(2010.12.28) |
| 田中良平ら (森林総研) | 製紙用パルプ及びセルロース誘導体化用溶解パルプとしての利用研究 (日本エネルギー学会誌、6,368-370,2007) |

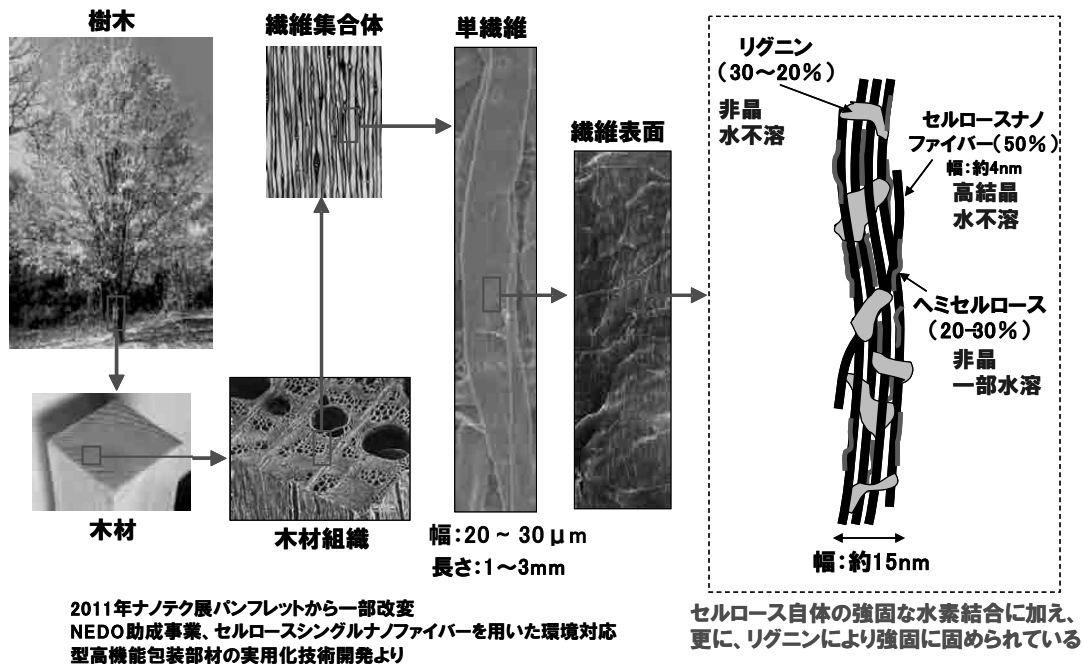
図一2 空果房(EFB)の利用動向

http://www.asiabiomass.jp/topics/1001_03.html、日本経済新聞、日刊工業新聞より

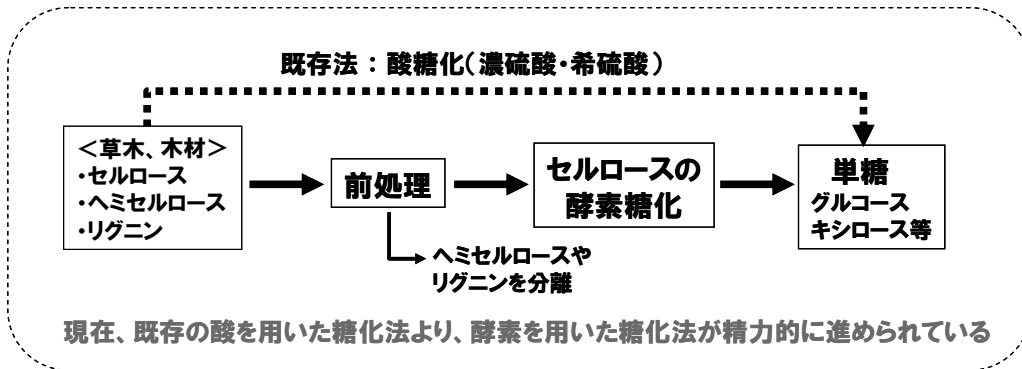


バイオマス活用推進基本計画(平成22年12月)より作成

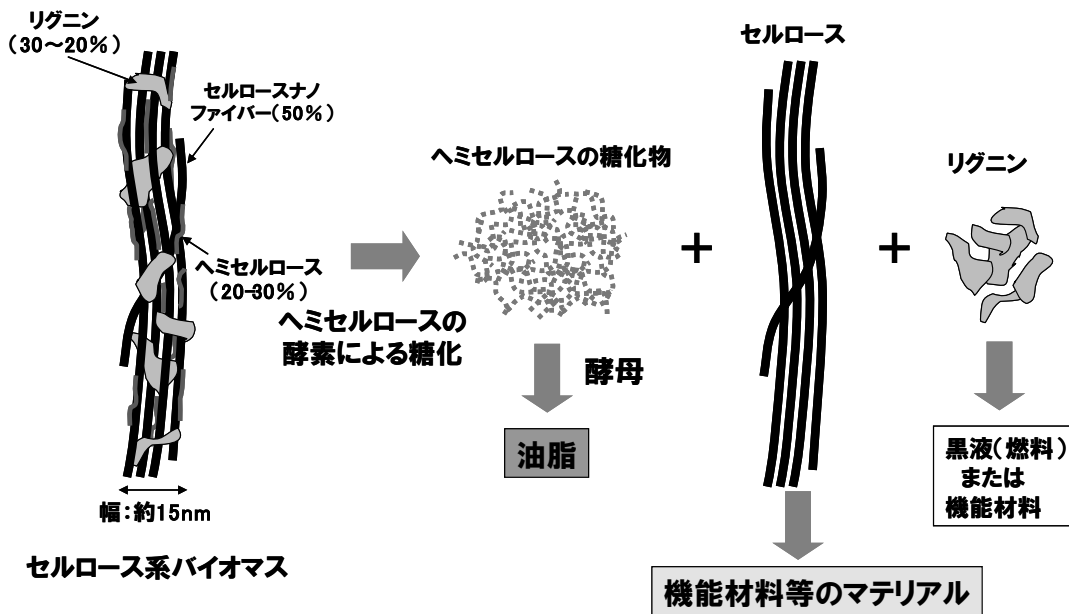
図一3 バイオマス賦存量・利用率(2010年)



図一4 セルロース系バイオマスの階層構造



図一5 セルロース系バイオマスの糖化プロセスの一例



図一6 セルロース系バイオマスのカスケード利用

◆パームオイル栽培面積(2007年、FAOSTAT Statistical Database)

| | |
|--------|-------------|
| マレーシア | 3,741,000ha |
| インドネシア | 4,540,000ha |
| 合計 | 8,281,000ha |

毎年伐採される面積(全面積の3%) 248,430ha/年

村井らの試算によれば、63Kg/本のグルコースが得られ、
パームオイル植栽密度を142本/haとすると*1)、

$$63\text{Kg/本} \times 142\text{本/ha} = 8,946\text{Kg/ha}$$

毎年伐採される面積(全面積の3%) 248,430ha/年を乗じると

$$248,430\text{ha/年} \times 8,946\text{Kg/ha} = 222\text{万トン/年}$$

*1) 村井宏輔ら、木材学会誌 Vol.55, No.6, p.346-355 (2009)

