

油脂産業論文

油脂産業における脱炭素社会への貢献

クリケットオイルとアブラヤシ廃材の組み合わせによる 超環境親和型ハイブリッドシステムの提案

第一工業製薬株式会社

研究本部 研究カンパニー部 機能性ウレタングループ

タツミ コウヘイ
巽 康平

目次

はじめに	1
第1章 各業界における脱炭素社会の現状と課題	
1-1. 脱炭素社会を目指す必要性	4
1-2. 油脂産業および化学産業のCO ₂ 排出の現状	5
1-3. クリケットオイルおよびEFBのハイブリッドシステム案	6
第2章 クリケットオイルおよびEFBを活用したシステムの実現に向けて	
2-1. なぜクリケットオイルなのか	7
2-2. 超環境親和型ハイブリッドシステムの構想	9
2-3. 輸送材料としてのEFBの活用方法	13
第3章 ハイブリッドシステムの脱炭素社会に向けての構想と妥当性	
3-1. クリケットオイル使用の妥当性	16
3-2. 乳酸の生産方法および使用の妥当性	18
3-3. ハイブリッドシステム活用によるCO ₂ 削減量	20
おわりに	22
参考文献	23

はじめに

近年、地球温暖化の原因の一つである二酸化炭素(CO₂)の排出量の問題が議論されている。1985年にオーストラリアで開催された世界会議で大きく取り上げられてから、地球温暖化に対する危機感を持ち始め様々な業界で脱炭素社会に向けての取り組みがなされている。さらに 125 か国・1 地域では、脱炭素社会に向けた動きとしてカーボンニュートラルを実現することを表明しており、表明した国の世界全体に占める CO₂ の排出量の割合は 39%となっている(2017 年実績)。日本もカーボンニュートラルに向けて 2030 年までに温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指しており、CO₂ の排出量の 30%程を占める産業部門(工場等)についても構造変換が必要であると訴えている¹⁾。例えば、化学産業では石油由来の原料を使用せず、パーム油や菜種油などの主要油脂を原料として使用することで、CO₂ の排出量を減らす取り組みがなされている。一方、油脂産業界においてはパーム油を生産する過程で発生する副生成物のパームヤシ殻(Palm Kernel Shell : PKS)を、バイオマス発電所の燃料として利用するなど様々な取り組みがなされている。パーム油は単位収穫面積当たりの搾油量が多いことから生産量の高さで知られているが、需要増加によりやむを得ない森林伐採などで農園開発も進み生産量は年々増加している。需要増加の要因として人口増加や再生可能エネルギーとして油脂需要の拡大によるものだと予想している²⁾。このような逼迫状態の中、主要油脂を化学合成の原料として使用するなど新たな方法で活用することは妥当ではない。むしろ、カーボンニュートラルや脱炭素社会達成のための取り組みの趣旨にそぐわない。そのため、植物以外から油脂原料を搾油することにより油脂産業のみならず他業界へ貢献することが今後必要となると私は考える。

そこで本論文では、植物以外の油脂原料に着目し、動物油、植物油に次ぐ第三の油脂である昆虫油を化学合成原料として使用する方法を提案する。その中でも、比較的育成が容易などの利点があるコオロギを活用することで脱炭素社会への貢献を目指す。さらには、パームの木に生るパーム椰子房から果実を取り出した後に残るパーム椰子房の残渣物であるパーム空果房 (Empty Fruit Bunch : EFB)の活用方法も同時に提案する。カーボンニュートラルや脱炭素社会を達成することができれば、産業構造や経済社会に変革をもたらすだけでなく世界の大きな成長にも繋げることができると思う。

第1章 各業界における脱炭素社会の現状と課題

1-1. 脱炭素社会を目指す必要性

温室効果ガスとして6種類があるが、CO₂の寄与度が最も大きい。18世紀頃は280ppm程度であったが、現在はその約1.3倍まで増加している³⁾。このまま対策を行わなければ更なる増加が続くと予想されている。さらには、温暖化によって引き起こされる現象が、二次的影響をもたらす可能性まで報告されている。例えば、光合成による炭素固定などが挙げられる⁴⁾。

これらの対策として電力消費に伴うCO₂の発生量の抑制などが良く知られているが、近年では化学用途向けなどで、発電所から高濃度のCO₂を分離回収する設備がすでに実証段階に入っている⁵⁾。また、回収だけでなくCO₂の長期的な隔離を目的とした地中貯留の取り組みもなされている⁶⁾。しかし、移送するために膨大なエネルギーが必要であることや、設備投資などの運用コストが高いなど未だ課題は多い。そのためか、開発段階にある施設は増加傾向にあるが、建設中又は操業中の施設は大きな増加はない(図1)。投資見込み額としては2020年代で1171億ドル、2030年～2050年の間では年間1147億ドルとも言われている。また、1tあたりのCO₂回収費用は4000円前後と高い。仮に、コスト面などに問題がないとしても法的な設備が不十分であるため、事業をすぐさま始めるのは困難である。以上より、CSS (Carbon dioxide Capture and Storage) 以外での脱炭素社会への取り組みが必要になると予想される。

世界のCCS施設推移

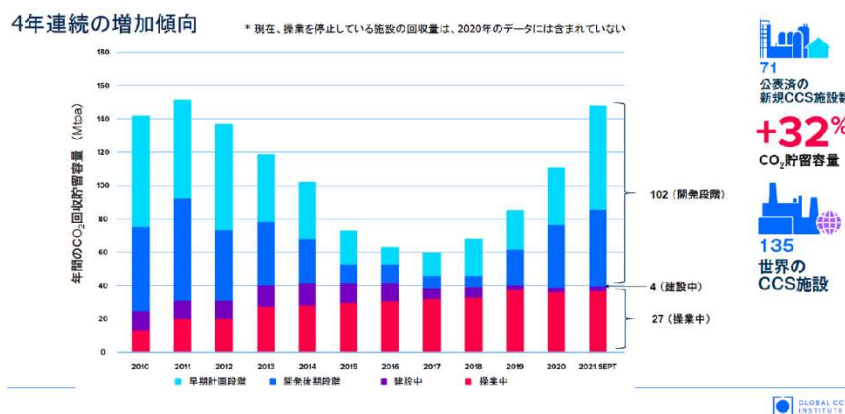


図1. CCS施設数とCO₂回収貯留量の推移

(出典：国際環境経済研究所 <https://ieei.or.jp/>)

1-2. 油脂産業および化学産業の CO₂ 排出の現状

○化学産業

日本全体の CO₂ 排出量のうち産業部門によるものは 34%である⁷⁾。その中でも化学部門は鉄鋼につぐ 15%を占めており、年間で 5500 万 t 排出している⁷⁾。さらに、プラスチックおよびゴム製品製造業では、CO₂ 排出量は合計で 1000 万 t にも及ぶ⁷⁾。このように化学産業の CO₂ 排出量は産業部門の中でも非常に大きな割合を占めているといえる。この原因としてエネルギー利用による排出の大きさが最大の理由となっている。高温高压設備を使用するため、石炭、ガス、石油などの化石燃料の直接燃焼により CO₂ が多量に排出される。このような現状を鑑みるに、化学産業の脱炭素化を目指すには、原料由来、エネルギー由来の二つの対策が求められるといえる。今後必要となってくる取り組みは主に三つある。一つ目は可能性な限り社会の中で使い回すという原料循環の取り組みである。廃棄されたプラスチックやゴムなどを回収することにより、プロピレンやブタジエンなどの基礎化学品に変換する技術が重要となってくる。二つ目は化学プラントおよび発電における熱源変換の取り組みである。ナフサ分解炉の熱源を、アンモニアに転換することや、発電所の燃料を水素などに転換することなど再生可能エネルギーの積極的な利用が必要である。三つ目は、石油由来のナフサから脱却し、バイオマス由来の原料を使用することである。原料の置き換えで解決できることが多く、その他の取り組みよりも比較的容易といえる。また、化学部門の中でもプラスチック業は CO₂ の排出量だけでなく、廃プラスチック量も非常に多い。日本国内のデータによるとプラスチック生産量が 1045 万 t に対して、廃プラスチック総排出量は 824 万 t である⁸⁾。廃プラスチックの約 84%がリサイクルされており、このうち約 57%は発電やセメント製造の熱源としての利用(サーマルリサイクル)であり、CO₂ の排出源となっている。単純焼却も含めて約 1600 万 t の CO₂ が排出されており、これは国内化学産業が排出する CO₂ の約 27%を占める⁹⁾。また、ポリウレタンに注目すると、有効利用率は 20%程度と非常に低い¹⁰⁾。さらには、ヨーロッパ地域では使用済マットレスの廃棄量が非常に多く、4000 万枚にも及ぶ。今後、プラスチック業の有効利用率を上げるためには、ウレタンの有効利用率を向上させること、CO₂ 排出量を削減するためには熱源として使用されている廃プラスチックをリサイクルや生分解性を有する材料へ転換することなどが求められると考えられる。