図-7 樹幹からのグルコース抽出量の試算

単糖(グルコースやキシロース等)の抽出量向上のため、伐採後の樹幹にセルラーゼやアミラーゼ
産生糸状菌等の植え付けを行い、糖化を促進。

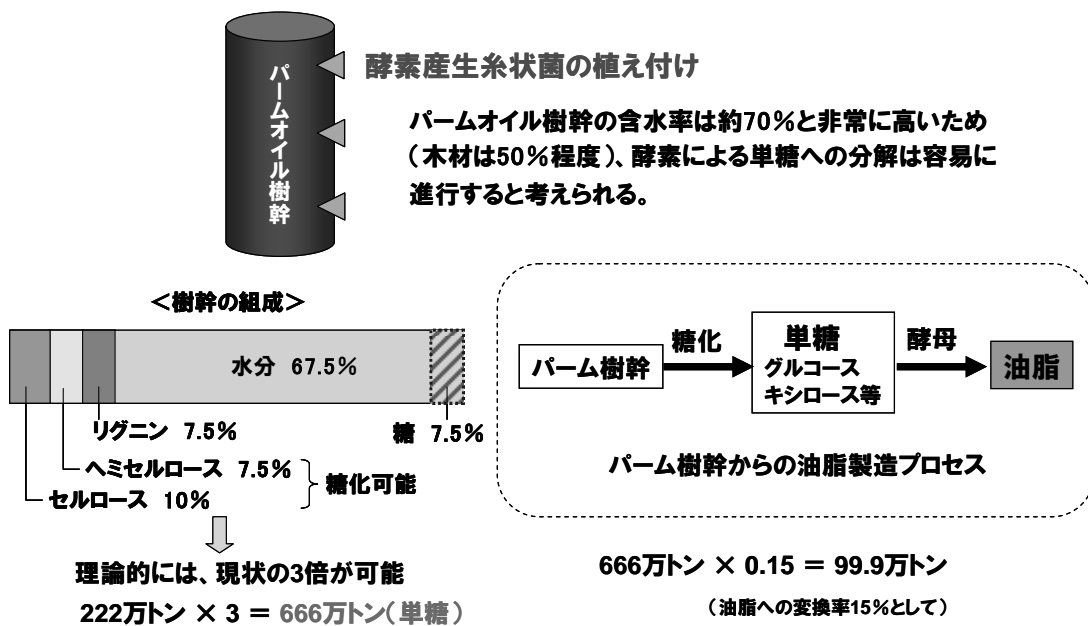
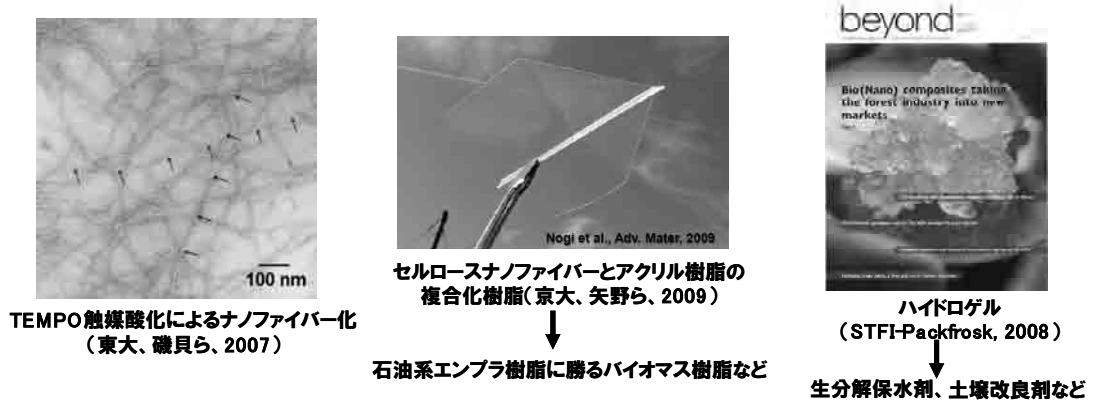
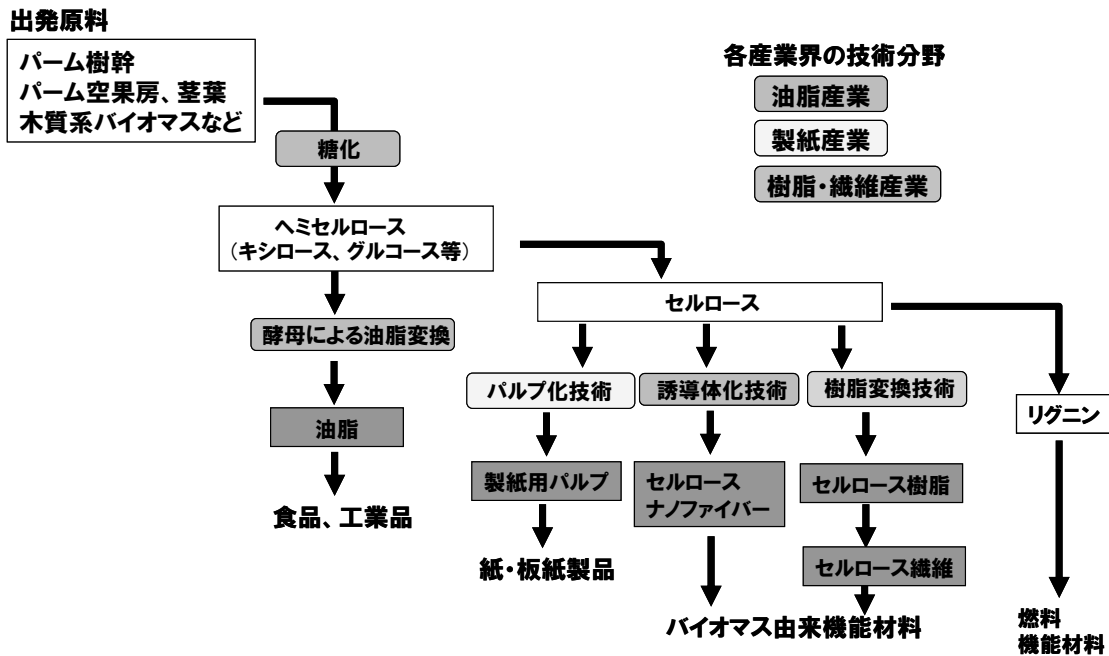