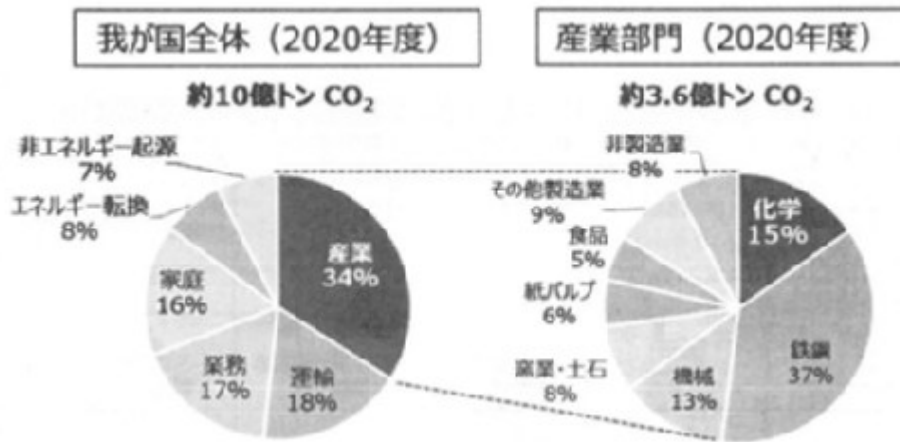


図 2. 日本における CO₂ 排出量

(出典：日本接着学会 接着の技術 Vol.43 No.1 2023)

○油脂産業

油脂全体供給量の 3 割を占めるパーム油およびパーム核油は、生産量が高く重要な油脂となっている。今後も人口増加による需要増加やバイオディーゼル燃料への展開などから更に需要が高まることが予想されている。パーム油の単位収穫面積当たりの搾油量は菜種油や大豆油と比べて 3~6 倍程であり、1 年を通じて安定的に収穫可能である¹¹⁾。しかし、急激な需要拡大に伴い、農園開発が深刻な環境問題を引き起こしている。このままだと、地球温暖化を加速させるだけでなく、野生動物の絶滅を引き起こす可能性がある。また、農薬による健康被害や児童労働といった人的侵害問題も指摘されている。このような状況の中、化学産業では植物油由来の多価アルコールをバイオマス原料として使用しており、2020 年には市場規模 68 億米ドルに達し、2021 年から 2028 年にかけて CAGR6.6%で成長すると予測されている¹²⁾。上記の問題を考慮するとこのまま植物油を使用し続けることは妥当ではない。今後は、微生物や昆虫などといった植物以外のものを使用して油脂を取得する産業を進展させる必要があると考えられる。

1-3. クリケットオイルおよび EFB のハイブリッドシステム案

バイオマス原料として植物油を活用することは、植物油の生産量を増加させる恐れがあるためかえって妨げになることを論じてきた。そこで、昆虫の中でも多くの利点

を持つコオロギオイル(クリケットオイル)に着目した。コオロギは他の昆虫種と比べて飼育が容易であり、成長も早い。さらには、餌、水の必要量も少なく、温室効果ガス排出量も少ない。そのため、コオロギは植物油の代替品としての可能性を他の昆虫よりも秘めていると私は考える。また、近年注目されているトウモロコシ由来のポリ乳酸にも着目した。トウモロコシポリ乳酸は、生分解性を有し、最も研究および実用化が進んでいる。この2つの反応により、昆虫由来×生分解性を有したハイブリッド型の化学原料(多価アルコール)を合成し、化学産業で使用されている原料の代わりとして利用することにより脱炭素社会への貢献を行う。一方で、パームオイル製造工程から排出される廃棄物(EFBの使用を想定)を使用して木製パレットを作製することで原料作製から輸送までの全てのプロセスにおいて脱炭素社会に貢献できるシステムを構築する。

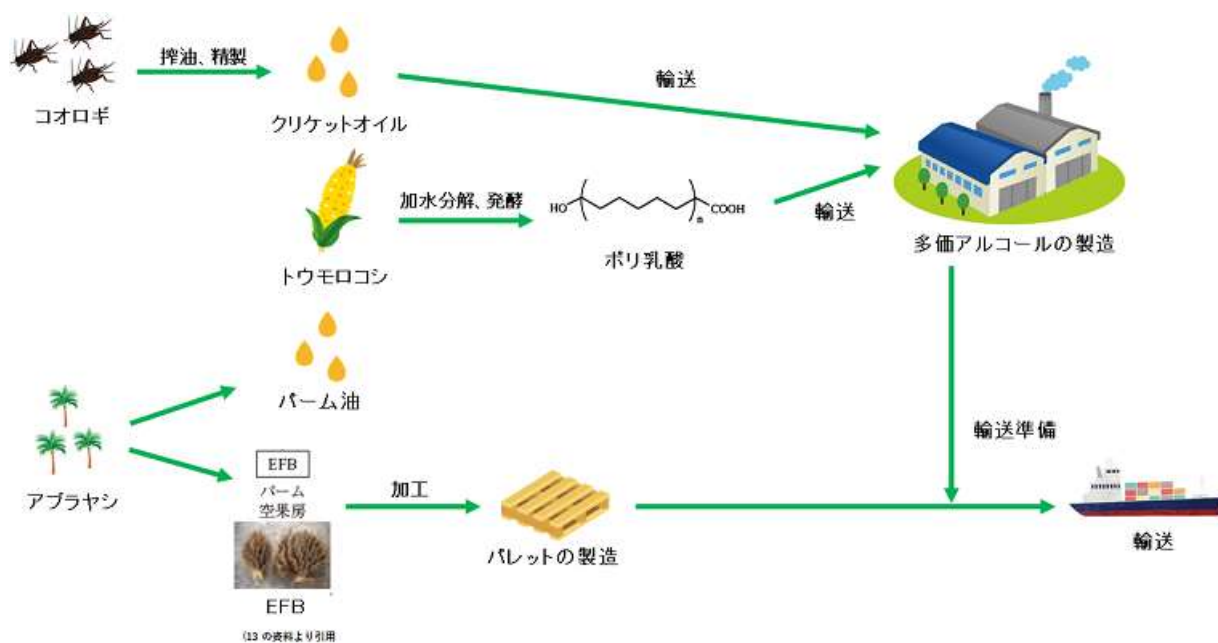


図 3. 超環境親和型ハイブリッドシステム案(概要)

第 2 章 クリケットオイルおよび EFB を活用したシステムの実現に向けて

2-1. なぜクリケットオイルなのか

植物油脂の生産量は、2001 年から比較して約 2 倍まで増加している。これ以上の需要増加を避けるため日本の耕作放棄地でのアブラ椰子栽培を想定した場合の試算例が

ある。日本での生産を想定した場合での CO₂ 排出量を算出した結果、インドネシアなどでの森林伐採と比較してパーム油 1t 当たり、約 27t-CO₂/t、CO₂ 排出量が少なくなることが明らかとなった¹³⁾。しかし、コスト算定したところ海外で生産し調達した場合と比べて、46~68 倍という結果となった¹¹⁾。そして近年の原油価格の高騰などを考慮すると日本での生産は妥当とは言えない。そのため、海外での主要植物油脂以外での生産が必要となってくる。そこで私は昆虫オイルの中でもクリケットオイルに着目した。前章でも述べたが、コオロギは他の昆虫や生物と比較して様々な利点を持つ。ミールワームでは飼育容易度はやさしいが数ヶ月の発育日数が必要であり、バッタであれば飼育性が 2 週間と早い、飼育性に欠けている¹⁴⁾。それと比較しコオロギは発育日数としては約 35 日であり、飼育難易度もやさしい¹⁵⁾。さらには、雑食性であるため餌の選択性が広く、残食を餌にするなど食料廃棄問題にも貢献できる可能性がある。家畜との比較となるが、コオロギの必要な水や餌量は圧倒的に少なく環境負荷軽減されるとも言われている。

近年、昆虫は食用昆虫として注目されており、主要食用昆虫を使用することは植物油脂と同様にかえって妨げとなる。中華人民共和国のデータにはなるが、下記の円グラフ(図 4)からもわかる通り、コオロギは食用昆虫としてあまり利用されていないため、妨げとなる可能性は他の昆虫と比べて低い¹⁶⁾。さらには、食用昆虫は脱脂処理されることや飼育性などを考慮すると、今後需要が増加しても逼迫状態となることは考えにくい。以上のことから昆虫の中でもコオロギは優れていると言える。

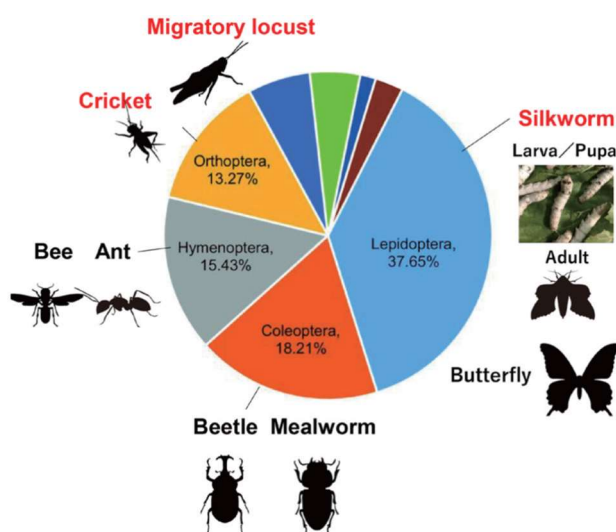


図 4. 中国で食されている昆虫の割合

(出典：食用昆虫の油脂と期待される栄養生理機能 オレオサイエンス第 22 巻 4 号)

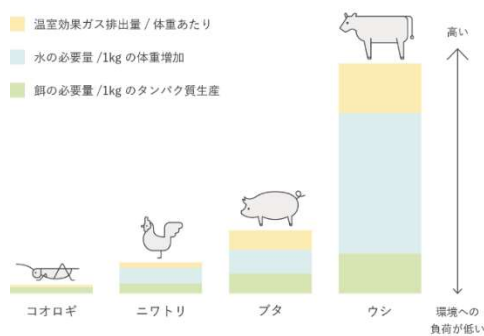


図 5. 1kg のタンパク質を生産するのに必要な餌や水の量
 (出典：GRYLLUS ホームページ <https://gryllus.jp/why-cricket/>)

また、コオロギの油脂組成は C10~C20 の油脂を含有しており、特にパルミチン酸、オレイン酸、リノール酸を多く含んでいる¹⁸⁾。これは、既存油脂と比較すると類似しており、代替油脂原料としても適している。

2-2. 超環境対応型ハイブリッドシステムの構想

1-3 で述べたシステム案の流れとしては、コオロギから抽出されたクリケットオイルとトウモロコシから抽出されたポリ乳酸を反応させることにより多価アルコールを製造し、それを EFB 廃材で作製したパレットを用いて輸送するというものである。生産国に関しては、EFB の使用を考慮して、インドネシアでの生産を想定している。

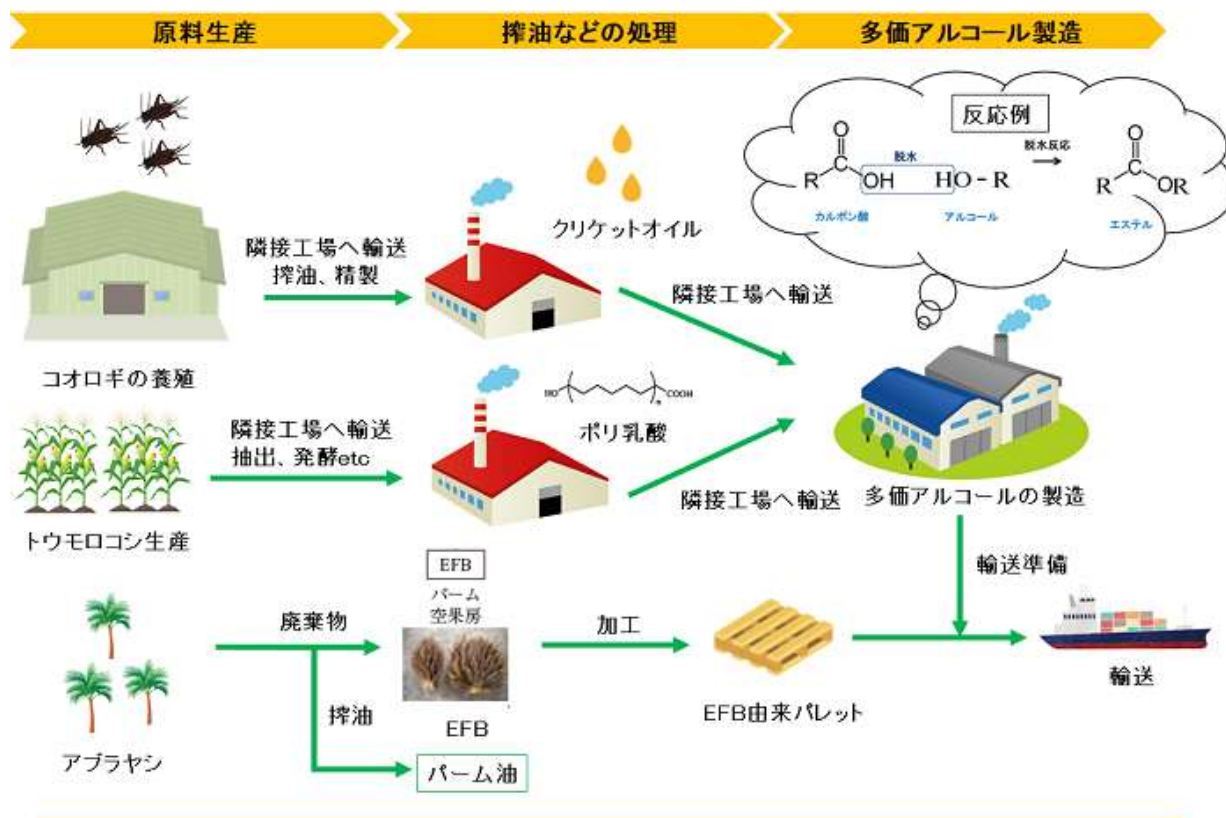


図 6. 超環境親和型ハイブリッドシステムの詳細

まずは、キー原料となるクリケットオイルを搾油するためのコオロギの育成方法について説明する。必要なクリケットオイルは、化学原料としてよく利用されているひまし油の年間数量を参考に算出する。ひまし油は 2021 年度実績で販売数量 7940t/年である¹⁷⁾。生産量は新型コロナウイルスの影響もあり一時減少していた時期もあるが、2021 年にはコロナ禍前の数量まで回復しており、今後も需要拡大することが予想されている。これらより、まずは生産数量 8000t/年を目標としてクリケットオイルの製造を開始することを想定し、コオロギやミールワームの製造実績のある Cortes Ortiz らの研究結果を参考に養殖場を構想した¹⁹⁾。施設内には、飼料の貯蔵庫、飼育室、洗浄分離場を設け飼育を行う(図 7 左)。飼育室には、コオロギの効率的な繁殖のために産卵場も設ける。また、単位収穫面積当たりの搾油量を高めるために鶏卵輸送用トレーを深めのコンテナに入れたものを使用し養殖する(図 7 右)。コオロギの飼育環境は、30℃-35℃、相対湿度 25-50%が推奨されており、植物性の飼料で飼育可能である。さらには、雑食であることから残った食品を飼料にできる等、食糧廃棄問題にも貢献できると考えられる。