図-8 糸状菌の植え付けによる単糖の抽出量向上と油脂製造プロセス

パルプをダウンサイジングして得られるセルロースナノファイバーの製造法に関する研究とその特徴(高強度、高比表面積、耐熱性等)を活かした機能材料開発が世界的に活性化している。

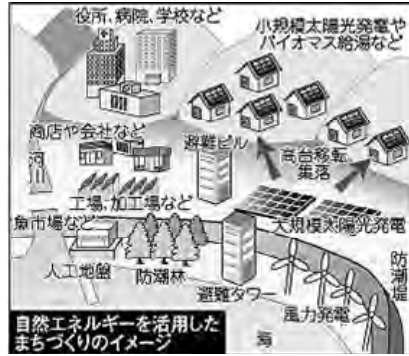


図一〇 セルロースナノファイバーの応用研究例



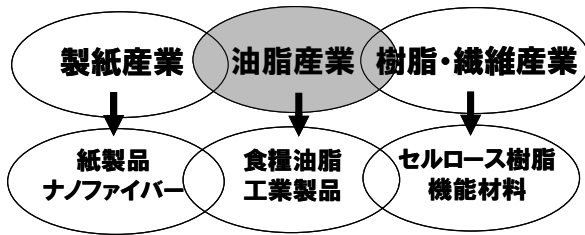
図一〇 未利用バイオマスカスケード構想

- ◆復興ビジョンとして、東北エコタウン構想の取り組み
- ◆東北地方沿岸部には、大手の製紙工場インフラ完備
- ◆原料は、稲わらを用いることで、収集コストの低減