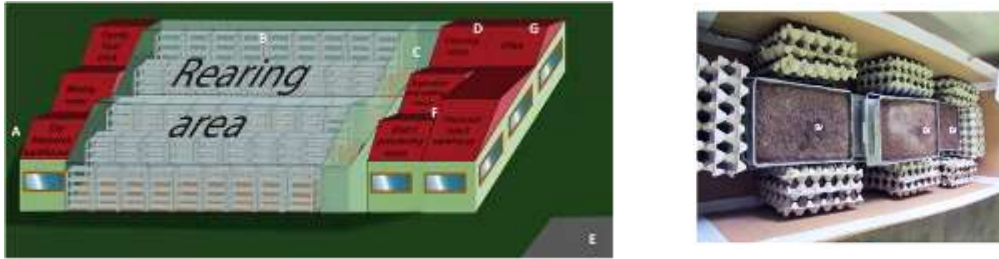


図 7. コオロギの養殖施設の一例

(出典：Insect Mass Production Technologies ResearchGate)

飼育・採集されたコオロギは、乾式分別処理または湿式分別処理により、脱脂する¹⁷⁾。粉末化されたコオロギは廃棄せず、食用昆虫として利用する。コオロギは、洗浄・湯煎した後に乾燥させ脱脂する(図 8)。脱脂の方法としては、圧搾抽出や有機溶媒抽出、デカンタ式遠心分離機による抽出、超臨界抽出などの手法で実施する。特に、有機溶媒抽出や超臨界抽出は抽出能力が高いと考えられている。次に、抽出したクリケットオイルに水酸基を導入する。水酸基を導入する理由としては、ポリ乳酸との脱水縮合を想定しているからである。水酸基の導入方法としては 2 パターンを想定している。まず一つ目は搾油したクリケットオイルをグリセロール分解によりモノグリセリドに変換する方法である。二つ目は、エポキシ化を行った後、酸触媒あるいはアルカリ触媒により開環させることで水酸基を導入する方法である²⁰⁾。既存油脂で水酸基を導入した実績が多数あることと、既存油脂と組成も類似しているため水酸基の導入は十分可能であると考えられる。

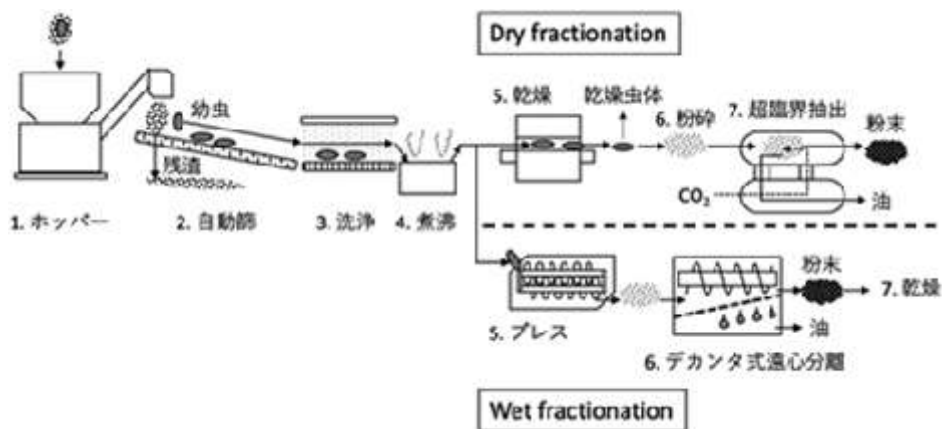


図 8. クリケットオイルの抽出方法の一例

(出典：昆虫の飼料利用に関する研究動向と今後の課題 日畜会報 92(3):265-278 2021)

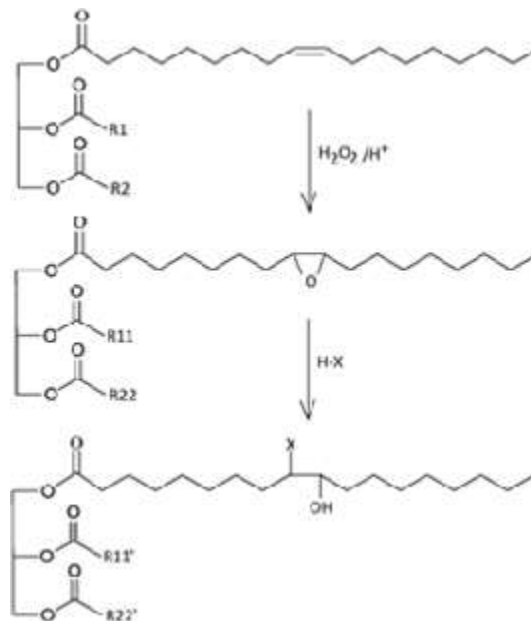


図 9. 水酸基の導入方法(エポキシ化)

(出典：J. *polym. Res.*, **2018**, 25, 184.)

ポリ乳酸は、トウモロコシからの生産を想定する。コオロギの養殖施設場と隣接する形でトウモロコシ農場を設置する。トウモロコシの重量の約 40%のポリ乳酸を製造できる。製造方法としては、トウモロコシからデンプンを抽出し、取り出したデンプンを発酵させ、乳酸を製造する。その後、反応器などを用いて重合することにより、ポリ乳酸を得る(図 10)。また顧客要望などによっては、ポリ乳酸を製造せず乳酸の段階でクリケットオイルと反応させ低分子量の多価アルコールを製造する(分子量のコントロールを行うため)。クリケットオイルの生産量を考慮し、ポリ乳酸の初期の生産量としては 8000t を想定し、段階的に製造量を増加させる。このように新たな用途として展開するため生産量を増加させる恐れがあるが、ポリ乳酸は食品廃棄物などを利用して製造できる可能性があることが報告されており²¹⁾、これらを利用することにより食料との競合を防ぐ可能性が十分にある。一方で、ポリ乳酸は生分解性を有しているため、焼却せず埋め立てることができ CO_2 の排出量を抑えることができる。仮に焼却処分を実施したとしても、燃焼熱が従来のプラスチックと比べて 1/2~1/3 であるため、焼却炉を痛めることもない²²⁾。製造したポリ乳酸はクリケットオイルを輸送した工場へ輸送し、その後、それらを反応させて多価アルコールを製造する。

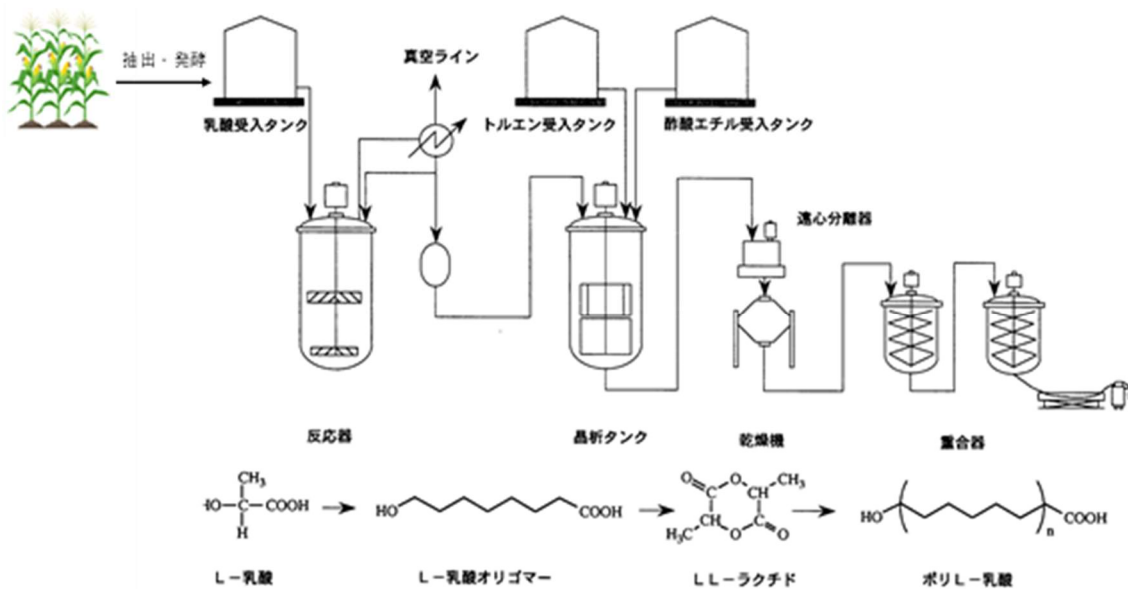


図 2. ポリ乳酸製造フロー

図 10. ポリ乳酸製造フロー

(出典：バイオマスから製造するポリ乳酸 *J.Appl.Glycosci.*,**50**,405-410(2003))

多価アルコールの合成方法としては、脱水縮合によるエステル化反応により合成を行う。高分子量の多価アルコールを合成することを想定してポリ乳酸を使用しているが、上記でも述べた通り仮に低分子量の多価アルコールの要望があった場合は乳酸を使用すべきだと考える。その場合、クリケットオイルを開始剤として用いたラクチドの開環重合により多価アルコールを得ることもできる。最終的な多価アルコールの製造量は収率 90%と仮定すると、約 14000t となる。

2-3. 輸送材料としての EFB の活用方法

缶などに充填した多価アルコールは、最終的にパーム油廃棄物由来の木製パレットを用いて出荷する。日本パレット協会によると 2022 年度のパレット生産数量は 60,679 千枚となっており、木製パレットとしては 35,420 千枚(全体の 58.4%)であった(日本パレット協会より)。木製パレットを製造するには材料摂取のための森林伐採も必要となり、上記の数値からも生産量を減少させる取り組みが必要となっていることがわかる。製品使用後から単純焼却処分までのデータにはなるが、木製パレットに注目するとパレット 1 枚あたりで 63.5kg の CO₂ が排出されている(図 11)。

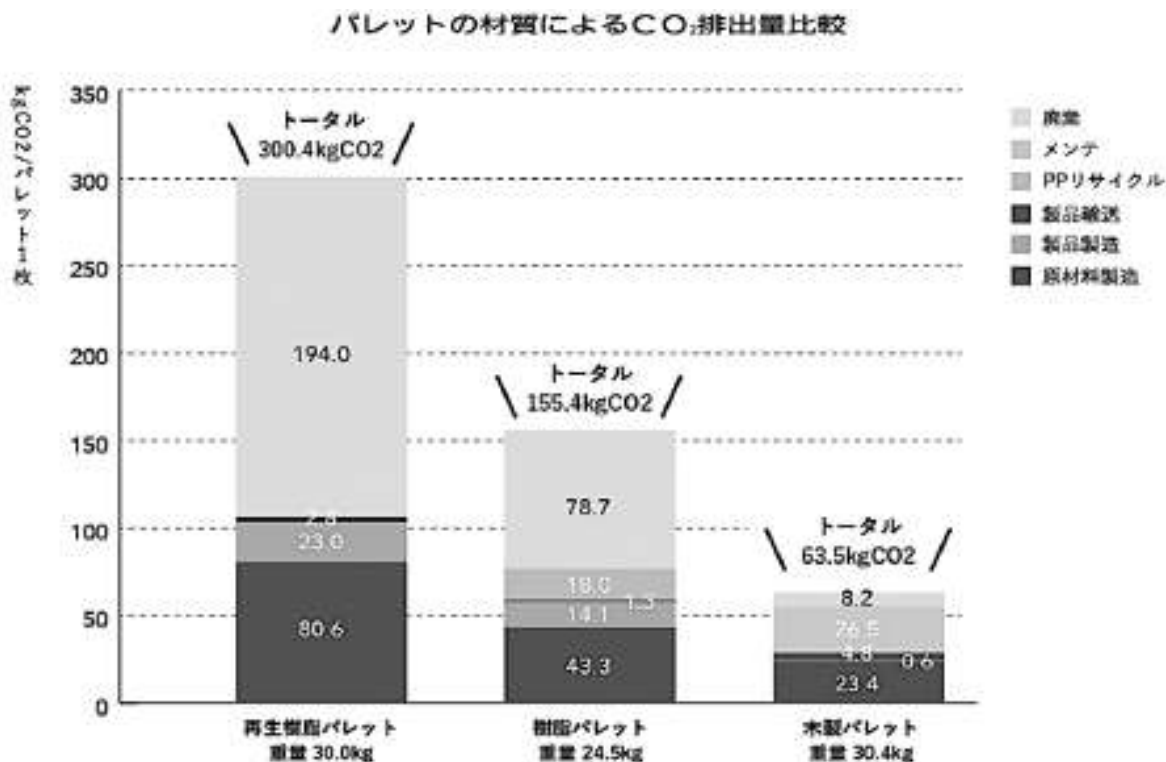


図 11. パレットの材質による CO₂ 排出量の比較
(出典：日本印刷新聞 2022年7月25日(月曜日))

一方で、パーム油由来の廃棄物として EFB(パーム空果房)があるが、有効な利用方法がないうえに排出される量が膨大で、その発生量は、マレーシア、インドネシアだけでも 5000 万 tといわれている²³⁾。EFB の有効利用が進んでいない理由は、腐敗しやすく、水分、塩分、灰分を多く含んでいるため、そのままでは燃料として使用しづらいためである。近年では、EFB を改質した後にペレット化し、ボイラ向けの再生可能燃料として利活用するプロセスが開発されている²⁴⁾。EFB 中に含まれる水分を除去することにより、燃やすことが可能であるが、酸化カリウムなどが灰中に残るため、ボイラのトラブルを引き起こすことが明らかになった。そのため、現在は脱灰プロセスの開発が行われている。このように EFB の利活用が進んでいない点とパレット生産量の状況を鑑みて木製パレットとしての再利用を考えた。EFB の製造プロセスを参考に木製パレットの製造プロセスを考案した。従来の方法と同様に、乾燥、破碎といったプロセスに加えて、木材用接着剤の混合、圧縮の工程を追加することで木製パレット

を製造する。アブラヤシ廃材を利用してないが、未利用間伐材を活用した輸送用パレット(Kyo pallet®)をエースジャパン株式会社は開発販売している²⁵⁾。間伐材を搬出し利用する利用間伐においては、枝や葉、梢などは使い道がないとされてきたが、未利用材をチップ化し木材中に含まれる水分を上手く活用して木材を接着させるなど独自の技術によって製品化している²⁶⁾。この技術を参考にすると、EFBのパレットを製造することは十分可能であると考えられる(図12)。パレットとしての寿命を終えた後は回収して再成型、脱灰などの処理をすることにより燃料として使用することを想定している。