http://www.iwate-np.co.jp/cgi-bin/topnews.cgi?20110530_3

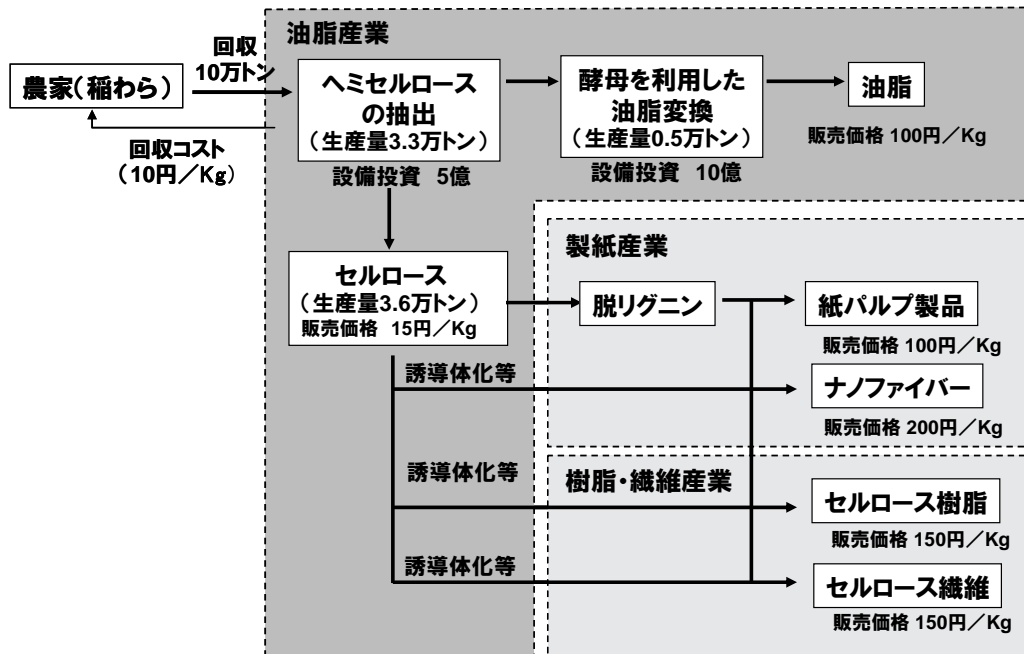
◆各産業の事業領域



◆経済効果

- ・食糧油脂・工業製品関連 18万トン
@100円/kgとして、180億円
 - ・マテリアル関連 130万トン
紙パルプ 40%
@100円/kgとして、520億円
ナノファイバー 20%
@200円/Kgとして、520億円
セルロース樹脂 40%
@150円/kgとして、780億円
- 合計 2000億円

図一11 「未利用バイオマスカスケード利用モデル実証事業」



○油脂生産量 $10万トン \times 0.33 \times 0.15 \times 0.9 = 4,455トン$

○固定費 $\frac{15億 / 7年 + 1,000万円 / 年 \cdot 人 \times 10人}{4,455トン / 年} = 70.5円 / 年$

<前提条件>
原料として、稲わら10万トン
ヘミセルロースの抽出比率 33%
油脂変換率 15%
収率 90%

図一12 稲わらを10万トン回収した場合のコスト試算と各産業界の事業化イメージ

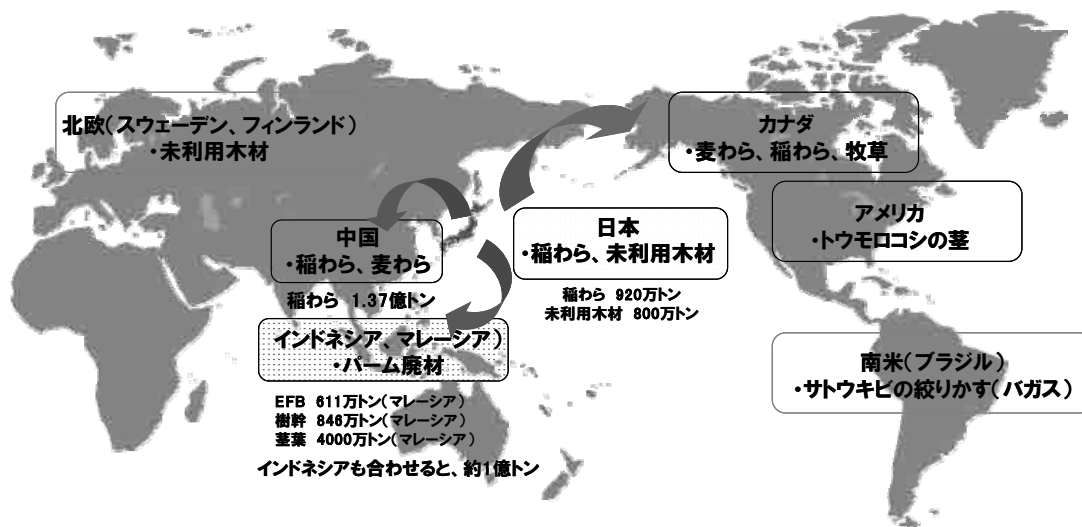


図-13 未利用バイオマスカスケードのグローバル展開

◆パームオイル廃材量(マレーシア、インドネシア)

出所:田中良平 SEN'I GAKKAISHI Vol.66, No.8 (2010)

| | |
|-----|-----------|
| EFB | 1,900万トン |
| 樹幹 | 1,700万トン |
| 莖葉 | 8,000万トン |
| 合計 | 11,600万トン |

廃材中のヘミセルロース量 33%、収率90%として
 $11600万トン \times 0.33 \times 0.9 = 3,445万トン$

油脂変換率15%
 $3,445万トン \times 0.15 = 517万トン$

◆パームオイル廃材中の成分分析 Shibata et al, Journal of Japan Institute of Energy, 87, 383-388(2008)

Table 1 Chemical composition of various parts of the oil palm (wt%)

| Part | Cellulose ^{a1} | Hemicellulose ^{a2} | Lignin | | Extractives ^{a3} | Ash |
|-------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|-----|
| | | | Klason | Acid soluble | | |
| 樹幹→ Trunk | 30.6 | 33.2 | 24.7 | 3.8 | 3.6 | 4.1 |
| 莖葉→ Frond | 39.5 | 29.8 | 21.2 | 2.1 | 1.7 | 5.7 |
| Mesocarp | 39.5 | 9.8 | 32.8 | 0.1 | 8.8 | 8.9 |
| Shell | 20.5 | 22.3 | 49.9 | 1.0 | 4.7 | 1.0 |
| Kernel Cake | 35.7 | 30.3 | 15.6 ^{a4} | 0.1 ^{a4} | 11.3 | 6.3 |
| EFB | 37.9 | 35.0 | 22.9 | 1.1 | 2.7 | 3.5 |

^{a1} Cellulose = α-Cellobiose

^{a2} Hemicellulose = Holocellulose - α-Cellobiose

^{a3} Ethanol (Benzene = 1:2 (v/v))

^{a4} Although these values could be obtained by the method with 72% H₂SO₄ they do not represent true lignin content as described later.

図-14 パームオイル廃材からの油脂生産量の試算結果

表－1 各種油脂と酵母産生油脂の脂肪酸比較

| 油脂 | 脂肪酸(%) | | | | | | |
|--------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | C12:0 ラウリン酸 | C14:0 ミスチリン酸 | C16:0 パルミチン | C18:0 ステアリン酸 | C18:1 オレイン酸 | C18:2 リノール酸 | C18:3 リノレン酸 |
| ヤシ油 | 44-51 | 13-18 | 7-10 | 1-4 | 5-8 | 1-3 | |
| パーム核油 | 45-52 | 14-19 | 6-9 | 1-3 | 10-18 | 1-2 | |
| パーム油 | | 1-6 | 32-47 | 1-6 | 41-52 | 2-11 | |
| 大豆油 | | 0.3 | 7-11 | 3-6 | 22-34 | 50-60 | 2-10 |
| 菜種油 | | | 2-5 | 1-2 | 10-15 | 10-20 | 5-10 |
| 酵母産生油脂 | | | 35.3 | 6.0 | 51.4 | 2.1 | |

油脂の脂肪酸組成の出所:油脂原料をどうする(財団法人油脂工業会館、油脂原料確保研究会、平成21年4月)

平成24年 2 月 2 1 日

〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-13-11

財団法人 油脂工業会館

☎東京 03(3271)4307 (代表)

<http://www.yushikaikan.or.jp>