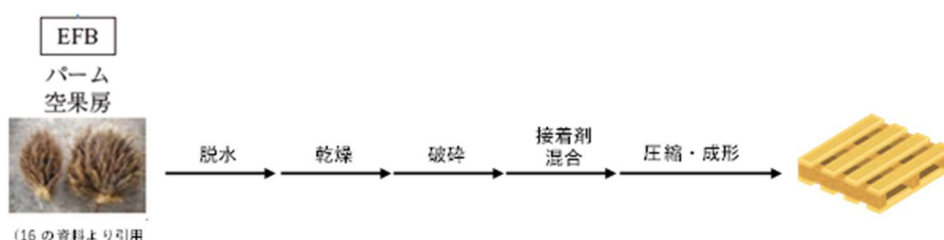


図12. EFBを活用したパレットの作製方法の一例



図13. パーム産業の製品および排出物

(出典：パーム産業における未利用バイオマスの有効活用と最適なプロセス開発 IHI 技報 Vol59 No.4(2019))

第3章 ハイブリッドシステムの脱炭素社会に向けての構想と妥当性

3-1. クリケットオイル使用の妥当性

本章では、これまで述べてきたシステムの妥当性評価を行った。まずは、コオロギを使用することの妥当性を示すために他昆虫との油脂量を比較した。以下の図に各昆虫における油脂量を示している(図 14)。

項目	アメリカミズアブ ^{1,2}	イエバエ ^{2,3}	コオロギ ^{2,4}	ミールワーム ^{1,5}	魚粉 (CP 65%) ¹
一般成分 (% of DM)					
粗タンパク質	57.7	59.87	71.7	57.8	70.7
粗脂肪	11.8	19.64	10.4	25.5	10
粗繊維	16.1	7.11	4.6	6.9	0
灰分	13.5	7.06	5.4	3.5	18.2

図 14. 各昆虫の栄養素成分

(出典：昆虫の飼料利用に関する研究動向と今後の課題 日畜会報 92 (3) : 265-278
2021)

このデータからコオロギは比較的油脂量が多くないことがわかる。最も多いものとしてはミールワームであった。この結果からは一見ミールワームの方が妥当だと考えられるが、飼育面や一匹あたりの重量や大きさ考慮すると妥当とは限らない。実際、ミールワームとコオロギの育成日数には差があり、コオロギの方がミールワームよりも育成日数が早い(図 15)。個体差を考慮し、コオロギ一匹の重さを 0.5g としミールワームの重さを 0.2g と仮定する。図 14 の値を参考にし、一匹あたりから搾油量を算出するとどちらとも約 0.005g となり差がないことがわかる。そして発育日数を考慮するとコオロギは他の昆虫よりも勝っていると言える。

次に単位面積あたりの搾油量を算出した。2022年8月に長野県でオープンしたクリケットファーム²⁷⁾を例に説明する。この施設は0.12haの養殖面積を誇り、年間で1600万匹のコオロギを養殖できるとのことであった。これらの数値を参考に単位収穫面積あたりの搾油量を算出すると、おおよそ70000~140000kg/haとなり、単位収穫面積あたりの搾油量が主要油脂の中でも最も高いパーム油(図 16)と比べて20~40倍も生産性が高いことがわかる。一方、コオロギの大規模養殖実現のため、飼育スペースの効率化検討を実施した例がある²⁸⁾。徳島大学の渡邊助教らは、飼育ケースの仕切り構造を工夫し、空間利用高効率を適正化することに成功し、1 m³あたり7万匹の高密度生産を可能とした。この結果を考慮し、年間10サイクルの養殖を可能とするとおおよそ100倍近い値となることがわかる。さらには、日々のコオロギの飼育維持作業及び収

穫時の分別作業に関わる人件費が全体コストの 8 割を占めており、それらを全て自動化することにより既存油脂と差のないコストの実現も可能である²⁸⁾。

次に質量増加あたりの温室効果ガス量をミールワームと比較すると、コオロギはミールワームの 1/8 程度であり、昆虫の中でも特に優れていることがわかる(図 17)。以上から、主要油脂の生産量を増やすための農園の開発を防ぐことができ、さらにはコオロギを選定したことによるメリットも十分大きいことがわかる。

	コオロギ	バッタ	ミールワーム	カイコ
				
飼育容易度	やさしい	難しい	やさしい	やさしい
発育日数	1~1.5ヶ月	2週間	~数ヶ月	1ヶ月
体サイズ	大	大	中	大
食性	雑食	草食	雑食	草食(桑)
飼料効率	高	低	高	低

図 15. 各昆虫における特性

(出典 : GRYLUUS <https://gryllus.jp/why-cricket/>)

種類	搾油量(kg/ha)
パーム油	3,800
なたね油	1,200
大豆油	550

図 16. 単位収穫面積当たりの搾油量

(出典 : 脱炭素社会と油脂産業 一般財団法人 油脂工業会館 脱炭素社会貢献研究会)

最後に、コオロギオイルで化学産業を支えることが可能かを検証した。エステル系の多価アルコールに着目すると、世界の販売数量は、2021 年実績で 239 万 t/y であった²⁹⁾。この値を参考に、必要飼育面積を算出したところ、約 4000~5000 万 m²必要であることがわかった。膨大な飼育面積となるため、分散化が必要になると考えられる。飼育環境が懸念点となるが、コオロギは密閉容器で飼育することで、温度管理ができない建物内でも養殖できる³⁰⁾。そのため、様々な既存建物をコオロギ農場とすること

ができ、新たな農場開発を進める必要も特にない。以上より、飼育場所を選ばないこともコオロギの特徴の一つであり、例え生産数量の増加が起きたとしても化学産業を支えることは十分可能であると考えられる。

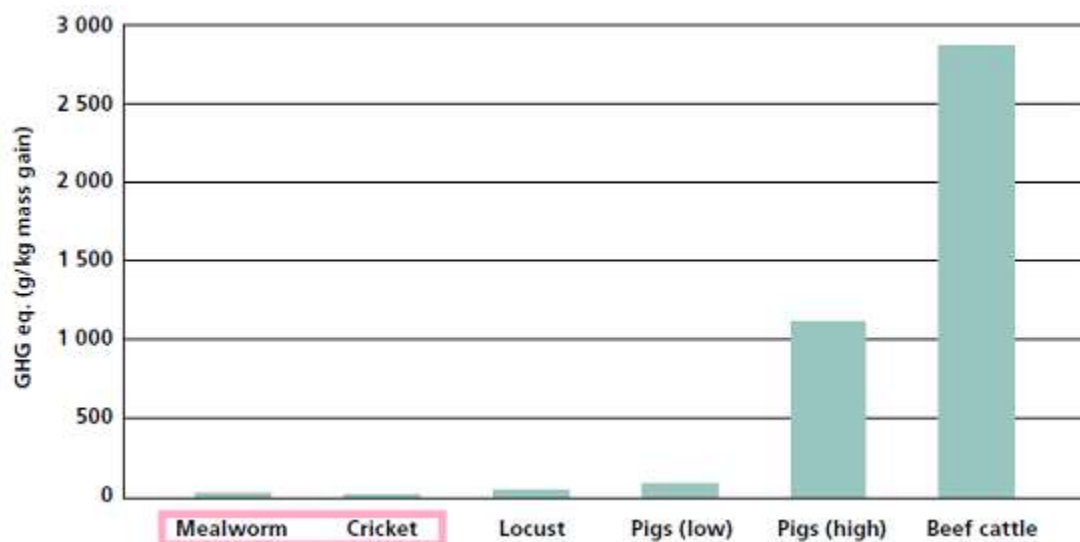


図 17. 各生物における質量増加 1kg あたりの温室効果ガス排出量

(出典：Future prospects for food and feed security FAO FORESTRY PAPER 171)

3-2. 乳酸の生産方法および使用の妥当性

トウモロコシの単位面積当たりの収穫量は農林水産省の農林水産統計の資料によると、50700kg/ha であった。そこから単位収穫面積当たりの乳酸生産量を算出すると 20280kg/ha であり、主要油脂と比較しても高い値であることがわかる(図 16)。トウモロコシ以外からも乳酸を生産できる方法はあるが、サツマイモ、ジャガイモ、キャッサバ、ビートは乳酸の 1/10 程度、サトウキビでは 1/2 程度といわれている³¹⁾。近年では、葉や茎、間伐材などセルロース由来物や生ゴミ等のバイオマス廃棄物を原料としたポリ乳酸の開発検討が進められており³¹⁾、トウモロコシなどを使用せずとも生産できる可能性が高くなってきている。また、トウモロコシはもともと中南米の暑い地域の作物だが、寒い環境でも生産できるように品質改良もされている(農林水産省より)。そのため、コオロギの飼育環境に合わせてトウモロコシを生産することができる。トウモロコシの肥料としては鶏糞などを用いずに、コオロギフラス(コオロギの排泄物)を使用することでコオロギフラスの廃棄を防ぐ。コオロギフラスは肥料の 3 大要素である窒素、リン酸、カリウムのうちリン酸を最も高い割合で含んでおり、これら全て

の成分を牛糞および鶏糞と比較すると中間程度の肥料効果が期待できることが報告されている(図 18)。コオロギを食品ロス由来 100%のコオロギを飼育することで循環型システムを構築することも可能である(図 19)。これらのシステムを構築するためにも、コオロギを使用することは適していると言える。

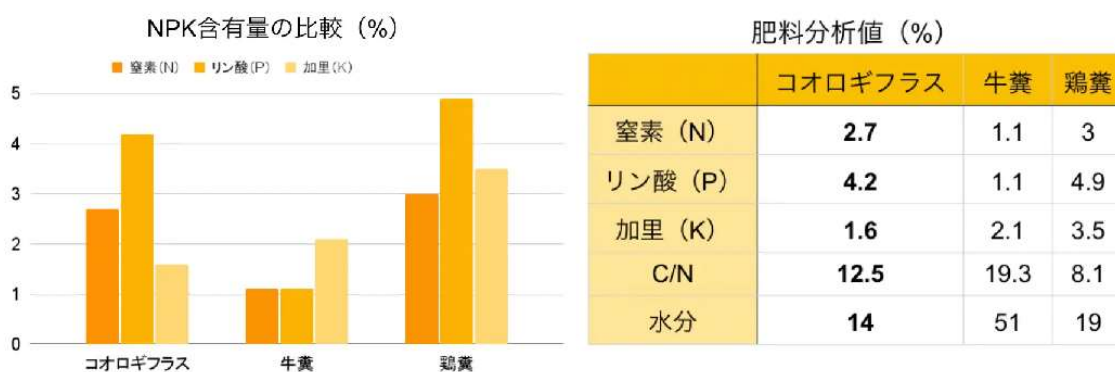


図 18. コオロギフラス・牛糞・鶏糞の NPK 含有量

(出典：株式会社グリラス 2023 年 3 月 8 日 11 時 00 分 プレスリリース)

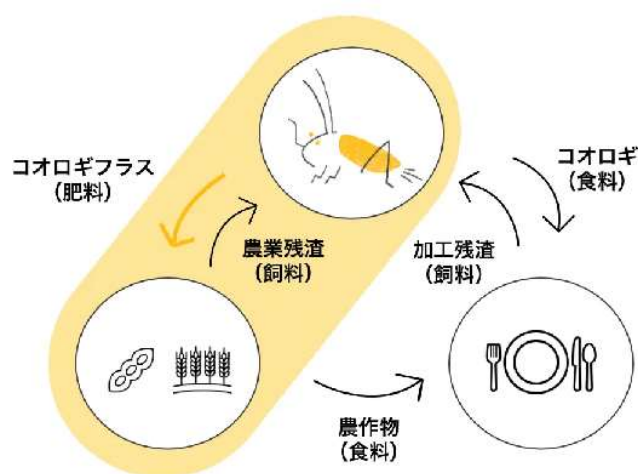


図 19. 循環型の食料システムの構築図

(出典：株式会社グリラス 2023 年 3 月 8 日 11 時 00 分 プレスリリース)

以上より、乳酸を生産する際は、他の原材料よりもトウモロコシを利用した方が優れており、生分解性を付与することでプラスチックなどの単純焼却も防ぐことができる。さらには、コオロギフラスを肥料として活用することで通常のトウモロコシよりも環境負荷を低減できることがわかる。

3-3. ハイブリッドシステム活用による CO₂削減量

削減量としては大きく 4 つに分類して算出した。その後、それらを合算することで最終的な CO₂削減量を算出した。

①クリケットオイル使用による CO₂の削減量、

②乳酸使用による CO₂の削減量、

③EFB 由来パレットによる CO₂の削減量、

④廃プラ削減による CO₂の排出量 について算出した。

①では、主要油脂などをクリケットオイルに置き換えることでそれらが排出してきた CO₂を削減できることとなる。そこで、パーム油を代表値として選定し、削減量を算出した。パーム油はアブラ椰子栽培から消費までの CO₂排出量として 1t あたり 28.35t-CO₂/t というデータがある³²⁾。この値を参考に CO₂削減量を算出した。まず今回の目標である 8000t において算出したところ CO₂削減量は 23 万 t-CO₂となった。一方で、8000t を生産するのに必要な飼育面積はパーム油では、約 2100ha 必要となるのに対して、クリケットオイルでは約 80ha となった。この結果より限られた土地などでも効率よく生産可能であり、さらには食品廃棄物などで育成できるため脱炭素社会に向けた一つの取り組みと言える。

②に関しては通常の製造方法と比較して変化がないため CO₂排出量は実質的に変化がないことが明らかである。通常のトウモロコシは肥料を多く必要とするため、肥料供給懸念がある。しかし、本システムはコオロギフラスを使用するため供給懸念がなく、安定的に肥料を供給することができる。肥料輸送の際に発生する CO₂排出量を低減できることから脱炭素社会への取り組みと言える。

③に関しては、木造パレットを基準に CO₂の削減量を算出した。図より、パレット 1 枚当たりの原材料製造に伴う CO₂の排出量は、23.4kg である。また、1 パレットにつき 700kg の多価アルコールを積載可能と仮定する³³⁾。今回の想定生産量(14000t/y)では、約 20000 枚必要となる。その枚数に、1 枚当たりの CO₂排出量を掛けると約 470t-CO₂となった。実際は森林伐採も防ぐこととなるため、今回示した値よりも多く削減できることが考えられる。EFB を活用して製造するため、EFB 使用による CO₂排出削減量を算出した。EFB は木製パレットの重さは約 40kg/枚である。今回の必要枚数にパレット重さを掛けると、460t 必要であることがわかる。含水率を考慮すると EFB は約 1150t 必要となる。EFB1t 当たりのメタンガス排出量は 0.005t である³⁴⁾。この値に必要

な EFB 量を掛けると、約 6t-CH₄ のメタンガス排出量を防げることとなる。メタンは CO₂ の約 25 倍の温室効果ガスがあるといわれている。そのため、CO₂ で換算すると約 150t-CO₂ となる。以上より、パレットによる CO₂ の排出量を削減できるだけでなく、EFB の廃棄や投棄を防ぐことでさらなる削減が出来ていることが明らかとなった。最後に④では、廃プラスチック削減による CO₂ 削減量を算出した。図中の値を参考に 1kg 当たりの CO₂ 削減量は 3.3kg とする(図 20)。多価アルコールは、製造量約 14000t と想定しており、その値を用いて算出した結果、CO₂ 削減量は、約 5 万 t-CO₂ となった。

①-④の数値を合計すると、約 30 万 t-CO₂ となった。これは、プラスチックおよびゴム製品製造業の CO₂ 排出量の約 3%にあたる。また、各項目における CO₂ 削減量をまとめた(図 21)。図からも植物油代替(クリケットオイルの使用)と廃プラ削減による効果が大きいことが明らかである。このハイブリッドシステムを活用することで、数千～数万 t スケールの生産でさえもかなりの CO₂ を削減できることがわかる。さらには、主要植物油脂を利用しない油脂の生産方法を見出したことで油脂産業に貢献できるだけでなく、乳酸と組み合わせることにより他業界でも利用可能な多価アルコールの製造プロセスを見出すことができた。本システムは第 3 章で論述した通り、コオロギを用いなければ達成することができない部分が多くあり、コオロギを用いることの必然性を強く感じる。上記の CO₂ 削減量からも脱炭素社会に貢献できる力が本システムには十分にあると言える。本システムが実装され生産量が徐々に増加することにより想像できないほどの CO₂ を削減できることになると私は考えている。

	CO ₂ 削減係数 (kg-CO ₂ /kg)	2030年		2050年	
		実証規模 (万トン)	CO ₂ 削減量 (万トン)	導入規模 (万トン)	CO ₂ 削減量 (万トン)
ナフサ分解炉の高度化技術	0.8	-	-	680	544
廃プラ・廃ゴムからの化学品製造	廃プラ	4	13.2	100	330
	廃ゴム	10.2	33.7	100	330
CO ₂ 等からの化学品製造	DRC	0.3	0.4	50	68
	MDI	10	0.8	50	40
アルコール類からの化学品製造	グリーン水素	0.416	3.7	150	1335
	MTO	20	32.0	220	352
	ETO	10	16.0	100	160
国内のCO ₂ 削減量			107.0		3159
世界のCO ₂ 削減量			0.4億トン		11億トン
国内の経済効果			0.3兆円		10兆円
世界の経済効果			10兆円		360兆円

図 20. 各プロセスにおける CO₂削減係数

(出典：カーボンニュートラルで生まれるプラスチックの課題とニーズ MATERIAL STAGE Vol23, No.1 2023)

現状(システム導入前)	システム導入後	CO ₂ 削減量(t-CO ₂ /t)
パーム油	クリケットオイル	28.5
乳酸	乳酸	0
木製パレット	EFB由来パレット	0.03 ^{☆1}
EFB投棄・廃棄	EFB再利用	0.13 ^{☆2}
石油由来の原料	昆虫由来×生分解性由来の原料	3.3

☆1：470t-CO₂(木製パレット生産削減によるtotalのCO₂削減量)/14000t(想定生産量)

☆2：150t-CO₂(EFB投棄・廃棄回避によるtotalのCO₂削減量)/1150t(EFBのtotal必要量)

図 21. ハイブリットシステム導入後の CO₂削減量

おわりに

今後の油脂産業においては、人口増加などに伴い油脂生産量が数十年先においても増加することが予想されている。しかし、地球温暖化による平均気温の上昇、これまでに経験したことがない気候変動や大災害などの影響を受け益々供給不足リスクが高まってくると私は考えている。この対策として主要油脂を使用しない油脂供給は今後重要な対策案の一つとなり、脱炭素社会へ貢献する一つの手段となり得るであろう。ただ、油脂供給に拘るのではなく、脱炭素社会へ貢献できる具体的な施策を示す必要

があると考えている。本提案では、主要油脂以外から油脂を採集できる方法を提案したことに限らず、乳酸と組み合わせることにより、油脂産業以外の化学産業などにもアプローチ可能なバイオベースポリマーの合成プロセスを見出した。さらには、確実に脱炭素社会への貢献を果たすべく生分解性を有した原材料設計としたことで、高付加価値をも示すことができた。単に植物由来の材料を製造するだけで終わることなく、これまで大きな課題として議論されてきた EFB の活用方法も示すことができ、生産から輸送までの一連の流れにおいて脱炭素社会へ貢献できるプロセスを示すことができた。

本提案で示したクリケットオイルはまだ実用化さればかりの技術が多く、今後更なる技術が創出されることが期待できる。今回は生産量としても 8000t/y と設定したが、これをファーストステージと捉えて、生産方法の効率化、耕作放棄地の活用などを実施することで更なる生産量拡大を行う。本技術は、昆虫食製造のヒントにもなり得る技術だと考えており、食糧不足問題にも貢献できることを願う。本論文を活用して油脂産業だけにとどまらず幅広い業界から脱炭素社会へ貢献できることを祈ると同時に、更なるアイデア、技術を提案できるよう研究開発に邁進していく所存である。

【参考文献】

- 1) 脱炭素ポータル https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/road-to-carbon-neutral/
- 2) 脱炭素社会と油脂産業 ～パーム油の国産化と分散型社会への貢献～ P.4
- 3) 油脂産業における地球温暖化対策 P.4
- 4) 脱炭素社会と油脂産業 ～パーム油の国産化と分散型社会への貢献～ P.9
- 5) CO₂削減の夢の技術！進む「カーボンリサイクル」の開発・実装 | スペシャルコンテンツ | 資源エネルギー庁 ([meti.go.jp](https://www.meti.go.jp))
- 6) CO₂回収・貯留 (CCS) - 環境技術解説 | 環境展望台 : 国立環境研究所 環境情報メディア ([nies.go.jp](https://www.nies.go.jp))
- 7) 日本接着学会 接着の技術 Vol43 No.1 2023 P.3
- 8) プラスチック製品の一般社団法人 プラスチック循環利用協会 2022年12月発行 生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況
- 9) カーボンニュートラルで生まれるプラスチックの課題とニーズ MATERIAL STAGE Vol.23, No.1 2023 P.1

- 10) ポリウレタン国際フォーラム Development of environment-friendly recycling methods of polyurethanes Suguru Motokucho 資料より
- 11) 脱炭素社会と油脂産業 ～パーム油の国産化と分散型社会への貢献～ P.24
- 12) 株式会社グローバルインフォメーションプレスリリース 2021年12月27日 12時00分 天然油ポリオールの世界市場
- 13) 脱炭素社会と油脂産業 ～パーム油の国産化と分散型社会への貢献～ P.43~44
- 14) グリラス Why Cricket? (gryllus.jp) <https://gryllus.jp/why-cricket/>
- 15) 無印良品 コオロギ地球を救う？ <https://www.muji.com/jp/ja/feature/food/460936>
- 16) オレオサイエンス 第22巻第4号(2022) P.12
- 17) 2022 ポリウレタン原料・製品の世界市場と将来展望 株式会社富士経済 P.75
- 18) 昆虫の飼料利用に関する研究動向と今後の課題 日畜会報 92(3) : 265-278, 2021
- 19) Insect Mass Production Technologies Chapte6 ResearchGate P.163
- 20) 植物油脂を用いるバイオマスプラスチックの開発動向 オレオサイエンス 第14巻第3号(2014)
- 21) 乳酸発酵による食品廃棄物からの乳酸回収と飼料化のコンバインドシステム国立環境研究所 井上雄三
- 22) バイオマスから製造するポリ乳酸 小原仁実 糖質酵素化学シンポジウム p.409
- 23) パーム産業における未利用バイオマスの有効利用と最適なプロセス開発 IHI 技報 VOL.59 No.4 (2019) P.77-78
- 24) パーム産業における未利用バイオマスの有効利用と最適なプロセス開発 IHI 技報 VOL.59 No.4 (2019) P.78-79
- 25) ウッドデザイン賞受賞作品データベース <https://www.wooddesign.jp/db/production/1066/>
- 26) ポリウレタン国際フォーラム 三井化学株式会社 Current efforts by Polyurethanes to reduce environmental load
- 27) クリケットファーム HP <https://www.cricketfarm.co.jp/>
- 28) 最強の食材コオロギフードが地球を救う コオロギによる循環型食用タンパク質生産 野地澄晴 P.109-110
- 29) 2022 ポリウレタン原料・製品の世界市場と将来展望 株式会社富士経済 P.50
- 30) 最強の食材コオロギフードが地球を救う コオロギによる循環型食用タンパク質生

産 野地澄晴 P.154-155

31) FUJITU HP <https://www.fujitsu.com/jp/about/research/techguide/list/corn/>

32) 脱炭素社会と油脂産業 ～パーム油の国産化と分散型社会への貢献～ P.43

33) 丸一海運株式会社 HP <https://mkc-net2.com>

34) SCEJ 70th Annual Meeting マレーシアパームオイル産業廃棄物(アブラヤシ空房)からの温暖化ガス発生量推定 末永ゆうこ